LICHT 20|12

20. Gemeinschaftstagung
Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V.
Nederlandse Stichting voor Verlichtingskunde
Lichttechnische Gesellschaft Österreichs
Schweizer Licht Gesellschaft

11. bis 14. September 2012
Technische Universität Berlin

TAGUNGSBAND

Impressum

Herausgeber ›› Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. (LiTG)
Burggrafenstraße 6, D-10787 Berlin

Umschlaggestaltung ›› donnagassi Kommunikationsdesign, Berlin
Druck ›› primeline.print, Berlin

ISBN ›› 978-3-927787-37-7

powered by ›› instrument systems

Instrument Systems
light measurement

Liebe Tagungs-Teilnehmer,

der Einfluss des Lichtes auf den Menschen – ob natürlich oder künstlich – ist der breiten Öffentlichkeit in den letzten Jahren immer bewusster geworden. Nicht nur die Fachleute wissen mittlerweile um den Einfluss des Lichtes auf das Leben auf unserem Planeten.

Die Geschichte zeigt uns, dass die technische und wissenschaftliche Beschäftigung mit dem Licht mindestens seit dem Mittelalter über die Öllampen, Kerze, Gaslicht bis zum elektrischen Licht die Menschheit begleitet hat. Die moderne Welt ist bei den künstlichen Lichtquellen von der Glühlampe kommend über Halogen-, Hochdruckentladungs- und Energiesparlampen heute bei der LED angelangt.
Das 20. Jahrhundert war das Jahrhundert des Elektrons. Das 21. Jahrhundert steht unter der Erkenntnis, dass die Photonik zu den wichtigsten Schlüsseltechnologien gehört. Deshalb müssen LED und OLED zum Leitprodukt für die Beleuchtung werden. Und somit wird Licht zum Innovationstreiber Nr. 1.

Das Programm der LICHT 20|12 enthält wieder das gesamte Gebiet der Lichttechnik und der Lichtgestaltung, d.h. sie verbindet traditionelle wissenschaftliche und anwendungsorientierte Vorträge. Die Struktur der vorliegenden Vorträge zeigt erfreulicherweise, dass es weiterhin interessante Themen in der Lichttechnik neben der LED gibt.
Die große Anzahl der Einreichungen hat es notwendig gemacht auch dieses Jahr eine zweizügige Veranstaltung anzubieten.
Es wurde erstmals durch eine Fach-Jury aus den vier veranstaltenden Ländern eine Bewertung der eingereichten Paper vorgenommen und nun haben Sie zusätzlich noch die Möglichkeit mit einer Bewertung ihrerseits die Qualität der gehaltenen Vorträge zu prämieren.
Mit dem Veranstaltungsteil „Lichttechnik trifft Lichtgestaltung“ haben wir ein Vortragsmodul speziell von und für Architekten, Lichtplaner und Designer ins Programm aufgenommen. Diese werden durch die Lichtspaziergänge ergänzt.

Die Vorträge wurden in folgende Themengruppen zusammengefasst: Innenbeleuchtung inkl. Speziellen Themen dazu z.B. Energieeffizienz; Kfz-Beleuchtung; Messtechnik; Lichtquellen inkl. LED-Spezial-Themen sowie Hochdruck-Lampen; Außenbeleuchtung; Wahrnehmung; Tageslicht

Die Beiträge der Tagung LICHT 20|12 werden in der vorliegenden Buchform und auch auf USB-Stick festgehalten. Mit Hilfe von Sponsoren ist es möglich geworden, dass Sie den Tagungsband mitnehmen können, damit Sie jederzeit nachlesen und nutzbringend verwenden und auch weitergeben können z.B. an Interessenten die nicht auf der Tagung sein konnten. Für den Inhalt und die Aufmachung der Vorträge sind die Autoren – trotz organistorischer Vorgaben – selbst verantwortlich.

Danke für ihre Teilnahme an der LICHT 20|12 in Berlin und auf Wiedersehen bis zur nächsten Licht 2014 in den Niederlanden.

Organisations-Team LICHT 20|12

Vorträge und präsentierte Poster

Innenbeleuchtung (Energieeffizienz)

Energieeffiziente Beleuchtung in Gebäuden: EnEV 2012 und DIN V 18599:2011
›› **Jörg Minnerup** ›› 20

Energieeffizienz von lichttechnischen Anlagen und Produkte – Die europäischen Mandate M/480 und M/485
›› **Soheil Moghtader** ›› 28

Neue energetische Effizienzkennzahlen und Bewertungsverfahren für Beleuchtungssysteme in Gebäuden
›› **Jan de Boer** ›› 31

Energieeffiziente Beleuchtung in Shops
›› **Christof Amann** ›› 38

Schulbeleuchtung mit LED – Entwicklung und Umsetzung einer Lichtlösung für die Allgemein- und Tafelbeleuchtung in Klassenräumen
›› **Matthias Fassian** ›› 46

Stand der Industriebeleuchtung mit LED – Was ist heute schon wirtschaftlich möglich?
›› **Hans-Hasso Lange** ›› 54

Planung biologisch wirksamer Beleuchtung – Vorstellung der Arbeitsergebnisse der Ad-Hoc Arbeitsgruppe des FNL 27
›› **Matthias Fassian** ›› 61

Entscheidungskriterien für Lichtmanagement – ein Bericht zum Sachstand
›› **Peter Dehoff** ›› 67

Innenbeleuchtung (Spezialthemen)

Kenngrößen der Farbqualität in der Innenraumbeleuchtung
›› **Peter Bodrogi** ›› 71

Aufmerksamkeitsäquivalent – Eine Studie zur Wirksamkeit einzelner Beleuchtungsparameter auf die Wahrnehmung und Präferenz von Kunden in einem Shop
›› **Birthe Tralau** ›› 78

Untersuchungen an LED-Leuchten im Bürobereich
›› **Cornelia Vandahl** ›› 84

Einfluss unterschiedlicher Beleuchtungskonzepte und Lampenspektren in der Innenraumbeleuchtung
›› **Wjatscheslaw Pepler** ›› 92

Störung durch Reflexionen auf Flachbildschirmen
›› **Paul Schmits** ›› 99

Licht- und Raumwirkung in Universitätsbibliotheken – Wie nutzbar sind zeitgenössische Bibliotheken??
›› **Maria Goldberg** ›› 107

Das Schädigungspotenzial von unterschiedlichen Lichtspektren am Beispiel eines Picassos
›› **Carina Buchholz** ›› 115

Die Dimensionen der Lichtqualität: Ein neues ganzheitliches Konzept für Planung und Anwendung
›› **Birthe Tralau** ›› 119

Entwicklung einer Hybridleuchte mit LEDs und OLEDs
›› **Paola Belloni** ›› 126

LEDs als Lichtquelle für die Museumsbeleuchtung
›› **Alexander Wilm** ›› 130

Hallenbeleuchtung in der Automobilindustrie. Aktueller Stand der Entwicklung am Beispiel des VW-Konzerns
›› **Norbert Wasserfurth** ›› 134

Mit LED 80 % Strom sparen gegenüber T5-Lampen bei Korridorbeleuchtung
›› **Stefan Gasser** ›› 139

Innenraumbeleuchtung mit LED- und Leuchtstofflampen – lichtmesstechnische und visuelle Feldtests
›› **Marvin Böll** ›› 144

Kfz-Beleuchtung

Führt dynamisches Kurvenlicht zu einer Veränderung des Blickverhaltens?
›› **Carmen Kettwich** ›› 152

Flickerempfindung bei Veränderung der Lichtverteilungen von Kfz-Scheinwerfern
›› **Johannes Ludwig Foltin** ›› 158

Anpassung der adaptiven Hell-Dunkel-Grenze an die Straßenqualität
›› **Johannes Foltin** ›› 166

Entwicklung eines Projektor-basierten Forschungsscheinwerfers zur Erprobung neuartiger Lichtverteilungen
›› **Steffen Michenfelder** ›› 172

Bewertung der Abblendlicht-Fernfeldverteilung in einem geschlossenen Raum durch geometrische Verkürzung
›› **Michael Marutzky** ›› 180

Messtechnik

Bewertung von Nahfeldgoniophotometern
›› **Knut Bredemeier** ›› 188

Einsatz von bildgebenden Leuchtdichtemesskameras bei der Bewertung von Blendungssituationen
›› **Tobias Porsch** ›› 196

Messungen von SSL-Lichtquellen in Ulbricht-Kugeln und mit Goniospektralradiometern
›› **Denan Konjhodzic** ›› 204

Analyse der goniophotometrischen LED-Leuchtenlichtmesstechnik – Verfahren, Vergleichsmessungen, Messunsicherheitsbestimmung ›› 210
›› **Dietmar Gläser**

Anwendung von modifizierten Farbmesskameras für photometrische Messungen im mesopischen Bereich
›› **Udo Krüger** ›› 217

Spektroradiometrisches Verfahren zur Messung der Lichtstärkeverteilung von LED-Leuchten
›› **Silvia Bensel** ›› 222

Richtungsabhängige Empfindlichkeit von Photometerköpfen
›› **Detlef Lindner** ›› 226

Spektrale Empfindlichkeit von Photometerköpfen und ihre Richtungsabhängigkeit
›› **Michaela Schuster** ›› 233

Das Glühlampenverbot – Der Anfang vom Ende eines kalkulierbaren Transfer-Normals? Ein verfrühter (?) Nachruf aus messtechnischer Sichts?
›› **Werner Jordan** ›› 241

Lichtquellen (LED allgemein)

Über die Alterungen von Hochleistungs-LEDs: Verfahren, Aufbau, Alterungsmechanismen
›› **Hartmut Kopp** ›› 249

Die Vorteile homogen abstrahlender LED Light Engines für Leuchtenhersteller
›› **Hubert Ott** ›› 256

Analyse des thermischen Degradationsverhaltens von LED-Systemen
›› **Manfred Scholdt** ›› 262

Messung, Simulation und Optimierung weißer YAG-LEDs
›› **Charlotte Bois** ›› 270

Anwendung der OLED als professionelles Leuchtmittel in der Allgemeinbeleuchtung
›› **Sebastian Ludwig** ›› 277

Neuartige quecksilberfreie Kompaktleuchtstofflampen
›› **Rainer Kling** ›› 282

Präzise Bestimmungen der thermischen und elektrischen Daten verschiedener Hochleistungs-LED-Typen mit verschiedenen Leiterplatten und Kühlungssystemen
›› **Tran Quoc Khanh** ›› 288

Lichtquellen (HID)

Neue Hochdrucklampen für die Industriebeleuchtung
›› **Martin Tüshaus** ›› 295

Neuartige hocheffiziente Metallhalogenidlampen-Systeme
›› **Klaus Stockwald** ›› 303

Keramische HID-Lampen für den Halogenlampenersatz in professionellen Anwendungen
›› **Bernd Koch** ›› 310

Radioaktivitätsfreie HID-Lampen
›› **Stefan Lichtenberg** ›› 314

Keramische Elektroden als Ersatz für Wolfram-Elektroden in Hochdruck-Entladungslampen
›› **Thomas Hartmann** ›› 321

Lichtquellen (LED Spezialthemen)

Vorbild Natur: Bionische Strukturen zur Entwärmung von LEDs
›› **Christian Herbold** ›› 327

Leuchten-integrierte Steuerung von LED-Leuchten
›› **Peter Deixler** ›› 335

Potenziale und Grenzen der LED – Eine wissenschaftliche Standortbestimmung
›› **Rainer Kling** ›› 343

OLEDs in der Beleuchtungsplanung – Standard wie immer?
›› **Claus Steinwandt** ›› 351

Remote Phosphor Technologie für Weißlicht-Anwendungen
›› **Martin Schiel** ›› 356

High CRI LED Beleuchtung für Museen
›› **Mourad Boulouednine** ›› 360

LED- und Tageslichttechnik – Eine perfekte Symbiose
›› **Hans Laschefski** ›› 368

Außenbeleuchtung (wissenschaftlich)

Objektdetektion bei verschiedenen Adaptationsspektren und Störgrößen unter mesopischen Bedingungen
›› **Andreas Ueberschaer** ›› 376

Untersuchungen zu Reflexionseigenschaften von Straßendeckschichten
›› **Christoph Schulze** ›› 384

Neufassung der DIN 67523 für die Beleuchtung von Fußgängerüberwegen – neue Anforderungen an konventionelle und LED-Leuchten
›› **Jan Reinhardt** ›› 392

Grundlegende Untersuchung zur Unterschiedswahrnehmung bei inhomogenen Leuchtdichtefeldern in der Straßenbeleuchtung
›› **Andreas Walkling** ›› 400

Außenbeleuchtung (anwenderorientiert)

Schlechtwetteroptimierte LED-Straßenbeleuchtung zur Verbesserung der Sehsicherheit
›› **Andreas Walkling** ›› 405

LED-Straßenbeleuchtung in der Schweiz: Der Schritt in die Zukunft nach ersten Erfahrungen
›› **Jörg Imfeld** ›› 410

Rahmenpläne für Stadtbeleuchtung – Quo Vadis?
›› **Dennis Köhler** ›› 418

Vorschlag zu Kennzeichnung von LED-Außenleuchten
›› **Norbert Wasserfurth** ›› 426

Lichtmasterplan in 3D
›› **Norbert Wasserfurth** ›› 434

Untersuchung der Aussagekraft von Lichtsimulationen am Beispiel von DIALux und Verifizierung anhand von Messungen
›› **Tristan Schäfer** ›› 442

Mobiles Messsystem zur automatisierten, geokodierten Messung von Beleuchtungsniveaus der Straßen- und Außenbeleuchtungsanlagen
›› **Klaus Bellgardt** ›› 450

Wahrnehmung

Wirkungen von Licht auf den Menschen
›› **Dieter Lang** ›› 458

Einfluss der Beobachtungsfeldgröße auf Farbabgleichversuche mit LED-Lichtquellen
›› **Saskia Polster** ›› 461

Neue 3-Kammer-Methode für die Psychometrie der Farbqualität für weiße LEDs
›› **Nathalie Krause** ›› 469

Blendung – Ein Rückblick über 100 Jahre Forschung
›› **Stephan Völker** ›› 476

Einfluss der spektralen Verteilung einer Lichtquelle auf die Blendung im Mesopischen
›› **Mathias Niedling** ›› 484

Wahrnehmungsbasierte Lichtplanung – Theorie und Praxis
›› **Katja Schiebler (geb. Schölzig), Arne Hülsmann** ›› 488

Licht als sensibles Werkzeug im sakralen Raum Pfarrkirche Lingenau, Vorarlberg
›› **Gudrun Schach** ›› 496

Tageslicht

Über die Blendungsbewertung von reflektiertem Sonnenlicht bei Solaranlagen
›› **Christoph Schierz** ›› 498

In Situ-Bewertung von unterschiedlichen Sonnen- und Blendschutzbehängen in ihrer realen Einbausituation
›› **Johannes Zauner** ›› 506

Mikrostrukturiertes Tageslichtlenksystem mit hoher Effizienz
›› **Stephan Klammt** ›› 514

Felduntersuchung zur Tageslichtnutzung an Büroarbeitsplätzen und dem Einfluss der Architektur
›› **Cornelia Moosmann** ›› 522

Untersuchung von Lichtwirkungen am Tage – Feldstudie in Industriebetrieben
›› **Karin Bieske** ›› 530

Beleuchtungssanierung mit innovativen Tageslichtsystemen im Baudenkmal
›› **Roman Jakobiak** ›› 538

Poster-Aussteller

Belloni, Paola
›› LED-Netzwerk Schwarzwald – Einführung von LEDs in der kommunalen Straßenbeleuchtung ›› 548
›› UV-A-Hintergrundbeleuchtung für ein selbstreinigendes Eingabe-System ›› 556

Daoudi, Karim
›› Wissenschaftlich-technische Untersuchung einer Beleuchtungsanlage ›› 560

Groh, Andreas
›› Lichtstrommessung mit verschiedenen U-Kugel-Geometrien und -Verfahren – Eine detaillierte Analyse, Messunsicherheitsbestimmung ›› 568

Heinze, Robert
›› Leuchtensteuerung via Browser und Smartphone ›› 574

Hennig, Rüdiger
›› Lichtwerbung und Leuchtreklame im Wandel der Zeit – Rück- und Ausblick im Überblick ›› 580
›› RGB-Licht im Wechselspiel mit Digitaldruck – eine Befragung zum PictoFlat color art und deren Auswertung ›› 586

Imfeld, Jörg
›› Was sagt die SLG zu Abschaltungen in der Straßenbeleuchtung? ›› 590

Jordan, Werner
›› LED – Lichtempfindlichkeit ade? ›› 596

Kaiser, Elmar
›› Sanierungsprojekt Straßenbeleuchtung Gemeinde Wolfschlugen: LED-Technik contra konventionelle NAV-Technik ›› 604

Kaup, Marc
›› LSR-Optiken – Lichtdurchlässig, Stabil, Reversibel verformbar ›› 611

Marx, Peter
›› Elektronische Ulbrichtkugel mit Spiral-Abtastung ›› 615

Moormann, Leopold
›› Renopol, die kostengünstige Lichtmast-Lösung ›› 623

Mühlstedt, Jens
›› Aktivierende, dynamische Bildschirmarbeitsplatz-Hintergrundbeleuchtung für Wissensarbeitsplätze „OWLIGHT“ ›› 628

Nimz, Thomas
›› Optimierung der Absolutgenauigkeit von True Color-Farbsensoren zur Regelung von n-farbigen LED-Leuchten ›› 636

Rathmann, Hans-Jürgen
›› Modernisierung der Stadtbeleuchtung Cottbus – Erfahrungsbericht eines PPP-Modells ›› 643

Reinhardt, Jan
›› Einsatz moderner LED-Leuchten für die Beleuchtung von Arbeitsplätzen im Freien am Beispiel eines Autozugterminals ›› 644

Schach, Gudrun
›› Papier und Licht ›› 647

Schulz, Andreas
›› Beleuchtung für Museen – Tageslichtsteuerungsysteme und state-of-the-art Lichttechnologien für hochwertige Museumsarchitektur ›› 649
›› Le Domaine Abadia Retuerta, Valladolid – Licht für ein 5-Sterne-Hotel in einer Klosterarchitektur aus dem 12. Jahrhundert ›› 657
›› Licht für das ThyssenKrupp Quartier – Entwicklung eines Corporate Lighting Konzeptes für das neue Headquarter in Essen ›› 665

Seibicke, Volker
›› Normung und Standardisierung zur Umsetzung von Innovationen und Forschungsergebnissen ›› 673

Werner, Daniel
›› Untersuchung von LED-Retrofit-Produkten als Ersatz klassischer Glühlampen für das Einsatzgebiet städtischer Weihnachtsbeleuchtung ›› 677

›› VORTRÄGE UND PRÄSENTIERTE POSTER

Energieeffiziente Beleuchtung in Gebäuden: EnEV 2013 und DIN V 18599:2011

Autor: Dipl.-Ing. Jörg Minnerup, TRILUX GmbH & Co. KG, Heidestraße, D-59759 Arnsberg

Der Autor ist Mitglied im deutschen Lenkungsgremium Energy Performance of Building Directive (EPBD), seit dem Jahr 2009 im Hauptausschuss „Energetische Bewertung von Gebäuden“ der Normenausschüsse Bau (NaBau), Heiz- und Raumlufttechnik (NHRS) und Lichttechnik (FNL) zur Bearbeitung der Vornormenreihe DIN V 18599 sowie in weiteren Gremien, die das Erreichen der deutschen Energiewende sicherstellen sollen.

Klimaschutzkonzepte – Was kann Beleuchtung beitragen?

Allgemeine / globale Betrachtungen:

In der Vergangenheit wurde vor den Hintergründen der deutschen und europäischen Energiekonzepte sowie der vorgesehenen Energiewende in Deutschland in erster Linie darüber diskutiert, wie der Ausbau der regenerativen Energieerzeugung als Ersatz für Kernkraft- und Kohlekraftwerke, der Netzausbau der Hochspannungsleitungstrassen und der Bau neuer Speicher realisiert werden könnte.

Seit den in Deutschland Anfang 2012 geführten Diskussionen und Entscheidungen bezüglich der Verringerung der Förderung der stromeinspeisenden Photovoltaikanlagen rücken diese Themen erneut in den Fokus. Immer wieder wird dabei die Frage gestellt, wie die Energiewende erreicht werden soll. Die offene Frage dabei bleibt stets, in welchem Umfang die Energiewende umgesetzt werden kann? Um diese Frage zu beantworten, ist zuerst eine weitere entscheidende Frage zu stellen: Wie viel Energie wird tatsächlich benötigt? Daraus leiten sich zwangsläufig weitere Fragen ab:
Ist der bisherige oder der prognostizierte Energieverbrauch die Bewertungsgrundlage zur Ermittlung des notwendigen Energiebedarfs?
Wie weit ist dabei jeweils der verringerte Energieverbrauch für heute verfügbare effiziente Technologien bereits berücksichtigt?
Welche Mixture von Investitionen in welche Techniken ist die volkswirtschaftlich sinnvollste Lösung?
Erst wenn diese Fragen detailliert zu beantworten sind, wird die deutsche Energiewende gelingen und die europäischen Klimaziele erreicht werden.

Bei einer globalen Betrachtung über die verschiedenen Gewerke hinweg wird deutlich, dass der Ausbau der regenerativen Energieerzeugung, der Netze und der Speicher zwingend notwendig ist, um auch in der Zukunft den Anforderungen der Gesellschaft und wirtschaftlichen Bedürfnissen nach Energieversorgung gerecht zu werden. Als Beispiel seien hier die E-Mobilität und die Versorgungssicherheit der herstellenden Industrie genannt. Gerade vor diesen Hintergründen und der Finanzierbarkeit der zukünftig notwendigen und gewünschten Infrastruktur kommt der Steigerung der Energieeffizienz die entscheidende Rolle zu. So sind jedem beispielsweise die Auswirkungen eines besser gedämmten Gebäudes in Bezug auf den Energiebedarf sofort klar. Dagegen sind die möglichen Energieeinsparpotentiale durch den Einsatz effizienter Systemtechniken, z. B. von Pumpen, Motoren und eben auch der Beleuchtung in der breiten Öffentlichkeit oft nicht bekannt bzw. wurden durch falsche Versprechungen von Herstellern vermeintlicher Energieeinsparsysteme und Erfahrungen von Nutzern mit solchen dubiosen Produkten enttäuscht. Daher finden Systemtechniken in den Diskussionen zur Energiewende nur sehr langsam Berücksichtigung. Und dies, obwohl in diesen Bereichen das wohl in der

Zukunft gewaltigste Energieeinsparpotential vorhanden ist und somit die Antwort auf die Frage nach dem notwendigen Energiebedarf und der Dimensionierung der Netze geben kann. So liegt es beispielsweise auf der Hand, dass jede nicht benötigte Kilowattstunde Strom nicht erzeugt und transportiert werden muss. Dies hat erhebliche Auswirkungen auf die Finanzierbarkeit der deutschen Energiewende und zur Erreichung der deutschen und europäischen Klimaziele.

Die Steigerung der Energieeffizienz durch die Weiterentwicklung von Produkten ist dabei nur ein zu betrachtender Bereich. Die Anwendung der im Markt bereits verfügbaren energieeffizienten Technologien spielt die entscheidende Rolle, sowohl im Neubau als auch in der Sanierung. Dass jeder im Bereich der energieeffizienten Systemtechnologien investierte Euro sinnvoll ist, zeigt eine Studie aus dem Hause McKinsey.

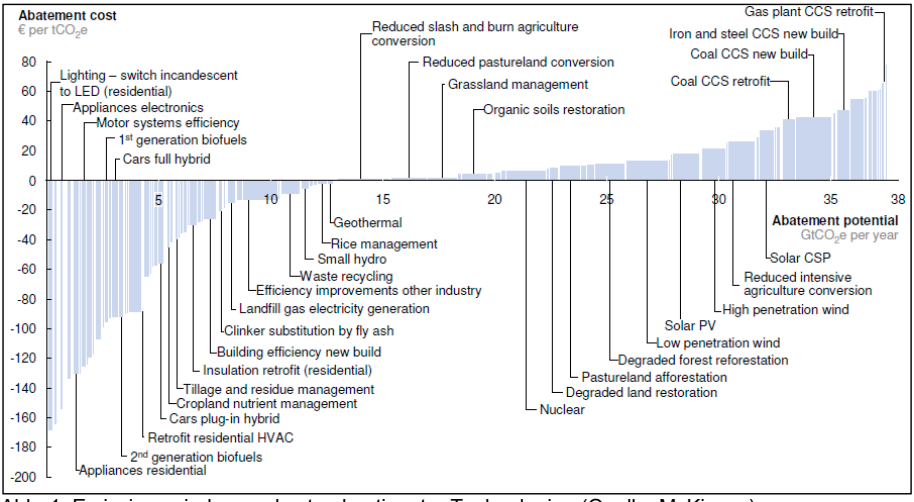


Abb. 1: Emissionsminderungskosten bestimmter Technologien (Quelle: McKinsey)

Abbildung 1 zeigt eine Schätzung der maximal möglichen technischen globalen Treibhausgas-Minderungsmaßnahmen unter € 80 pro tCO_2, wenn alle möglichen Hebel konsequent angewendet würden. Für den Fall, dass nicht alle Punkte umgesetzt werden, zeigt die Grafik auf, welche Emissionsminderungskosten für die verschiedenen Maßnahmen anfallen und damit, mit welcher Technologie eine Reduzierung von Treibhausgasen mit dem geringsten Kostenaufwand möglich ist. Dabei wird deutlich, dass die Sparte Beleuchtung die Spitzenposition einnimmt. Die Umstellung der Beleuchtung im Wohnbereich auf LED-Lösungen ist als die kostengünstigste Lösung zur Einsparung von CO_2 dargestellt. Darüber hinaus in Fachkreisen durchgeführte Betrachtungen kommen zu dem Ergebnis, dass dies für den Bereich der technischen Beleuchtung von Handel und Gewerbe, der Innenbeleuchtung im allgemeinen oder der Außenbeleuchtung übertragbar ist, sofern entsprechend ausgeführte effiziente Beleuchtungssysteme (speziell veredelte lichttechnische Optiken, effiziente Leuchtmittel wie z. B. die LED) und Lichtmanagement verwendet werden. Bei der konsequenten Umsetzung der möglichen Einflussgrößen ist gegenüber den Lösungen für den Wohnbereich mindestens ein vergleichbares Potential in Bezug auf effiziente Lösungen und in Bezug auf die einzusetzenden Investitionsmittel möglich.
Die LED hat längst begonnen, die Welt des Lichts zu revolutionieren. Kaum eine andere Technologie entwickelt sich so rasant wie diese. Nahezu in allen Anwendungsgebieten der

Beleuchtungstechnik sind LED inzwischen einsetzbar. Im Jahr 2012 haben hochwertige Leuchten mit LED den technologischen Stand von Leuchten mit Leuchtstofflampen weitestgehend erreicht, teilweise sogar schon deutlich übertroffen.

Wird der Einsatz von effizienten Leuchten kombiniert mit der Planung von Beleuchtungsanlagen und dem Einsatz von Lichtmanagementsystemen, so sind kurze bzw. auch beim Einsatz von LED-Lösungen bereits heute akzeptable Amortisationszeiten möglich.

Zusammenfassend ist daher zu konstatieren, dass jeder eingesetzte Euro in neue Beleuchtungsanlagen im Vergleich zu den anderen Technologien am meisten CO_2 spart.

Die angestrebten Umsetzungsziele (s. Tabelle 1) im deutschen Energiekonzept gehen dabei unter Berücksichtigung des in Deutschland vorhandenen Strommixes (AG Energiebilanzen – 2010: 57 % fossile Brennstoffe, 22 % Kernenergie, 17 % regenerative Energiequellen, 4 % Sonstiges) über die bereits ambitionierten Ziele der EU hinaus.

Jahr	Inhalt	Deutschland	Europa
2020	Minderung Treibhausgasemissionen (bezogen auf Werte von 1990)	≥ 40 %	≥ 20 % 25 % „CO_2 arme Wirtschaft“
	Anteil der erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch	35 %	33 %
	Anteil der CO_2-armen Energiequellen am Bruttostromverbrauch (inkl. Kernenergie), jedoch Vorrang für erneuerbare Energiequellen	-	≈ 66 % 2010: 45 %
	Minderung des Stromverbrauchs (bezogen auf 2008)	10 %	-
2050	Minderung Treibhausgasemissionen (bezogen auf Wert von 1990)	≥ 80 %	≥ 80 %
	Anteil der erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch	80 %	-
	Anteil der CO_2-armen Energiequellen am Bruttostromverbrauch (inkl. Kernenergie), jedoch Vorrang für erneuerbare Energiequellen	-	≈ 100 % 2010: 45 %
	Minderung des Stromverbrauchs (bezogen auf 2008)	25 %	-

Tab. 1: Umsetzungsziele gemäß deutschem und europäischem Klimakonzept

Vor dem Hintergrund der zuvor bereits angesprochenen geplanten Steigerung der Elektromobilität und des damit verbundenen Strombedarfs zur Versorgung der Fahrzeuge ist die zukünftige Stromversorgung und damit die Erweiterung neuer und dem Ertüchtigen bestehender Netze ein relevanter Punkt. Die Kosten für diese Aufgabe hängen dabei nicht nur davon ab, wie effizient zukünftige Elektrofahrzeuge sind und wie weit die Netze ausgebaut werden müssen. Ein ganz wesentlicher Punkt bei diesen Betrachtungen und damit ein strategisch wichtiger Ansatz zur Senkung der Kosten für Stromproduktion und Transport ist die Steigerung der Energieeffizienz bereits heute eingesetzter stromverbrauchender Produkte, darunter auch die Beleuchtung. Volkswirtschaftlich und gesellschaftlich ist die Energiewende also ganz wesentlich davon abhängig, wie groß das umzusetzende Einsparpotential bisheriger Stromverbraucher ist.

Daher ist die derzeit erlebte Vernachlässigung des Themas Energieeffizienz in diesem Kontext nicht akzeptabel, insbesondere vor dem Hintergrund, dass in den Papieren zur Energiewende von einer deutlichen Minderung des Stromverbrauchs die Rede ist. In der Steigerung der Energieeffizienz ist ein erhebliches Stromeinsparpotential vorhanden, welches zur globalen Betrachtung einen entscheidenden Beitrag zum bezahlbaren Erfüllen

der Klimaziele liefern kann. Das Ziel, Treibhausgasemissionen um mehr als 80 % bis zum Jahr 2050 zu mindern, ist nur durch die Kombination von CO_2-armer Energieerzeugung, Transport und der Steigerung der Energieeffizienz zu erreichen.

Alle Anstrengungen in diese Richtung durch die beteiligten Player sind notwendig und zu begrüßen, z. B. auf der politischen Ebene der Entwurf einer EU-Effizienzrichtlinie, die Fortschreibung der EU-Gebäuderichtlinie EPBD, auch wenn in Details weitere Klärungen oder Korrekturen vorgenommen werden müssen oder die Ausweitung der Öko-Design-Richtlinie und ihre entsprechend untergeordneten Verordnungen.

Betrachtungen der Beleuchtung von Nichtwohngebäude in Deutschland:

Facts Allgemein:

- 40 % Endenergieverbrauch entfallen auf Gebäude
- Schlüssel zur Energieeffizienz ist der Gebäudebereich
- 33 % CO_2 Emissionen entfallen auf Gebäude
- 75 % der Gebäude sind älter als 30 Jahre und oft gar nicht oder unzureichend energetisch saniert

Facts Beleuchtung:

- 85% des vorhandenen Nichtwohngebäudebestandes besitzt keine intelligente Beleuchtung (Lichtmanagement)
- 80% der neu gebauten Nichtwohngebäude werden in Bezug auf Anordnung der Beleuchtung und Einsatz verfügbarer Beleuchtungstechnologien nicht ausreichend geplant
- 75% der Beleuchtungsanlagen in Nichtwohngebäuden sind älter als 25 Jahre und entsprechen nicht mehr dem Stand der Technik, insbesondere in energetischer Sicht

Einsparpotential der Beleuchtung in Nichtwohngebäuden (Neubau oder grundsätzliche Sanierung im Gebäudebestand):

In Tabelle 2 werden Bandbreiten von Einsparpotentialen dargestellt, die durch den Einsatz hochwertiger Leuchten, z. B. mit veredelten Spiegel- und Reflektortechniken oder professionell verwendeten LED, durch individuelle Planung von lichttechnischen Anlagen oder dem Einsatz von Lichtsteuerungskomponenten erreicht werden können. Eine Summierung der Potentiale ist nicht ohne weiteres möglich, da sich einzelne Punkte zum Teil gegenseitig beeinflussen. Dennoch wird aufgezeigt, dass bei der Kombination dieser 3 Bereiche das größte Einsparpotential erreicht wird. Zudem wird dargestellt, in welchem Umfang die einzelnen Technologien oder die Planung in der Sanierung oder dem Neubau in Nichtwohngebäuden in Deutschland bzw. Europa umgesetzt werden. Mit Blick auf das maximale Einsparpotential durch die Kombination von hochwertigen Produkten, der Planung und der Steuerung sind die Kennzahlen bezüglich der so umgesetzten Neubauten oder Sanierungen von Nichtwohngebäuden sehr enttäuschend. Trotz intensiver Aufklärungsarbeit kommt es an dieser Stelle zu einem Marktversagen. Da sich der Markt an dieser Stelle aufgrund der unterschiedlichen Interessen im Gebäudebereich zwischen Investor, Auftragnehmer für den Bau, Generalunternehmer und den Nutzer eines Gebäudes an nicht selbst regelt, ist ein Eingreifen im Sinne des Klimaschutzes unerlässlich. Auch das komplexe Gebilde des deutschen und europäischen Ausschreibungsrechts mit der Vorgabe der neutralen Ausschreibung könnte den Klimazielen entgegenstehen, wenn z. B. bestimmte Produkte in der Planung berücksichtigt wurden, mit denen energetische Zielwerte umgesetzt wurden. Um die Planungen letztendlich umzusetzen, müssten am

besten die in der Planung eingesetzten Leuchten verwendet und damit ausgeschrieben werden. Die in der Praxis häufig verwendete Methode, „vergleichbare“ Produkte auszuschreiben ist dabei leider nicht immer zielführend, da die Unterschiede trotzdem noch erheblich sein können.

Beleuchtungsanlage	Einsparpotential in Nichtwohngebäuden	Umgesetzt im Neubau oder Sanierung von Nichtwohngebäuden in Deutschland	Umgesetzt im Neubau oder Sanierung von Nichtwohngebäuden in Europa
Manuelles Ein- und Ausschalten über Schalter	0 %	> 85 %	≈ 97 %
Einsatz hochwertiger lichttechnischer Leuchten / Leuchtenmaterialien	10 %	< 50 %	< 35 %
Konkrete lichttechnische Planung von Beleuchtungsanlagen	10 – 40 %	< 15 %	< 10 %
Automatisches Dimmen mittels Tageslichtsteuerung	20 – 40 %	< 12 %	< 8 %
Automatisches Ein- und Ausschalten über Präsenzdetektion	15 – 35 %	< 12 %	< 8 %
Konstantlichtstrombetrieb von Beleuchtungsanlagen ohne weitere Steuerung	10 – 25 %	< 3 %	< 3 %
Kombination von hochwertigen Leuchten, Planung, Präsenzdetektion und Tageslichtsteuerung	40 – 80 %	< 5 %	< 3 %

Tab. 2: Einsparpotential einzelner Kriterien von Beleuchtungsanlagen und deren Umsetzungsanteil im Markt.

Unter den zuvor dargestellten Gesichtspunkten ist jeweils auch die Überarbeitung des Energieeinsparungsgesetzes (EnEG – Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden), der untergeordneten Energieeinsparverordnung (EnEV – Verordnung über energieeinsparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden) und der im Dezember 2011 erschienenen neuen Vornormenreihe DIN V 18599 (Energetische Bewertung von Gebäuden) zu betrachten.

DIN V 18599 – 4:2011-12: Energetische Bewertung von Gebäuden, Teil 4: Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung

Die gesamte Vornormenreihe DIN V 18599 wurde grundlegend überarbeitet, an die Anforderungen der aktuell geltenden Energieeinsparverordnung (EnEV 2009) angeglichen und für die nächste Stufe der EnEV vorbereitet. Für Teil 4 – Beleuchtung bedeutete dies, dass neben der Beseitigung wesentlicher Fehler in der Systematik des Berechnungsverfahrens der Ausgabe des Jahres 2007 auch Ergänzungen vorgenommen wurden. Die Fehler betrafen insbesondere die dem Berechnungsverfahren zu Grunde liegenden Leuchten. Zwar würde die Darstellung der Fehler und der Korrekturen die Hintergründe der Berechnungssystematik der DIN V 18599-4 wesentlich erläutern, allerdings würde dies an dieser Stelle zu weit führen und den Rahmen des maximal zulässigen Umfanges des Beitrags im Tagungsband der Licht 2012 deutlich sprengen. Daher beschränkt sich dieser Beitrag auf die Ergänzungen und Neuerungen, die aktuell wesentliche Auswirkungen haben können. Dabei handelt es sich zum einen um den Wunsch des Gesetzgebers, eine Verbesserung der Systembewertung zu erhalten. Aus diesem Grund wurde für die Beleuchtung eine

Bewertung mittels Aufwandszahl erarbeitet. Für diesbezügliche Informationen zu diesem Punkt sei auf den Tagungsbeitrag „Neue energetische Effizienzkennzahlen und Bewertungsverfahren für Beleuchtungssysteme in Gebäuden“ von Herrn Dr. Jan de Boer verwiesen.

Zum anderen wurden die energetische Bewertung und Berücksichtigung von LED-Technologien und Empfehlungen zur Anwendung von Technologien für die einzelnen Nutzerprofile (Raumarten) neu eingeführt.

Anpassungsfaktor k_L für unterschiedliche Lampentypen

Die Berechnungssystematik der DIN V 18599-4 erfordert für Beleuchtungsanlagen, die nicht mit stabförmigen Leuchtstofflampen mit EVG betrieben werden, einen Anpassungsfaktor für die Art der eingesetzten Lichtquelle k_L nach Tabelle 3. Das EVG wurde als Referenztechnologie festgelegt, da dimmbare EVG die Voraussetzung für tageslichtabhängige Beleuchtungskontrolle und Konstantlichtstromregelung sind, deren Bedeutung nachfolgend noch behandelt werden.

Lampenart	Faktor k_L			
	Vorschaltgerät			
	–	EVG	VVG	KVG
Glühlampen	6	–	–	–
Halogenglühlampen	5	–	–	–
Leuchtstofflampen stabförmig	–	1,0	1,14	1,24
Leuchtstofflampen kompakt, externes Vorschaltgerät	–	1,2	1,4	1,5
Leuchtstofflampen kompakt, integriertes Vorschaltgerät	–	1,6	–	–
Metallhalogendampf-Hochdruck	–	0,86	–	1
Natriumdampf-Hochdruck	–	–	–	0,8
Quecksilberdampf-Hochdruck	–	–	–	1,7
LED-Ersatzlampen (Ersatz für Glühlampen, Halogenglühlampen und Leuchtstofflampen, auch Retrofit-Produkte genannt)	–	1,5	–	–
LEDs in LED-Leuchten[a]	–	1,1	–	–
[a] Leuchten speziell für das Leuchtmittel LED konstruiert				

Tab. 3: Anpassungsfaktor k_L für unterschiedliche Leuchtmittel / Lampentypen

Für den Faktor k_L ist dabei für LED-Retrofits-Lampen ein deutlich höherer Wert (1.5) anzusetzen, als für Leuchten, in denen LED direkt integriert sind (1.1) und die damit bereits annähernd auf dem Niveau des Energiebedarfs von Leuchtstofflampen an EVG liegen. Durch die wesentlich besseren Betriebsbedingungen der direkt in Leuchten verbauten LED ist der ermittelte energetische Mehraufwand der LED-Lampen (LED-Retrofits) von etwa 36 % darstellbar. Gegenüber an EVG betriebenen Leuchtstofflampen beträgt der energetische Mehraufwand sogar 50 %. In der DIN V 18599-4 wird zudem darauf hingewiesen, dass „LED-Ersatzlampen“ aufgrund ihrer Konstruktionsweise zum Teil erheblich abweichende Lichtstärkeverteilungen gegenüber den Lampen besitzen, die sie in der Regel ersetzen sollen. Sie sind daher nicht ideal auf die Leuchtenreflektoren abgestimmt, in die sie eingesetzt werden. Dadurch können sich teilweise erhebliche Abweichungen der

Lichtstärkeverteilungen der mit Substitutionsprodukten betriebenen Leuchten gegenüber der ursprünglichen Planung bzw. Auslegung ergeben, wodurch sehr oft die Anforderungen an die Beleuchtung nach DIN EN 12464-1 und der Arbeitsstättenregel nicht mehr erreicht werden. Häufig werden in solchen Fällen durch die Substitutionsprodukte die benötigten Lichtströme für vergleichbare Beleuchtungsniveaus nicht zur Verfügung gestellt. Grundlage für die Werte bezüglich LED-Produkte ist eine im September 2011durchgeführte umfassende Marktbetrachtung. Für die aufgeführten Werte wurden bereits die abzusehenden Entwicklungsschritte der LED-Technik berücksichtigt. Festzuhalten ist an dieser Stelle jedoch auch, dass zwar eine Betrachtung quer über den LED-Markt durchgeführt wurde, es aber bereits einige speziell für LED konstruierte Leuchten gibt, die bereits heute die energetischen Kennwerte von Leuchten mit Leuchtstofflampen und EVG zum Teil deutlich unterschreiten und so zu einer weiteren Absenkung des Energiebedarfs wesentlich beitragen können.

Der Faktor k_L hat als Multiplikator in (1) direkte Auswirkung auf die elektrische Bewertungsleistung p_j einer Beleuchtungsanlage.

(1) $p_j = p_{j,lx} \cdot \bar{E}_m \cdot k_{WF} \cdot k_A \cdot k_L \cdot k_R$

Dabei ist p_j die auf die Raumgrundfläche bezogene elektrische Bewertungsleistung für die Kunstlichtbeleuchtung eines Berechnungsbereiches (in W/m^2), $p_{j,lx}$ die spezifische elektrische Bewertungsleistung in Abhängigkeit der Beleuchtungsart, $\bar{E}_m$ der Wartungswert der Beleuchtungsstärke (in lx nach DIN V 18599-10), k_{WF} der Anpassungsfaktor zur Berücksichtigung des Wartungsfaktors, k_A der Minderungsfaktor zur Berücksichtigung des Bereichs der Sehaufgabe und k_R ein Anpassungsfaktor in Abhängigkeit der Raumgröße.

Mittels Gleichung (1) lässt sich der Energiebedarf für den zu betrachtenden Berechnungsbereich $Q_{l,f,n,j}$ nach Gleichung (2) ermitteln. Auch ohne weitere Formelinhalte zu erläutern wird deutlich, dass p_j und damit auch k_L einen direkten Einfluss auf den Energieverbrauch einer Beleuchtungsanlage besitzen.

(2) $Q_{l,f,n,j} = p_j \cdot [A_{TL,j} \cdot (t_{eff,Tag,TL,j} + t_{eff,Nacht,j}) + A_{KTL,j} \cdot (t_{eff,Tag,KTL,j} + t_{eff,Nacht,j})]$

So wird deutlich, dass die Wahl der verwendeten Leuchtmittelart einen direkten und ganz wesentlichen Einfluss auf den energetischen Bedarf der Beleuchtungsanlage besitzt.

Empfehlungen für die lichttechnische Ausstattung unterschiedlicher Nutzungsarten (Raumarten)

Als Referenztechnologien sind gemäß der aktuellen EnEV 2009 für einige Nutzungsarten zwar bereits die Konstantlichtstromkontrolle bzw. die Präsenzmeldung vorgesehen, jedoch könnte der mögliche Hebel für den Klimaschutz durch verstärkten Einsatz von Lichtmanagementsystemen und guten Produkten deutlich erhöht werden (s. Tabelle 2). Aus diesem Grund wurden die 42 Nutzungsarten nach DIN V 18599 bezüglich der typischerweise verwendeten Beleuchtungsarten und Technologien durch ein Expertenteam analysiert. Aus den Erkenntnissen wurde eine Tabelle mit möglichen einsetzbaren Technologien für die jeweiligen Anwendungen abgeleitet, wie sie auszugsweise in Tabelle 4 zu sehen sind. Diese vollständige Tabelle wurde in DIN V 18599-4 mit dem Ziel integriert, dass dem Anwender eine Unterstützung bezüglich einzusetzender Technologien geboten werden sollte und dem Verordnungsgeber möglicherweise als Grundlage zur Festlegung der Referenztechnologien für Beleuchtung in der EnEV 2013 dienen kann.

Nutzungs-art	Nutzungsprofil Nichtwohngebäude	Beleuchtungs-art	Sonnen- und oder Blendschutz	Lichtmanagement		
				Konstant-lichtstrom-kontrolle	Präsenz-melder	Tageslicht-abhängige Kontrolle
1	Einzelbüro	direkt / indirekt	lichtlenk. Systeme[a]	(X)[b]	X	X
2	Gruppenbüro (2 bis 6 Arbeitsplätze)	direkt / indirekt	lichtlenk. Systeme[a]	(X)[b]	X	X
3	Großraumbüro (ab 7 Arbeitsplätze)	direkt / indirekt	lichtlenk. Systeme[a]	(X)[b]		X
4	Besprechung, Sitzung, Seminar	direkt / indirekt	lichtlenk. Systeme[a]	(X)[b]	X	X
5	Schalterhalle	Direkt		X		

Tab. 4: Empfehlungen für lichttechnische Ausstattung unterschiedlicher Nutzungs-/Raumarten, Auszug aus der Tabelle A.5 der DIN V 18599-4 (insgesamt 42 Nutzungsarten).

Es ist davon auszugehen, dass bei der Verwendung von Systemen der „Tageslichtabhängigen Kontrolle“ die Konstantlichtstromkontrolle bereits in den Systemen der Anbieter enthalten ist. In dem Berechnungsverfahren der DIN V 18599-4 ist sie jedoch separat zu berücksichtigen.

Energieeinsparverordnung EnEV 2013

Zum Redaktionsschluss dieses Beitrages stand ein öffentliches Diskussionspapier nicht zur Verfügung. Aus diesem Grund erfolgen an dieser Stelle keine weiteren Informationen zur nächsten Version der EnEV. Derzeit kann davon ausgegangen werden, dass bis zur Licht 2012 ein entsprechendes Papier zur Verfügung steht. Die Inhalte werden dann im Vortrag enthalten sein.

Fazit

Die Beleuchtung in Nichtwohngebäuden bietet ein erhebliches energetisches Einsparpotential. Dies trifft natürlich insbesondere auf den Sanierungsfall zu, jedoch werden auch in Neubauten oder umfangreichen Sanierungen nicht alle technischen Möglichkeiten genutzt. Um die entsprechenden Klimaziele zu erreichen, ist der Einsatz aller unter dem Gebot der Wirtschaftlichkeit stehenden sinnvollen Technologien notwendig. Dies ist bei der Beleuchtung gewährleistet. Es ist nun an der Zeit, diese Erkenntnisse nicht nur in entsprechenden gesetzlichen Vorgaben sondern insbesondere auch in der Praxis umzusetzen. Dazu sind alle in der Branche der Beleuchtung befindlichen Beteiligten aufgerufen – und zwar global. Schließlich brauchen wir die Welt, aber die Welt nicht uns.

Literatur

- Energieeinsparverordnung EnEV 2009
- Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, BMWi, BMU, 2010
- Energieeffizienzplan 2011, KOM(2011) 109, EU-Kommission
- Vornormenreihe DIN V 18599:2011-12: Energetische Bewertung von Gebäuden
- McKinsey) Studie: Impact of the financial crisis on carbon economics: Version 2.1 of the global greenhouse gas abatement cost curve, August 2010)
- TRILUX – Beleuchtungspraxis Innenbeleuchtung, 2007
- TRILUX – Beleuchtungspraxis Online, www.trilux-beleuchtungspraxis.de, 2011
- „Fachtagung EU-Energieeffizienzrichtlinie - Beitrag der Beleuchtung zum Erreichen der Klimaziele“, Jörg Minnerup, 10.2011, Vertretung der EU-Kommission in Deutschland, Berlin
- Diverse Dokumente von CELMA und ZVEI (Untersuchungen, Marktzahlen etc.)

Energieeffizienz von lichttechnischen Anlagen und Produkte - Die europäischen Mandate M/480 und M/485

Sohéil Moghtader; DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Normenausschuss Lichttechnik (FNL), Berlin, Deutschland, http://www.din.de, E-Mail: soheil.moghtader@din.de

Dieter Schornick; ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V., Frankfurt, Deutschland, http://www.zvei.org, E-Mail: schornick@zvei.org

Zusammenfassung

Dieser Beitrag beschreibt einleitend den Grundgedanken der Neuen Konzeption (en: New Approach bzw. dessen Modernisierung aus dem Jahr 2008, dem New Legislative Framework/NLF) in Europäischen Richtlinien und die Bedeutung mandatierter Normen, die seit ihrer Einführung bereits auf 4400 Normen Anwendung gefunden haben. Im Bereich der Lichttechnik wurde dies z. B. bei der Entwicklung von *EN 15193, Energetische Bewertung von Gebäuden - Energetische Anforderungen an die Beleuchtung*, eingesetzt. Aufbauend auf diesen Erfahrungen sollen die Mandate M/480und M/485 auf eine Reihe von Europäischen Normen aus dem Bereich der Lichttechnik Anwendung finden, über die dieser Beitrag berichtet. Dem interessierten Fachpublikum wird ein Überblick über den aktuellen Stand der Arbeiten gegeben, die für die Entwicklung und Planung lichttechnischer Produkte eine wichtige Rolle spielt. Abschließend wird ein Ausblick auf weitere in Vorbereitung befindliche Mandate gegeben.

1. Einleitung

Seit Mitte der 1980er Jahre greift die Europäische Union zunehmend auf Normen zurück, indem für die Konkretisierung politischer Rahmenbedingungen auf Europäische Normen verwiesen wird (Neues Konzept, en: New Approach). Durch die europaweite Gültigkeit dieser Normen soll die technische Harmonisierung gefördert und Handelshemmnisse abgebaut werden. Die im Rahmen des Neuen Konzepts verwendete Normen (Harmonisierte Normen) müssen zwei Voraussetzungen erfüllen: Zum einen muss seitens der Europäischen Kommission ein Normungsauftrag ("Mandat") vorliegen und zum anderen muss die Norm im EG-Amtsblatt bekannt gegeben werden. Als Beispiel kann DIN EN 1837/A1:2009-12, *Sicherheit von Maschinen – Maschinenintegrierte Beleuchtung; Deutsche Fassung EN 1837:1999+A1:2009* genannt werden, die die lichttechnischen Anforderungen der EG-Maschinenrichtlinie 98/37/EG (gültig bis 28. Dezember 2009) und der neuen EG-Maschinenrichtlinie 2006/42/EG (ab 29. Dezember 2009) konkretisiert.
Bereits seit 2007 wurde das Ziel gesetzt, Europa zu einer Volkswirtschaft mit hoher Energieeffizienz und geringen Treibhausgasemissionen umzugestalten. Bis zum Jahr 2020 wird angestrebt, sowohl die Kohlendioxidemission als auch den Primärenergieverbrauch um 20% zu reduzieren.

2. Normungsmandat M/480

Mit dem Normungsmandat M/480, *Development of standards in the field of Energy Performance of Buildings*, hat die EU-Kommission die europäischen Normungsinstitute CEN und CENELEC beauftragt, Berechnungsmethoden der integrierten Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden festzulegen und die Energieeffizienz von Gebäuden zu fördern. Damit soll die Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden vom 19. Mai 2010 umgesetzt werden und die EU-Mitgliedstaaten verpflichtet werden, Maßnahmen im Sinne einer rationellen Energieanwendung zu treffen. Für Gebäude werden eine Steigerung der Energieeffizienz und die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energiequellen vorgeschrieben.

Die Gesamtkoordination des Mandats erfolgt über das CEN/TC 371 "EPBD Chairman Advisory Panel (CAP)". Zur Überwachung und Begleitung der Normungsaktivitäten hat die EU-Kommission ein Liaison Committee etabliert, das aus Vertretern der EU-Mitgliedstaaten besteht. In regelmäßigen Abstimmungsgesprächen wird über den Stand der Normungsaktivitäten berichtet. Für die normungstechnische Umsetzung soll eine übergreifende Norm zur integrierten Gesamtenergieeffizienz erarbeitet werden, die Hauptelemente der *DIN EN 15603, Energieeffizienz von Gebäuden – Gesamtenergiebedarf und Festlegung der Energiekennwerte* verwendet.

Im Bereich der Lichttechnik erfolgt die Umsetzung durch die Überarbeitung von DIN EN 15193 "Energetische Bewertung von Gebäuden – Energetische Anforderungen an die Beleuchtung", die federführend von den Experten der CENTC 169/ WG 9 "Energy Performance of Buildings" beginnend ab Ende 2012 erarbeitet wird. Die Spiegelung der Arbeiten erfolgt in Deutschland durch den Arbeitsausschuss NA 058-00-20 AA "Energetische Bewertung der Lichttechnik in Gebäuden" im Normenausschuss Lichttechnik (FNL) im DIN.

3. Normungsmandat M/485

Am 6. Juli 2005 hat die Europäische Kommission die Richtlinie 2005/32/EG veröffentlicht. Ihr Titel lautet: "Richtlinie zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energiebetriebener Produkte und zur Änderung der Richtlinie 92/42/EWG des Rates sowie der Richtlinien 96/57/EG und 2000/55/EG des Europäischen Parlaments und des Rates“: Ihre Durchführung regelt unter anderem die EU-Verordnung 245/2009. Sie umfasst Festlegungen und Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Leuchtstofflampen ohne eingebautes Vorschaltgerät, an Hochdruckentladungslampen sowie Vorschaltgeräte und Leuchten zu deren Betrieb. Zur Ergänzung der Richtlinie 2005/32/EG und der Verordnung 245/2009 hat die Europäische Kommission CEN und CENELEC das Normungsmandat M/485 erteilt.

Einen Entwurf für das Arbeitsprogramm wurde der Europäischen Kommission Ende 2011 übergeben. Er listet alle europäischen und internationalen Normen, sowie CIE-Publikationen auf, die in den Geltungsbereich der Verordnung 245/2009 fallen. Es ist geplant, eine übergeordnete Europäische Norm zu erstellen, in der auf diese verwiesen wird.

Zusätzlich hat das Technische Komitee CEN/TC 169 "Licht und Beleuchtung" beschlossen, zwei Forschungsprojekte zu beantragen, um fundierte Erkenntnisse aus der Praxis zur Ermittlung des Leuchtenwartungsfaktors (Luminaire Maintenance Factor, LMF) für die Innen- und Außenbeleuchtung sowie zum Utilisation Factor (UF) für die Straßenbeleuchtung in einem umfangreichen zweijährigen Feldversuch zu gewinnen. Die Ergebnisse sollen in die Europäischen Normen einfließen. Zur Beschreibung der beiden Forschungsprojekte wurden zwei Unterarbeitsgruppen gegründet.

Die Gesamtkoordination zur Bearbeitung des Mandats M/485 erfolgt in der Ende 2011 gegründeten CEN/TC 169/WG 14 "ErP Lighting Mandate Management Group". Sie setzt sich zusammen aus Experten von CEN/TC 169 und CENELEC TC 34 Z "Luminaires and associated equipment". Da die elektrotechnische Normung unter der Federführung der IEC erfolgt und IEC-Normen ohne Änderung von CENELEC übernommen werden, erfolgt hier eine Abstimmung mit dem IEC TC 34 »Lamps and related equipment«.

4. Künftige Normungsmandate

4.1 Normungsmandat M/495

Am 27.07.2011 hat die EU-Kommission an CEN/CENELEC ein horizontales Normungsmandat zur Erarbeitung von harmonisierten Normen unter der Ecodesign-

Richtlinie 2009/125/EU und deren Umsetzungsverordnungen erteilt. Für den Bereich der Beleuchtung betrifft dies die Verordnung 244/2009 zur Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Haushaltslampen mit ungebündeltem Licht sowie die kommende Verordnung zu gerichteten Lichtquellen und Wohnraumleuchten.

Das Normungsmandat beinhaltet ebenfalls die Erarbeitung von harmonisierten Normen, die in Ergänzung der in der Überarbeitung befindlichen Richtlinie 2010/30/EU zur Energieeffizienzkennzeichnung von Produkten notwendig sind. Die bisherige Richtlinie 98/11/EG zur Durchführung der Richtlinie 92/75/EWG des Rates betreffend die Energieetikettierung für Haushaltslampen wird dann zurückgezogen und die neue Richtlinie auf alle Lichtquellen (einschließlich der technischen) erweitert!

Anfang 2012 fand ein erstes Abstimmungsgespräch der betroffenen europäischen Komitees bei CEN/CENELEC zur Erarbeitung des sehr umfangreichen Arbeitsprogramms statt, das neben der Beleuchtung viele weitere energieverbrauchende Produkte beinhaltet. Bis Herbst 2012 soll das Arbeitsprogramm der EU-Kommission vorgestellt werden.

CEN/TC 169/WG 14 wird einen Arbeitsprogrammentwurf in den nächsten Wochen erstellen. Dabei sind die bisherigen Aktivitäten zum Mandat 485 und dem kommenden SSL-Mandat (Solid State Lighting), speziell bei LED-Produkten, zu berücksichtigen.

4.2 SSL-Normungsmandat

Am 15.12.2011 hat die Europäische Kommission unter KOM(2011) 889 das GRÜNBUCH "Die Zukunft der Beleuchtung - Beschleunigung des Einsatzes innovativer Beleuchtungstechnologien" veröffentlicht.
Vorausgegangen waren intensive Gespräche zwischen CELMA, dem europäischen Dachverband der Hersteller von Leuchten und Leuchtenkomponenten sowie ELC, dem europäischen Verband der Lampenhersteller und der Europäischen Kommission. Die Europäische Kommission ist bereit, die europäische Beleuchtungsindustrie im globalen Wettbewerb zu unterstützen, damit diese sich mit der schnell entwickelnden Technologie von "Solid State Lighting (SSL)-Produkten" und dem globalen Wettbewerb Schritt halten kann.

Das von der Europäischen Kommission vorgesehene Normungsmandat soll alle notwendigen Normen zu SSL umfassen. Dazu gab es bereits zwei Treffen zwischen Vertretern der Europäischen Kommission sowie CEN und CENELEC. CEN/TC 169/WG 14 wird in den nächsten Monaten zusammen mit den Normungsexperten von CENELEC und IEC ein Arbeitsprogramm erstellen.

Neue energetische Effizienzkennzahlen und Bewertungsverfahren für Beleuchtungssysteme in Gebäuden

Dr.-Ing. Jan de Boer; Fraunhofer-Institut für Bauphysik; Nobelstraße 12; 70569 Stuttgart.

Dr.-Ing. Sirri Aydinli, Dipl.-Ing. Stefan Gramm, Prof. Dr. Heinrich Kaase; Technische Universität Berlin; Einsteinufer 19; 10587 Berlin.

Dipl.-Ing. Roman Jakobiak; daylighting.de UG; Helmholtzstraße 13-14; 10587 Berlin.

1 Einleitung

Ziel der Arbeiten, die im Rahmen eines Verbundprojektes /2/ durchgeführt wurden, war die Beantwortung offener Fragestellungen zur Bewertung der Energieeffizienz von Beleuchtungsanlagen in Nichtwohngebäuden. Zur Erreichung der Zielstellung wurden empirisch, messtechnisch und in Parameterstudien ermittelte Zusammenhänge in einfache Bewertungsmodelle und Kennzahlen übertragen. So wurden Kennwerte von Beleuchtungsanlagen (Wartung, Kontrollverhalten) messtechnisch bestimmt. Ein neuer Ansatz zur zukünftig besseren Berücksichtigung von Tageslicht im Referenzgebäudeverfahren der EnEV wurde erarbeitet. Für neue Beleuchtungssystemkomponenten wie innovative Dachoberlichter und LEDs wurden energetische Bewertungsansätze entwickelt. Ergänzend soll mit dem in dem Projekt neu entwickelten Konzept der Aufwandszahlen die Transparenz der Energieflüsse in Beleuchtungsanlagen erhöht werden. Die einzelnen Projektergebnisse werden im Folgenden dargestellt.

2 Wartung von Beleuchtungsanlagen

Der Wartungsfaktor von Beleuchtungsanlagen hat wesentlichen Einfluss auf die Berechnung des Energiebedarfs künstlicher Beleuchtungsanlagen: je kleiner der Wartungsfaktor, desto größer ist der Energiebedarf. Bei nicht gedimmten Beleuchtungsanlagen beeinflusst der Wartungsfaktor den Energiebedarf direkt proportional. Die Berechnungen mit einer selbst entwickelten Software „MatiCal MF 1.0“ ergaben, dass bei gedimmten Beleuchtungsanlagen der Einfluss des Wartungsfaktors auf den Energiebedarf wegen der Dimmcharakteristik der Leuchtstofflampen deutlich höher als erwartet ist.

Erfahrungswerte für Wartungsfaktoren von Beleuchtungsanlagen liegen erheblich höher und damit günstiger als die Werte, die nach CIE Technical Report Nr. 97-2005 mit einem aufwändigen Verfahren ermittelt werden. Die in diesem Vorhaben durchgeführten Analysen und Felduntersuchungen belegen diese Aussagen.

Eine Vereinfachung des Verfahrens ist möglich, indem konstante Werte nach einer festgelegten Wartungsperiode zugrunde gelegt werden. Dabei wird für den Lampenausfall der Wert 1 und für die Lichtstromabnahme der Lampen durch Alterung (z. B. für stabförmige Leuchtstofflampen) ein Wert von 0,90 festgelegt. Für saubere Räume, wie Büroräume mit einer Wartungsperiode von 3 Jahren, kann auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen für die Teilfaktoren LMF und RSMF zusammen ein Wert von 0,90 angesetzt werden. Daraus ergibt sich ein Wartungsfaktor von 0,80. In Räumen mit starker Verschmutzung zeigte sich, dass für den Wartungsfaktor ein Wert von 0,67 eingesetzt werden kann. Die in der DIN V 18599-4 und EnEV 2009 bisher empirisch angenommen Werte konnten damit im Wesentlichen verifiziert werden.

3 Wartungswertgeführte Konstantlichtregelung

Bei einer Konstantlichtregelung ist aufgrund der Dimmcharakteristik von Leuchtstofflampen die Senkung des Energiebedarfs einer künstlichen Beleuchtung mit einem hohen Wartungsfaktor deutlich größer als bei einer Beleuchtungsanlage mit niedrigem Wartungsfaktor. Daher ist für einige Nutzungsarten, wie z. B. für öffentliche Parkhäuser, eine Beleuchtung mit einem hohen Wartungsfaktor und mit Konstantlichtregelung zu empfehlen.

Eine von der TU Berlin unter Fachleuten aus der Industrie durchgeführte Umfrage ergab, dass Anlagen mit wartungswertgeführter Konstantlichtregelung in der Praxis zwar angeboten werden, jedoch liegt der Anteil in den zur Zeit eingesetzten Beleuchtungsanlagen unter 3 %. Daher wurde das Teilprojekt mit Einverständnis des Projektträgers erweitert. Es wurde somit nicht nur die „wartungswertgeführte Konstantlichtregelung“, sondern auch die „tageslichtabhängig geregelte bzw. gesteuerte Beleuchtung“ untersucht, die bei entsprechender Tageslichtversorgung größere Energieeinsparpotentiale aufweist. Die tageslichtabhängig geregelte Beleuchtung enthält nahezu die gleiche Kontrollelektronik und ist damit zugleich auch als Konstantlichtregelung geeignet. Für unterschiedliche Nutzungsarten wurden basierend auf den durchgeführten Untersuchungen angepasste technische Ausstattungen empfohlen.

4 Referenzgröße Tageslicht

Das Referenzgebäudeverfahren der EnEV 2009 honoriert die bauliche Optimierung der mit Tageslicht versorgten Flächen in einem Gebäude gegenwärtig nicht, da das Referenzgebäude diese Fläche vom nachzuweisenden Gebäude übernimmt. Zum Verhältnis des Referenzgebäudes zum nachzuweisenden Gebäude siehe Abb. 1. Durch eine „Referenzgröße Tageslicht“ kann sich die Tageslichtversorgung im nachzuweisende Gebäude von dem Referenzgebäude abheben.

	nachzuweisendes Gebäude	Referenzgebäude
Geometrie	Geometrie des nachzuweisenden Gebäudes	
Bauteileigenschaften und Rechengrößen	Projektgrößen gem. DIN V 18599 bzw. EnEV	nach EnEV Anhang 2 Tabelle 1, bzw. wie nachzuweisendes Gebäude
Randbedingungen	identische Randbedingungen nach DIN V 18599 und EnEV 2009	

Abb. 1: Schematische Gegenüberstellung der Eigenschaften des nachzuweisenden Gebäudes und des Referenzgebäudes der EnEV 2009.

Für die Referenzgröße Tageslicht wurde vorgeschlagen, die mit Tageslicht versorgte Fläche der Zone $A_{TL,i}$ sowie im Falle einer vertikalen Fassade den Rohbau Tageslichtquotienten $D_{Rb,i}$ bzw. im Falle einer Tageslichtbeleuchtung durch Oberlichter den mittleren Tageslichtquotienten $\overline{D_m}$ für die Bilanzierung des Energiebedarfs der Beleuchtung im Referenzgebäude abhängig vom Nutzungsprofil der Zone festzusetzen, anstatt diese Größen aufgrund von Projektgrößen des realen Gebäudes zu bestimmen. Die Referenzgröße Tages-

licht wurde für 14 von 33 Nutzungsprofilen der DIN V 18599-10:2007, in denen die Nutzung des Tageslichtes den Stand der Technik darstellt, vorgeschlagen.

Die Evaluierung zeigte, dass der durch die Referenzgröße Tageslicht referenzierte Rohbau Tageslichtquotient von 5 % in den betrachteten Fällen mit der aus DIN 5034-1 abgeleiteten Mindestfenstergröße generell erreicht oder überschritten wurde, wenn das Fenster unverbaut war. Auch der Anteil der tageslichtversorgten Fläche der Referenzgröße Tageslicht wurde außer in Fällen defizitärer Tageslichtbeleuchtung generell erreicht. Der Energiebedarf der Beleuchtung im realen Gebäude bewegte sich in den untersuchten Fällen zwischen 86 % und 119 % des Energiebedarfs im Referenzgebäude mit Referenzgröße Tageslicht.

Damit das Anforderungsniveau der EnEV bei guter Tageslichtversorgung gegenüber der EnEV 2009 konstant bleibt, wurde vorgeschlagen, gemeinsam mit der Referenzgröße Tageslicht das tageslichtabhängige Kontrollsystem "tageslichtabhängig aus" gem. DIN V 18599-4:2007 für diejenigen Nutzungsprofile, für die eine Referenzgröße Tageslicht definiert ist, als Referenztechnik einzuführen.

5 Innovative Dachoberlichter

Bisher wurde für konventionelle Dachoberlichtsysteme ohne Sonnenschutzfunktion in der DIN V 18599-4 eine gesamte jährliche relative Nutzbelichtung ermittelt und zur Bewertung des Einflusses der Tageslichtversorgung auf den Endenergiebedarf für Beleuchtung herangezogen. Das Modell wurde strukturell dahingehend erweitert, dass nun getrennt die Einflüsse mit nicht aktiviertem und aktiviertem Sonnenschutz analysiert und optimiert werden können. Hierzu wurde die relative Nutzbelichtung differenziert in eine relative Nutzbelichtung bei Sonnenschutz nicht aktiviert und eine relative Nutzbelichtung bei Sonnenschutz aktiviert (Abb.2).

Unterschiedliche Lösungen am Markt befindlicher Dachoberlichtlösungen wurden systematisiert. Hierbei wird nach den Kriterien „in sich verstellbar: Ja / Nein“ und „verfahrbar: Ja / Nein“ kategorisiert. Für diese Systeme wurden jeweils Bewertungsansätze mit Bewertungsparametern zur Bestimmung der differenzierten relativen Nutzbelichtungen erarbeitet. Das entwickelte Verfahren wurde anhand von Beispielen illustriert.

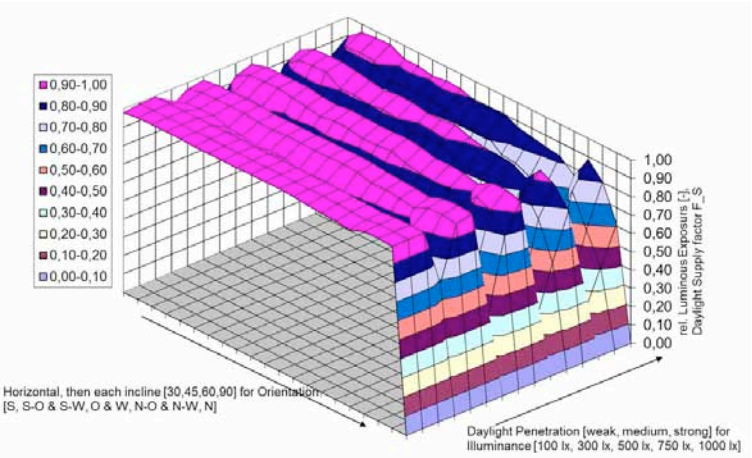
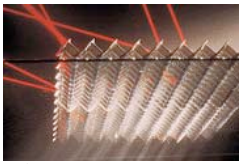
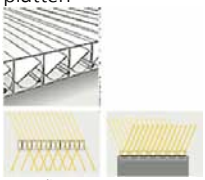


Abb. 2: Relative Nutzbelichtungen $H_{N,rel,SA}$ in Abhängigkeit der Einstufung der Tageslichtversorgung und des Wartungswertes der Beleuchtungsstärke $\overline{E}_m$ für unterschiedlich orientierte und geneigte Fassaden.

		in sich verstellbar	
		Nein	Ja
verfahrbar	Nein	Statische Verglasungen wie konventionelle Dachoberlichter © evonik Lichtlenkgläser wie miniaturisierte Sonnenschutzraster  © siteco	Drehbare Lamellen in Stegmehrfachplatten  © everlite
	Ja	Verfahrbarer textiler Sonnenschutz 	Konventionelle Lamellensysteme © fvlr © velux

Tab. 1: Systematisierung von Dachoberlichtlösungen nach „verfahrbar“ und „in sich verstellbar“ inklusive Nennung und Darstellung beispielhafter Systemlösungen.

6 Aufwandszahlen und Mindestanforderungen an Beleuchtungsanlagen

Das Konzept der Aufwandszahlen, bisher im Bereich der Gebäudetechnik z. B. im Gewerk Heizung eingeführt, wurde nun auf die Bewertung der Innenraumbeleuchtung übertragen /1/, /4/. Somit wird zukünftig auch in der Beleuchtungstechnik eine Differenzierung nach Nutz- und Endenergie ermöglicht. Die Effizienz der Beleuchtungstechnik kann objektbezogen über die Aufwandszahl ausgewiesen werden.

Unter Nutzenergie wird generell die Energie verstanden, die der Verbraucher in der gewünschten Form aus einem Gerät bezieht (Antrieb, Wärme, Licht, etc.). Für die Beleuchtung gilt somit: *„Die Nutzenergie für die Beleuchtung $Q_{l,Nutz}$ ist das energetische Äquivalent des zur künstlichen Beleuchtung des Raumes auf der Grundlage von festgelegten beleuchtungstechnischen Anforderungen benötigten Lichtstroms gewichtet mit der effektiven Betriebszeit bei idealem Lichtmanagement (ideale Ausnutzung der Potentiale Abwesenheit, Tageslicht und Kompensation der Überdimensionierung aufgrund zu berücksichtigender Wartung der künstlichen Beleuchtungsanlage).“*

Abb. 3 stellt die Einflüsse auf die Nutzenergie für Beleuchtungszwecke $Q_{l,Nutz}$ dar. Diese umfasst alle Einflüsse, die nicht der Effizienz der Beleuchtungstechnik zuzurechnen sind:

- Nutzung:
  - Anforderungen an die Sehaufgabe: Räume mit hohen Anforderungen an die Sehaufgabe weisen im allgemeinen höhere Wartungswerte der Beleuchtungsstärke und höhere Anforderungen an die Leuchtdichteverteilungen im Raum auf und haben damit höhere Werte $Q_{l,Nutz}$ als Räume mit geringeren Anforderungen. Die Nutzenergie ist damit abhängig von den Anforderungen an die Sehaufgaben, die z.B. in der DIN EN 12464-1 formuliert sind.
  - Nutzungszeiten: Räume mit hohen Nutzungszeiten weisen im allgemeinen auf Grund der höheren effektiven Betriebszeit der Beleuchtungsanlage höhere Werte $Q_{l,Nutz}$ auf als Räume mit geringen Nutzungszeiten.
  - Relative Abwesenheit: Eine hohe relative Abwesenheit (d. h. die Nichtbelegung eines Raumes) wirkt sich senkend auf $Q_{l,Nutz}$ aus.
  - Wartung von Beleuchtungsanlagen: Räume mit hohen Wartungsfaktoren erfordern eine geringere Überdimensionierung der Neuinstallation von Beleuchtungsanlagen und resultieren damit in einer geringeren Nutzenergie $Q_{l,Nutz}$.
- Raumgeometrie: Kleine kompakte Räume erfordern aufgrund relativ höherer Lichtabsorption an den Raumumschließungsflächen höhere Lichtströme und weisen damit höhere Werte $Q_{l,Nutz}$ auf als große, weite Räume.
- Reflexionsgrade der Raumumschließungsflächen: Dunkle Räume erfordern höhere Lichtströme, um Anforderungen an die Beleuchtungsverhältnisse im Raum zu erfüllen und weisen damit höhere Werte $Q_{l,Nutz}$ auf als Räume mit hellen Raumumschließungsflächen.
- Fassadengeometrie und –photometrie, Lage, Klima: Räume mit geringer Tageslichtversorgung bedingen höhere effektive Betriebszeiten und weisen damit höhere Werte $Q_{l,Nutz}$ auf als Räume mit guter Tageslichtversorgung.

Die Endenergie für Beleuchtung $Q_{l,End}$ entspricht dann dem zur Deckung des Nutzenergiebedarfs für Beleuchtung rechnerisch aufgewendeten Bedarf am Energieträger, in der Regel Strom.

Die Aufwandszahl für Beleuchtungszwecke setzt sich aus Teilaufwandszahlen für die beleuchtungstechnischen Systeme zusammen. Dies umfasst, wie in Abb. 4 dargestellt, zum einen die Beleuchtungskontrolle in Abhängigkeit der Präsenz und der Tageslichtverhält-

nisse sowie zum anderen das künstliche Beleuchtungssystem. Letzteres lässt sich wiederum in die Teilaufwandszahlen für die Lichterzeugung, -verteilung und -übergabe separieren. Da Licht nicht pauschal energetisch zu bewerten ist, war die Festlegung einer Referenzbeleuchtung erforderlich. Diese fußt auf einer Referenzlichtausbeute von 140 lm/W und einer Referenzlichtstärkeverteilung (LVK) des Typs A50. Die Referenzlichtaubeute entspricht der erwarteten zukünftigen Lichtausbeute von Weißlicht-LEDs mit. Die LVK des Typs A50 entspricht einer direkt strahlenden, energieeffizienten Beleuchtung, welche den Anforderungen der überarbeiteten DIN EN 12464 „Beleuchtung von Arbeitsstätten, Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen bei üblichen Raumsituationen“ genügt. Sämtliche Aufwandszahlen lassen sich unmittelbar aus den vorliegenden Verfahrensparametern des Teils 4 der DIN V 18599 ermitteln.

Teilaufwandszahlen für übliche künstliche Beleuchtungssysteme im Bürobereich variieren zwischen ca. 1,8 für effiziente Neuinstallationen und Werten von oft größer 5 für Altanlagen. Werden Neuinstallationen mit entsprechenden Lichtmanagementsystemen ausgestattet, ergeben sich Gesamtaufwandszahlen von ca. 2,5; bei rein manuellen Betrieb der Beleuchtungsanlage von ca. 5. Für Altanlagen, die zumeist nicht mit Lichtmanagementkomponenten ausgestattet sind, können sich durchaus Gesamtaufwandszahlen größer 10 einstellen (über 4-mal energetisch ineffizienter als zeitgemäße Neuinstallationen).

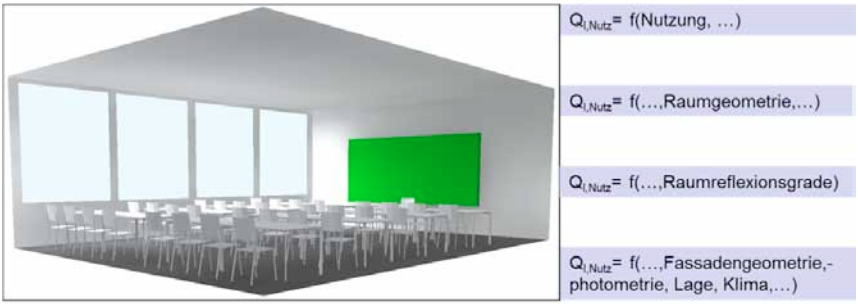


Abb. 3: Darstellung der Einflüsse auf die Nutzenergie für Beleuchtung.

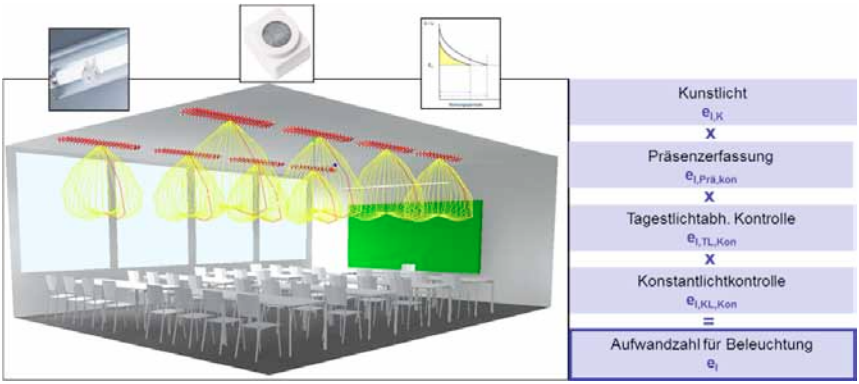


Abb. 4: Darstellung der Ermittlung der Aufwandszahl für Beleuchtung e_l aus den Teilaufwandszahlen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Arbeitsergebnisse sind konform zur Normenstruktur der DIN V 18599 und EN 15193 und konnten bereits in der aktuellen Überarbeitung der DIN V 18599 – 4 und in den Beratungen zur EnEV 2012 berücksichtigt werden. Weitere Ergebnisse können einfließen in die zukünftige Überarbeitung der genannten Normen und auch in ein zurzeit in der Erarbeitung befindliches Normpapier auf ISO Ebene (TC 163, SC2, WG 14, „Daylighting in Buildings“).

8 Referenzen

/1/
de Boer, J.; Aydinli, S.; Cornelius, W.; Jakobiak, R.; Minnerup, J.; Schornick, D.; Wershoven, R.:
Neue Effizienzkennzahlen für Beleuchtungssysteme in Gebäuden. Bauphysik Nr. 4, August 2011, S. 207–224.

/2/
de Boer, J.; Kaase, H.; Aydinli, S.; Jakobiak, R.:
Weiterentwicklung von Verfahren für die Bewertung der Energieeffizienz von Beleuchtungsanlagen im Rahmen der EnEV Methode einschließlich der Festlegung von Mindestanforderungen. IBP-Bericht WB 160/2012.

Energieeffiziente Beleuchtung in Shops

Günther Sejkora[1], Arno Grabher-Meyer[2], Siegfried Luger[2], Christof Amann[3]

[1] *item Sejkora e.U., Dr. Anton Schneider Straße 2 T6, A-6850 Dornbirn, www.items-innovation.at*

[2] *Luger Research e.U., Moosmahdstraße 30, A-6850 Dornbirn, www.lugerresearch.com*

[3] *e7 Energie Markt Analyse GmbH, Theresianumgasse 7, A-1040 Wien, www.e-sieben.at*

1 Problemstellung

Im Einzelhandel spielt die Beleuchtung für den Geschäftserfolg eine zentrale Rolle, wobei in der Praxis die Grundannahme für die Beleuchtungsplanung häufig lautet: Je heller desto mehr Umsatz. Zudem sind die Investitionskosten nach wie vor einer der Hauptaspekte bei der Auswahl des Beleuchtungssystems. So ist es nicht verwunderlich, dass Shopbetreiber und Beleuchtungsplaner auf konventionelle Standardlösungen zurückgreifen und dass dabei die Beleuchtung oft stark überdimensioniert wird. Das führt zu hohen laufenden Ausgaben für den Energieverbrauch der Beleuchtung und dieser Zugang ist zudem mit dem unangenehmen Nebeneffekt eines erhöhten Kühlbedarfs verbunden, was die Kosten und den Energieverbrauch weiter in die Höhe treibt. Die Energiekosten betragen je nach Branche 0,7 bis 1% des Geschäftsumsatzes. Da die Margen üblicherweise beim Handel im einstelligen %-Bereich liegen, können diese Kosten keinesfalls vernachlässigt werden.

Innovative Lösungen (Konzepte, Leuchten und Leuchtmittel) für eine energieeffiziente und zugleich qualitativ hochwertige Beleuchtung sind jedoch am Markt verfügbar bzw. stehen kurz vor der breiten Markteinführung (z.B. LED). Die Umsetzung von neuen und innovativen Lösungen ist jedoch immer mit einem gewissen Risiko behaftet und stößt daher bei vielen Shopbetreibern auf Skepsis. Wichtig ist daher, auf die spezifischen Anforderungen der jeweiligen Unternehmen zu achten. Das betrifft neben wirtschaftlichen Erfordernissen (Lebenszykluskosten) auch Fragen der Beleuchtungsqualität und der langfristigen Betriebssicherheit. Ausgangspunkt jeder Beleuchtungsplanung ist jedoch in allen Fällen die erforderliche Qualität der Beleuchtung.

In den letzten Jahren sind von einigen Handelsketten Demonstrationsanlagen (z.B. LED-Shops) errichtet worden, diese Anlagen haben aber über weite Strecken Pilotcharakter. Die betroffenen Unternehmen können wertvolle Praxiserfahrungen mit neuen Technologien sammeln und nützen diese Shops auch für ihre Imagebildung. Für eine breite Markteinführung sind aber einige Hürden zu überwinden:

- Beleuchtungskonzepte lassen sich nicht einfach von einem Unternehmen auf andere übertragen.
- Innovative Konzepte müssen quasi nahtlos an bestehende Beleuchtungskonzepte anschließen, die sich als integrierter Teil der jeweiligen Shopkonzepte nicht von heute auf morgen ändern dürfen.
- Zur Reduktion der Planungskosten müssen Beleuchtungskonzepte von Shopketten einfach an unterschiedliche räumliche Situationen in den jeweiligen Shops anpassbar und portierbar sein. Es genügt also nicht, einen einzelnen Shop zu optimieren.
- In der Praxis ist es für viele Shopbetreiber schwierig bis unmöglich, ein Shopkonzept im Detail zu beurteilen, sodass auch ein Abgehen von bewährten Konzepten sehr aufwändig ist und meist nur punktuell geschieht.
- Die Investitionsentscheidung erfolgt meist über die Investitionskosten. Nur in wenigen Fällen werden die gesamten Lebenszykluskosten herangezogen.

Der vorliegende Beitrag fasst die Ergebnisse des vom Österreichischen Klima- und Energiefonds im Rahmen des Programms „Neue Energien 2020“ geförderten Projektes „Energieeffiziente Beleuchtung für Shops - Grundlagen, Technologie, Anwendung“ zusammen. Dabei wurden gemeinsam mit Praxispartnern Methoden und Instrumente entwickelt, die interessierte Unternehmen unterstützen, ihr Beleuchtungskonzept im Hinblick auf Qualität und Energieeffizienz zu beurteilen und unter Anwendung von verfügbaren Technologien weiter zu entwickeln. Dabei wurde – in Abgrenzung zu den meisten Pilotanlagen, die ausschließlich auf LED setzen – ein branchen- und technologieoffener Ansatz gewählt, der zum Ziel hat, für jede Beleuchtungsaufgabe in den Shops das optimale Konzept und die am besten daran angepasste Technologie zu wählen.

2 Ziel des Beitrags

Es wird anhand konkreter Beispiele aus Österreich gezeigt, dass durch intelligente Beleuchtungskonzepte und durch den Einsatz innovativer Technologien eine energieeffiziente und zugleich qualitativ hochwertige Beleuchtung für Shops erreicht und in der Praxis umgesetzt werden kann. Dazu werden neu entwickelte Methoden vorgestellt und die Anwendung an Hand zweier konkreter Beispiele dokumentiert.

Für einen Tankstellenshop mit angeschlossener Gastronomie wird gezeigt, dass sich durch tageslichtabhängige Steuerung der Beleuchtung mehr als 50% der Energie einsparen lässt. Dabei wird durch gezielte Anpassung an die jeweilige Außensituation die Qualität der Beleuchtung gegenüber dem Ist-Stand gesteigert.

Mit Hilfe eines situativ adaptierbaren Bewertungsverfahrens wird für ein Textilgeschäft gezeigt, dass sich auch hochwertige Beleuchtungskonzepte durch den Einsatz von LEDs und der gerade dadurch ermöglichten Dimming von Leuchten weiter verbessern lassen.

3 Ergebnisse

3.1 Entwicklung eines Beurteilungsschemas für Beleuchtungskonzepte

Auch wenn für die Bewertung der Qualität (z.B. Normen) und der Energieeffizienz (z.B. Benchmarks) von Shopbeleuchtungskonzepten einige Daten vorliegen, so zeigt sich bei einer genaueren Betrachtung schnell, dass solche Zahlen in der Praxis nur sehr geringe Aussagekraft haben. Zur Lösung dieser Frage wurde daher gemeinsam mit Shopbetreibern und Beleuchtungsplanern ein Schema entwickelt, das erlaubt, für eine große Bandbreite an Shops bezüglich der Beleuchtung zu beurteilen. Die wesentliche Dimension bei der Analyse ist die sogenannte „Marktpositionierung" des Shops und das damit eng verbundene Shopkonzept. Ein großer Baumarkt hat ein völlig anderes Shopkonzept als eine Exklusive Modeboutique und muss daher auch bezüglich ihrer Beleuchtung völlig anderen Anforderungen genügen. Dabei muss man zwischen verschiedenen Funktionen der Beleuchtung (Grundbeleuchtung, Akzentuierung, Effektbeleuchtung, Arbeits- und Funktionsbeleuchtung) unterscheiden.

Je nach Marktpositionierung verändern sich Gewichtung und Anforderungen an diese Beleuchtungsfunktionen. Generell kann gesagt werden: Je günstiger die Positionierung des Shops, desto stärker dominiert die Grundbeleuchtung, je exklusiver ein Shop ist, desto stärker tritt die Akzentbeleuchtung in den Vordergrund. Das allgemeine Lichtniveau nimmt mit steigender Positionierung ab, dafür fallen die Kontraste zwischen Grund- und Akzentbeleuchtung stärker aus.

Mit der Positionierung verändert sich im Allgemeinen auch die Wahl der Leuchtenformen und der Leuchtmittel. Bei niedriger Positionierung eines Shops werden fast ausschließlich Leuchtstofflampen eingesetzt und dementsprechend sind die Leuchtenformen langgestreckt bzw. großflächig. Bei höherer Positionierung der Shops geht der Trend zu kleinen, punktförmigen Leuchtmitteln und Leuchten mit kleiner, runder Lichtaustrittsfläche. Zum Teil sollen mit diesen Leuchten im peripheren Gesichtsfeld auch Glanzeffekte gesetzt werden, die jedoch so gering gehalten werden müssen, dass sie nicht blenden.

Für die Bewertung von Beleuchtungskonzepten müssen klarerweise auch allgemein angewandte generelle Lichttechnische Kriterien herangezogen werden, wobei jeweils spezifische Anforderungen für Shops definiert wurden:

- Beleuchtungsstärke
- Gleichmäßigkeit
- Lichtfarbe
- Farbwiedergabe
- Nichtsichtbare Strahlung
- Blendung

Für zahlreiche Lichtanwendungen in Shops (Regale, Gondeln, Frischware-Vitrinen, Displays, Schaufenster etc.) wurden detaillierte Anforderungskataloge entworfen. Mit diesem umfassenden Bewertungsschema lassen sich praktisch alle Shops in beliebiger Positionierung und in allen Branchen umfassend aus Sicht der Lichtplanung bewerten.

Für eine kundenorientierte Bewertung müssen allerdings noch Anforderungen der Shopbetreiber ergänzt werden. Hier ist an erster Stelle die Integration des Beleuchtungskonzepts in das Shopkonzept genannt werden. Neben der Wirkung des Lichts auf die Kunden (gutes Sehen, ermüdungsfreies Sehen, visuelles Ambiente) sind hier die Anforderungen der Anpassbarkeit an lokale Gegebenheiten und die Portierbarkeit der Lichtlösung in die einzelnen Shops von hoher Bedeutung. Lichtlösungen sollten bis zu einem gewissen Grad skalierbar und modular zusammengesetzt sein.

Technisch werden von Shopbetreibern über die gesetzlichen Anforderungen wie Sicherheit oder Normgerechtigkeit keine speziellen Anforderungen an das Beleuchtungssystem gestellt. Wie schon erwähnt erfolgt die Auswahl des Beleuchtungssystems in den meisten Fällen nach wie vor auf Basis der Investitionskosten. Auch wenn die laufenden Kosten (Energie, Wartung) zunehmend beachtet werden, so sind hier die Anforderungen deutlich geringer. Inwieweit die Lebensdauer der Leuchtmittel eine Rolle spielt, hängt maßgeblich von den individuellen Bedingungen, wie Häufigkeit einer Gesamtsanierung der Shops oder Wartung durch das eigene Personal, ab.

An Hand dieses umfassenden Bewertungsschemas wurden die beiden im Folgenden beschriebenen Fallbeispiele analysiert und es wurden Lösungsvorschläge für eine Optimierung der Beleuchtungskonzepte entwickelt. Dabei ist hervorzuheben, dass die Beleuchtungsqualität bei beiden untersuchten Beispielen im Mittelpunkt der Optimierung stand, und dass die Steigerung der Energieeffizienz quasi eine notwendige Randbedingung bzw. Leitgedanke war. Diese Vorgangsweise war erforderlich, um praxistaugliche Ergebnisse zu erhalten. Im Ergebnis zeigt sich aber, dass sich diese beiden Bereiche insgesamt gut ergänzen.

Die entwickelten Konzepte haben den Status von Machbarkeitsstudien für konkrete Anwendungen, es ist aber zu erwarten, dass die Ergebnisse mittelfristig in die generellen Beleuchtungskonzepte der untersuchten Unternehmen einfließen und dort einen signifikanten Beitrag zur Erhöhung der Energieeffizienz bei gleichzeitiger Verbesserung der Beleuchtungsqualität leisten werden.

3.2 Fallbeispiel 1: Tankstellenshop

Ausgangssituation

Für den analysierten Tankstellenshop, der einer von mehreren hundert ähnlich strukturierten Shops ist, sollte untersucht werden, ob sich durch Anwendung einer tageslichtabhängigen Steuerung der Beleuchtung im Innenraum des Shops die Beleuchtungsqualität verbessern lässt und zugleich der Energieverbrauch reduziert werden kann. Als spezielle Schwachstellen des im Einsatz befindlichen Beleuchtungskonzept wurden folgende spezifischen Probleme benannt:

- Schlechte Sichtbarkeit auf den Forecourt in der Nacht durch Reflexionen in der Verglasung (Sicherheitsempfinden des Personals im Shop)
- Blendung im Eingangsbereich durch großen Helligkeitsunterschied in der Nacht

- Als dunkel empfundener innerer Shopbereich durch große Helligkeitsunterschiede zum fensternahen Bereich bei Tag
- Hohe laufende Kosten durch Energie und Wartung (Dauerbetrieb: 365 Tage, 24 h)

Lösungsansatz

Für verschiedene Tages- und Jahreszeiten, sowie für verschiedene Himmelszustände wurde die Tageslichtsituation im Inneren des Tankstellenshops durch Simulation bestimmt. Mit einer eigens entwickelten Software wurden die Tageslichtergebnisse mit der Innenraumbeleuchtung überlagert, wobei jede Leuchtengruppe interaktiv "gedimmt" werden konnte.

So wurde für die einzelnen Zeitpunkte die Kunstlichtsituation hinsichtlich Lichtverteilung im Shop und Reflexionen in der Verglasung optimiert.

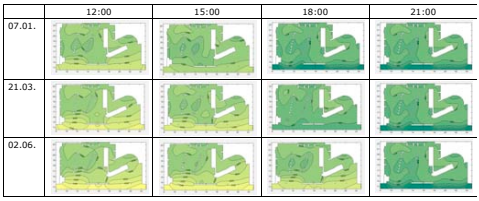


Abbildung 1: Für verschiedene Tages- und Jahreszeiten optimierte Lichtverteilung im Tankstellenshop.

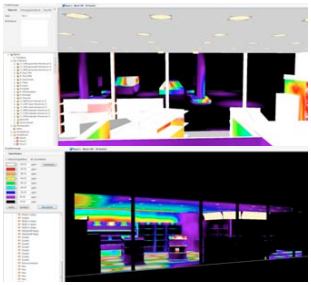


Abbildung 2: Beurteilung von Reflexionen in der Verglasung durch Berechnung von Leuchtdichten beim Aus- und Einblick.

Ergebnis

Durch den Einsatz dimmbarer LED-Strahler als Ersatz für konventionelle Strahler mit 35W-Metalldampf-Halogenlampen konnten sowohl die Lichtverteilung im Raum, als auch das Helligkeitsniveau so angepasst werden, dass Blendungseffekte und Adaptationssprünge vermieden werden können. Bei Tag wird das Beleuchtungsstärkeniveau in Fensternähe zurückgenommen, während insbesondere vertikale Leuchtdichten im hinteren Bereich des Shops (Sichtbarkeit von außen) hoch gehalten werden. Durch geeignete Nachtabsenkung wird sowohl der Ausblick auf den Forecourt verbessert, als auch das Blendempfinden beim Betreten des Shops reduziert.

3.3 Fallbeispiel 2: Textilhandel

Ausgangssituation

Für einen Shop einer internationalen Textilhandelskette sollte das Energiesparpotenzial untersucht werden, wobei strenge Vorgaben hinsichtlich der Beibehaltung des bestehenden Beleuchtungskonzepts einzuhalten waren. Insbesondere sollten keine Änderungen hinsichtlich der Verteilung von Allgemeinbeleuchtung und Akzentbeleuchtung vorgenommen werden.

Als Schwachstelle des bestehenden Konzepts wurden die Schwenkstrahler im Bereich der Verkehrswege identifiziert, die situativ als Allgemeinbeleuchtung für die Verkehrswege (Strahler senkrecht nach unten gerichtet) oder als Akzentbeleuchtung (Strahler auf Ware ausgerichtet) eingesetzt werden. Das führt zu hohen Leuchtdichten am Boden der Verkehrswege, die eine geeignete Akzentuierung der Ware schwierig macht.

Lösungsansatz

Durch detaillierte Analyse verschiedener Shopbereiche hinsichtlich horizontaler, vertikaler und zylindrischer Beleuchtungsstärken, Leuchtdichten und Kontraste wurde die bestehende Beleuchtungslösung bewertet. An den dabei festgestellten Schwachstellen wurden Leuchten gezielt “gedimmt“ bzw. die lokale Anordnung der Leuchten modifiziert. Die so entstandene neue Beleuchtungslösung wurde simuliert und nach dem gleichen Bewertungsschema wie die bestehende Lösung analysiert und bewertet.

Abbildung 3: Bestehende Beleuchtungslösung – hohe Leuchtdichten auf dem Verkehrsweg reduzieren die Akzentuierung der angestrahlten Aktionsware

Abbildung 4: Alternative Beleuchtungslösung – Reduktion der Leuchtdichte auf der Verkehrsfläche führt zu verbesserter Akzentuierung der Ware

Ergebnis

Anstelle der 35W und 70W Strahler mit Metalldampf-Halogenlampe wurden dimmbare LED-Strahler eingesetzt. In den quadratischen Flächenleuchten wurden ebenfalls LED statt Kompaktleuchtstofflampen eingesetzt, auf Dimmen kann hier jedoch verzichtet werden. Im Bereich der Verkehrsflächen konnte so die horizontale Beleuchtungsstärke

von ca. 1.600 lx auf 850 lx gesenkt werden. Dadurch ist nach wie vor eine deutliche Führungsfunktion gegeben (ca. 50% höhere Beleuchtungsstärken als in der allgemeinen Verkaufsfläche). Die angestrahlte Ware ist jedoch durch vertikale Beleuchtungsstärken von 1.200 bis 1.500 lx deutlich akzentuiert.

Somit konnte durch Dimmen sowohl eine Energieeinsparung erzielt werden, als auch eine klarere Akzentuierung der angestrahlten Ware.

4. Energieeffizienz der Lösungen

Durch Anwendung der beschriebenen Verfahren lässt sich für die beiden beschriebenen Fallbeispiele zeigen, dass eine Erhöhung der Energieeffizienz der Beleuchtung bei entsprechender Analyse und Planung mit einer deutlichen Verbesserung der Beleuchtungsqualität einhergehen kann. Es muss darauf hingewiesen werden, dass die Energieeffizienz im Kontext der jeweiligen Marktpositionierung beurteilt werden muss. Somit sind Benchmarks nur in einem sehr engen Rahmen innerhalb ähnlicher Shops mit gleicher Positionierung aussagekräftig.

Die tatsächlich erreichten Energieeinsparungen ergeben sich dabei durch die Kombination folgender Elemente:

- Einsatz neuer, energieeffizienter Technologien (LED); und
- Anwendung neuer, innovativer Beleuchtungskonzepte (z.B. Dimming), die auf die Verfügbarkeit der entsprechenden Technologien angewiesen ist.

Für den optimierten Tankstellenshop ergibt sich rein aus der tageslichtabhängigen Lichtsteuerung eine Einsparung im Bereich von 30 – 35% gegenüber einer Dauerbeleuchtung mit voller Leistung (Abbildung 5). Die Effizienz von LED-Leuchten liegt gegenwärtig bei 80 lm/W, beim Dimming sogar bis 85 lm/W und somit deutlich über der herkömmlicher Technologien, die bei Metalldampf-Halogen-Lampen bei 60 lm/W liegt. Die gesamte Energieeinsparung liegt in Summe bei über 50%!

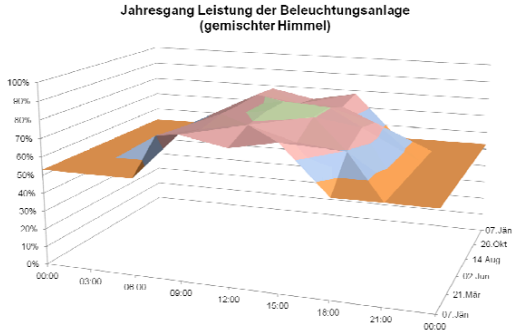


Abbildung 5: Jahresgang der Leistung bei tageslichtabhängiger Lichtsteuerung; Grafik: e7

Die Analyse und Bewertung der Beleuchtungskonzepte der Textilshops zeigt, dass schon das vorhandene Konzept gegenüber verfügbaren Benchmarks – bei allen Vorbehalten der Vergleichbarkeit – als sehr energieeffizient eingestuft werden kann. Doch selbst dieses Konzept lässt sich durch den Einsatz von LEDs und durch Dimming weiter optimieren. Die – bezogen auf die Shopfläche – spezifische Leistungsaufnahme von 12,8 W/m^2 stellt ein äußerst niedriger Wert dar. Die Energieeinsparung beträgt dabei mehr als 25%.

In beiden Fällen konnte zudem die Qualität der Beleuchtung verbessert werden.

5. Fazit

Zur Erhöhung der Energieeffizienz der Beleuchtung von Shops genügt es nicht, konventionelle Leuchtmittel gegen neue, meist LEDs, auszutauschen. Abgesehen davon, dass die Gesamteffizienz von LED-Leuchten, die als Ersatz für konventionelle Leuchten in Frage kommen, erst seit kurzem tatsächlich höher ist als die konventioneller Systeme, stecken die großen Einsparpotenziale in der Ausnutzung aller Möglichkeiten, die sich mit der Anwendung von neuen Technologien eröffnen. Insbesondere durch Dimming lassen sich viele Beleuchtungsaufgaben effizienter und zugleich besser bewältigen. Generell muss jedoch darauf geachtet werden, dass für alle Anwendungen die jeweils optimale Technologie zur Anwendung kommen muss.

Die Einsparmöglichkeiten sind jedoch erheblich. In den untersuchten Fallbeispielen waren Einsparungen in der Höhe von mehr als 50% (Tankstellenshop) bzw. mehr als 25% (Textilshop) möglich. Nicht nur in Anbetracht des hohen Niveaus der IST-Situationen bei den konkreten Beispielen, sind das sehr beachtliche Werte.

Unumgänglich ist bei jeder Optimierung von Beleuchtungskonzepten eine umfassende und detaillierte Analyse der IST-Situation und der Püfung, ob die optimierte Lösung den entsprechenden Anforderungen bzgl. der Beleuchtungsqualität entspricht.

Sollen sich energieeffiziente Lösungen am Markt stärker als bisher verbreiten, dann muss jedenfalls darauf geachtet werden, dass auch dann, wenn eine Erhöhung der Energieeffizienz angestrebt wird, die Qualität der Beleuchtung für jede Lichtplanung im Mittelpunkt steht.

Schulbeleuchtung mit LED – Entwicklung und Umsetzung einer Lichtlösung für die Allgemein- und Tafelbeleuchtung in Klassenräumen

Autoren:

Matthias Fassian, Dipl.-Ing.
Philips Lighting
Professional Lighting Solutions
Lübeckertordamm 5
20099 Hamburg
Tel: 040 2899-4623
Fax: 040 2899-4621
matthias.fassian@philips.com

Hans-Hasso Lange, Dipl.-Ing.
Philips Lighting
Professional Lighting Solutions
Lübeckertordamm 5
20099 Hamburg
Tel: 040 2899-4644
Fax: 040 2899-2499
hanshasso.lange@philips.com

1. Zusammenfassung

In der Innenraumbeleuchtung werden in immer mehr Anwendungsgebieten LED-Beleuchtungslösungen eingesetzt. Vor allem die Wartungs- und Betriebskosten sind oft ausschlaggebend für eine Entscheidung zu einer Lösung mit LED-Beleuchtungssystemen.

In Bildungseinrichtungen sind die Betriebszeiten der Beleuchtungsanlagen jedoch nicht so groß, dass eine Sanierung mit LED-Lösungen sofort sinnvoll erscheint. Gerade unter dem Gesichtspunkt des Alters der bestehenden Anlagen und der Möglichkeiten einer einfachen Integration von Tageslicht- und Anwesenheitserfassung stellen LED-Beleuchtungslösungen eine sinnvolle und zukunftsweisende Alternative gegenüber herkömmlichen Beleuchtungslösungen mit Leuchtstofflampensystemen dar.

Am Beispiel einer inzwischen realisierten LED-Beleuchtung in einer Schule werden Lösungen für die Allgemein- und Tafelbeleuchtung aufgezeigt.

2. Einführung

Viele Schulen sind mit Beleuchtungssystem ausgestattet, die nicht mehr dem Stand der Technik entsprechen und damit vor allem aus Sicht der Beleuchtungsqualität Defizite aufweisen. Neben der Erfüllung der lichttechnischen Anforderungen ist auch das Thema Wirtschaftlichkeit (Investition, Energieeffizienz und Wartung) für den Betreiber der Beleuchtungsanlagen von großer Bedeutung.

Schüler und Lehrer haben jeden Tag große Herausforderungen und Lernaufgaben zu meistern. Ein optimales Lernumfeld ist hierfür eine Grundvoraussetzung. Das Licht kann unter Berücksichtigung der

Gütemerkmale der Beleuchtung als ein Bestandteil des Lernumfeldes einen wesentlichen Beitrag zur Erfüllung der Lernziele leisten. Dabei geht es neben der Ausleuchtung der Arbeitsbereiche auch um die Schaffung einer optimalen Raumwirkung. Im Zuge einer Sanierung von Beleuchtungsanlagen sind neben der Einhaltung der Gütemerkmale der Beleuchtung eine hohe Energieeffizienz und geringer Wartungsaufwand wichtige Zielgrößen. Die DIN EN 12464-1 stellt neben den geforderten horizontalen Beleuchtungsstärken ebenfalls hohe Anforderungen an die Erfüllung von Mindestwerten der Beleuchtungsstärke auf Wänden und Decke und an die zylindrischen Beleuchtungsstärkewerte. Für die Tafelbeleuchtung ist die vertikale Beleuchtungsstärke und deren Gleichmäßigkeit ebenfalls in der Norm vorgegeben.

So muss für die Sanierung solcher Anlagen die Frage gestellt werden, ob LED-Lösungen heute schon die an die Schulbeleuchtung gestellten Anforderungen in Bezug auf Beleuchtungsqualität und Energieeffizienz erfüllen können.

Die LED-Technik bot bis vor kurzem noch nicht die Möglichkeit, die Anforderungen an die Allgemein- und Tafelbeleuchtung unter Einhaltung der normativen Vorgaben bei gleichzeitig hoher Energieeffizienz zu erfüllen. Inzwischen sind Beleuchtungssysteme verfügbar, die die gestellten Vorgaben erfüllen und somit für die Lösung der Beleuchtungsaufgabe geeignet sind. Die hohe Energieeffizienz wird durch eine optimale Kopplung von Leuchten-Effizienz und der Nutzung von Tageslicht- und Anwesenheitssensorik erreicht.

3. Ausgangssituation

Das hier beschriebene Schulzentrum wurde Ende der 70-er Jahre errichtet und hat in Sachen Beleuchtung bis auf den Ersatz verbrauchter Leuchtmittel keine grundlegenden Änderungen erfahren. In den Klassenräumen sind Einbauleuchten mit weißem Raster und zum Teil noch mit 38 mm Standard-Leuchtstofflampen in einer Akustikdecke installiert.

Interessant ist die in einigen Fachräumen vorhandene Lichtsteuerung zur Reduzierung des Beleuchtungsniveaus z.B. für Experimentalvorführungen. Zu diesem Zweck wurden einige Leuchten mit zusätzlichen Glühlampen ausgestattet, die dann gedimmt werden konnten. Eine Regelung von Leuchtstofflampen war zum damaligen Zeitpunkt nicht praktikabel.

So bestand dringender Handlungsbedarf, neben der Sanierung der Heizungsanlage auch eine Sanierung der Beleuchtung in Angriff zu nehmen. Unter dem Gesichtspunkt einer möglichen Förderung von LED-Lösungen, wurde von Anfang an eine komplette Sanierung auf Basis von LED-Beleuchtungssystemen angestrebt.

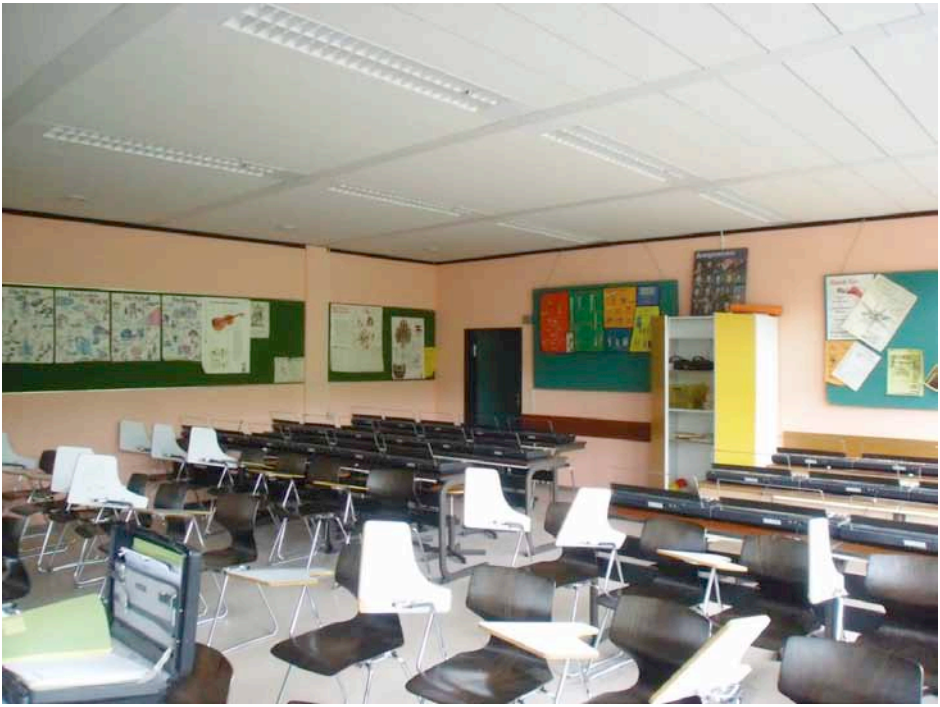


Abbildung 1: Klassenraum unsaniert, Allgemeinbeleuchtung

Abbildung 2: Klassenraum unsaniert, Akzentbeleuchtung

Abbildung 3: Leuchtendetail mit integrierter Glühlampe zur Realisierung einer dimmbaren Beleuchtungslösung

4. Projektentwicklung und Umsetzung

Mit den Ziel, den gesamten Schulkomplex zu sanieren, wurden mehrere Beleuchtungslösungen entwickelt. In verschiedenen Musterräumen wurden diese Systeme zur visuellen und messtechnischen Begutachtung installiert und anschließend über einen längeren Zeitraum getestet, bevor eine gemeinsame Entscheidung von Nutzern und Betreibern der Anlage getroffen wurde.

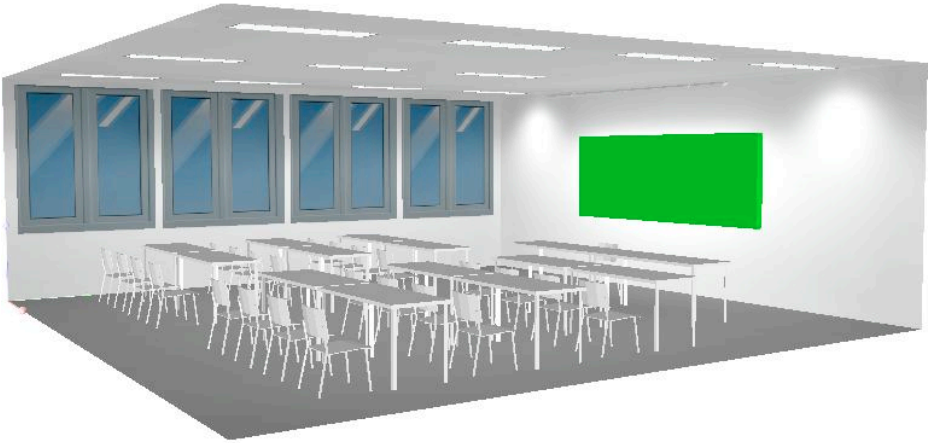


Abbildung 4: Vorschlag einer Beleuchtungslösung für Allgemein- und Tafelbeleuchtung mit LED

Die Struktur der Decke verlangte eine Beleuchtungslösung mit der bewussten Entscheidung für eine zusätzliche seitliche Anordnung von Leuchten neben der Tafelbeleuchtung im vorderen Bereich des Klassenzimmers. Wie bereits in der Simulation zu erkennen ist, wird der Frontbereich des Raumes zusätzlich zur Tafel sehr gleichmäßig und hell ausgeleuchtet.

Bereits in der Phase der Projektentwicklung konnte durch den Einsatz der LED-Systeme eine deutliche Reduktion der Anschlussleistung auf ca. 50% ermittelt werden. Die zusätzlich nach Norm zu installierende Tafelbeleuchtung ist in den Werten bereits enthalten. Noch nicht eingerechnet sind hier die zusätzlich möglichen Einsparungen des Energieverbrauches durch die Nutzung von Anwesenheits- und Tageslichtsteuerung.

Abbildung 5: Musterraum mit einer Beleuchtungslösung für Allgemein- und Tafelbeleuchtung mit LED

Die Tafelbeleuchtung wurde mit einer Breite von 3,60 m so ausgelegt, dass eine gleichmäßige vertikale Ausleuchtung der gesamten Tafel gewährleistet ist, auch wenn diese im Unterricht über einen Bereich von ca. einem Meter verschoben wird. Eine mögliche Justierung der Leuchten sorgt für eine individuelle Ausrichtung der Lichtkegel zur Tafelfläche während der Installation.

Bei der Planung der Beleuchtungsanlage wurde besonderes Augenmerk auf die Aufhellung der Wandflächen gelegt. Dies ist bei ständigen Blickwechseln, wie sie im Unterricht vorkommen, für ein ermüdungsfreies Sehen ohne ständige Adaptation des Auges sehr wichtig. So ist es möglich, ohne weitere zusätzliche Leuchten-Systeme an den Seitenwänden angebrachte Tafeln oder Wandzeitungen auszuleuchten.

Abbildung 6: Aufhellung der Wandflächen durch entsprechende Anordnung der Leuchten im Deckensystem

Da das Projekt zu einer Zeit angestoßen wurde, als LED-Leuchten noch nicht automatisch die Anforderungen an die lichttechnischen Qualitätsmerkmale für Arbeitsplätze in Innenräumen erfüllt haben, wurden die für das Projekt in der Entwicklung vorgezogenen Leuchten durch neutrale Stellen geprüft. Gerade in Bezug auf die geforderte Farbwiedergabe war es nicht einfach, vom Hersteller der LED-Komponenten, diese kontinuierlich in entsprechend hoher Qualität zur Verfügung gestellt zu bekommen. Inzwischen stellt dieser Punkt kein Problem mehr dar.

Über eine wissenschaftliche Begleitforschung wurde die Akzeptanz der Nutzer zu den verschiedenen LED-Beleuchtungssystemen im Klassenraum ermittelt und für die Entscheidung zur nun umgesetzten Lösung herangezogen.

In allen Musterklassen wurde eine Steuerung zur Tageslichtabhängigen Regelung der Beleuchtungsstärke und zur Anwesenheitsdetektion installiert. So soll der Energieverbrauch noch einmal deutlich gesenkt werden. Unter dem Gesichtspunkt, dass das Tageslicht nicht bis in die komplette Raumtiefe vordringt, wurde die Lichtregelung so ausgelegt, dass die Leuchten in Fensternähe stärker als die Leuchten in der Raumtiefe gedimmt werden. Damit wird gewährleistet, dass im Raum immer ein ausreichendes und gleichmäßiges Beleuchtungsniveau auf der Nutzebene zur Verfügung steht.

Abbildung 7: Tageslichtabhängige Regeleung der Beleuchtungsanlage, unter Beibehaltung eines gleichmäßigen Beleuchtungsstärkeniveaus bis in die Raumtiefe

Die regelbare LED-Lösung bietet eine lichttechnisch hervorragende Beleuchtung, mit einer gleichzeitig deutlichen Senkung der Energie- und Wartungskosten. Die lange Lebensdauer der LED-Systeme mit einem Wechselintervall von ca. 40.000 Betriebsstunden sorgt bei ca. 1000 bis 1400 Betriebsstunden der Beleuchtungsanlage im Jahr dafür, dass – ausgenommen von einer regelmäßigen Reinigung der Leuchten – die Anlage mindestens 28 Jahre betrieben werden kann. Die Leuchten sind damit praktisch wartungsfrei. Wird die Steuerung der Beleuchtungsanlage mit den dann zusätzlichen Abschaltzeiten der Leuchten auch mit in die Festleung der Wechselintervalle einbezogen, verlängert sich dieser Zeitraum noch einmal.

Die wissenschaftliche Begleitforschung wird weiter fortgeführt. Damit ist es möglich, weitere Aussagen über die Alltagstauglichkeit von Beleuchtungslösungen zu erhalten und das unter den Gesichtspunkten der Nutzerakzeptanz und des Energieverbrauches.

Im Zuge der Sanierung des Schulgebäudes wurden auch die Flure auf Beleuchtungssysteme mit LED-Lösungen umgestellt. So konnte auch in diesen stark frequentierten Bereichen die Lichtqualität bei gleichzeitiger Reduzierung des Wartungsaufwandes deutlich verbessert werden.

5. Ergebnisdiskussion

Erstmalig wird in einem Schulbau die Klassenraumbeleuchtung komplett mit LED und unter Nutzung von Tageslicht- und Anwesenheitssensorik ausgeführt. Bereits in der Testphase fanden die Beleuchtungslösungen mit LED positives Echo bei Schülern und Lehrern. Durch konsequente Beachtung der Qualitätsanforderungen für die Beleuchtungsplanung und die Erreichung einer größtmöglichen Effizienz des Gesamtsystems ist hier eine absolut innovative und zukunftsorientierte Beleuchtungslösung geschaffen worden, die auch in Bezug auf die Wartung der Beleuchtungsanlage neue Maßstäbe setzt.

Bildnachweis:

© Alle Bilder Philips Lighting, Abbildung Nr. 4: DIALux 3D-Rendering

Stand der Industriebeleuchtung mit LED – Was ist heute schon wirtschaftlich möglich?

Autoren:

Hans-Hasso Lange, Dipl.-Ing.
Philips Lighting
Professional Lighting Solutions
Lübeckertordamm 5
20099 Hamburg
Tel: 040 2899-4644
Fax: 040 2899-2499
hanshasso.lange@philips.com

Matthias Fassian, Dipl.-Ing.
Philips Lighting
Professional Lighting Solutions
Lübeckertordamm 5
20099 Hamburg
Tel: 040 2899-4623
Fax: 040 2899-4621
matthias.fassian@philips.com

1. Einleitung

In der Industrie werden sehr unterschiedliche Anforderungen an die Beleuchtung gestellt. Dabei kommt es nicht selten vor, dass Beleuchtungsanlagen 5000 bis 8000 Stunden im Jahr in Betrieb sind und Beleuchtungsstärkeniveaus von 100 lx bis 750 lx benötigt werden. Neben der Erfüllung der lichttechnischen Anforderungen ist das Thema Wirtschaftlichkeit (Investition, Energieeffizienz und Wartung) von großer Bedeutung für den Betreiber der Beleuchtungsanlage.

Sicherheit der Mitarbeiter und ermüdungs- und fehlerfreies Arbeiten sind wichtige Voraussetzungen für den Markterfolg der Unternehmen. Licht spielt dabei eine entscheidende Rolle. Daher ist es in der Planung und im Betrieb von Beleuchtungsanlagen wichtig, die gestellten Anforderungen an die Qualität der Beleuchtung zu erfüllen. Gerade in der Auswahl der Beleuchtungslösung hat der Planer nicht nur die Möglichkeit, die Gütemerkmale der Beleuchtung zu beachten. Er muss sein Augenmerk auch auf eine energieeffiziente und wartungsarme Lösung legen.

Im Planungsprozess sind daher viele Parameter, wie z.B. Produktionsablauf, Verschmutzung, Wechsel- und Reinigungszyklen, Wartungskosten sowie Präsenzmeldung und Tageslichtnutzung zu berücksichtigen.

Bisher gibt es je nach Anforderungen zwei Lösungsansätze:

- Hallentiefstrahler mit Hochdruck-Entladungslampen
- Lichtbandsysteme mit Leuchtstofflampen

Beide Systeme haben Vor- aber auch Nachteile.

Mit der weiteren Entwicklung der LED-Systeme in Bezug auf verfügbare Lichtstrompakete und höherer Effizienz ergibt sich natürlich auch die Frage nach den Einsatzmöglichkeiten von Leuchten mit LEDs in der Industriebeleuchtung.

2. Beleuchtungslösungen mit LEDs in der Industrie

Die LED-Technik bot bis vor kurzem noch nicht die Möglichkeit, die Anforderungen an die Industriebeleuchtung unter Einhaltung der normativen Vorgaben bei gleichzeitig hoher Energieeffizienz zu erfüllen.

Auch wenn LED-Beleuchtungslösungen in der Industrie erst am Anfang stehen, so zeigen erste realisierte Projekte deutlich, wie die Vorteile der LED-Beleuchtungssysteme genutzt werden können. Zu nennen sind hier wesentlich verlängerte Wartungsintervalle mit weniger Unterbrechungen des Produktionsablaufes sowie ein stark gesenkter Energieverbrauch, der durch die Nutzung von tageslichtabhängigen Regelsystemen und Anwesenheitssensoren nochmals reduziert werden kann.

Für die Planung einer Beleuchtungsanlage ist besonderes Augenmerk auf die richtige Auswahl der Qualitätsparameter und die genaue Bestimmung des Wartungsfaktors zu legen. Hier steht die LED-Beleuchtung, wenn sie richtig entwickelt und eingesetzt wird, schon jetzt für eine hohe Energieeffizienz und eine deutliche Reduzierung der Wartungskosten.

2.1 Lösungen für den Ersatz von Hallentiefstrahlern.

In vielen Hallen werden immer noch Hallentiefstrahler mit Hochdruck-Quecksilberdampflampen oder Hochdruck-Halogenmetalldampflampen verwendet. Der Vorteil dieser Systeme liegt in den relativ geringen Anschaffungskosten und den wenigen zu installierenden Lichtpunkten. Gerade in hohen Hallen ist dies ein wichtiges Argument. Die Anforderungen an die Beleuchtung sind in den letzten Jahren durch Umnutzung der Flächen oder der Änderung der Produktionsprozesse vor allem in Bezug auf die Farbwiedergabe

gestiegen, so dass die Hochdruck-Quecksilberdampflampen nicht mehr den gestellten Anforderungen genügten.

Ein wesentlicher Nachteil der Hochdruck-Entladungslampen ist aber die vergleichsweise hohe Lichtstromabnahme über die Lebensdauer. Auch die frühen und kontinuierlichen Lampenausfälle sind für die Bestimmung des Wartungsfaktors und die Festlegung der Wechselzyklen der Lampen und damit die Auslegung der Beleuchtungsanlage zu beachten. So sind die Lampen nach 8.000 bis 10.000 Betriebsstunden im Gruppenaustausch zu wechseln. Einzelne defekte Leuchtmittel sind sofort zu ersetzen, da oft schon mit dem Ausfall eines Leuchtmittels die geforderten Beleuchtungsstärken zur Erfüllung der Sehaufgabe in den relevanten Bereichen nicht mehr erreicht werden. Je nach Nutzung der Beleuchtungsanlage bedeutet dies Wechselzyklen von 1 bis 2 Jahren. Die anfallenden Kosten für Ersatzlampen, Steiger und Personal sowie die häufigen Eingriffe in den Produktionsprozess lassen das Beleuchtungssystem sehr schnell ineffektiv werden. Ein weiterer Nachteil ist, das die Lampen eine gewisse Zeit bis zur Abgabe des vollen Lichtstromes brauchen und ebenso eine lange Wiedereinschaltzeit haben. Damit sind sie nicht für die Not- und Sicherheitsbeleuchtung oder präsenzabhängige Lichtregelung geeignet. Auch eine Dimmung der Leuchten und damit die Nutzung von Tageslicht ist mit diesen Systemen ebenfalls nicht möglich.

Mit den inzwischen für LED Systeme zur Verfügung stehenden Lichtstrompaketen ist es nun möglich, diese inzwischen veraltete Technik zu ersetzen. So können Leuchten für Hochdruck-Entladungslampen bis 400 W direkt im 1:1 Austausch durch LED-Flächenleuchten ersetzt und dabei gleichzeitig die Anschlussleistung deutlich reduziert werden. Wird eine komplette Sanierung der Anlage durchgeführt, ist es auch möglich die Anzahl der zu installierenden Lichtpunkte weiter zu reduzieren. Auf Grund der hohen Lebensdauer der LED-Systeme und dem über die lange Zeit moderaten Lichtstromrückgang reduzieren sich die Wartungskosten und die Eingriffe in den Produktionsprozess deutlich.

Mit den Einsatz von LED-Flächenleuchten können auch die weiteren Vorteile der Beleuchtungssysteme in der Industrie genutzt werden. LED-Flächenleuchten sind oft schon mit regelbaren Vorschaltgeräten ausgestattet, so das eine tageslicht- und präsenzabhängige Regelung der Leuchten ohne großen zusätzlichen Aufwand möglich ist. In einigen Leuchten sind diese Systeme bereits integriert. Ebenfalls ist es möglich, die LED-Leuchten in die Not- und Sicherheitsbeleuchtungsanlage zu integrieren, da es keine Einschaltverzögerung oder lange Wiedereinschaltzeiten gibt.

Im Vergleich zu den Hallentiefstrahlern lassen sich mit LED-Flächenleuchten Anlagen mit höherer Beleuchtungsqualität bei Energieeinsparungen von 50% realisieren. Dabei sind zusätzliche Einsparungen durch eine Lichtregelung noch nicht mit eingerechnet.

Abbildung 1: Lichtbandsystem zur Regalgangbeleuchtung mit Leuchtstofflampensystemen (vor der Sanierung)

Abbildung 2: Flächenleuchten zur Regalgangbeleuchtung mit LED-Systemen (nach der Sanierung)

2.2 Lösungen für den Ersatz von Leuchtstofflampen in Lichtbandsystemen

Seit vielen Jahren werden Anlagen mit Hallentiefstrahlern durch Beleuchtungssysteme mit Leuchtstofflampen ersetzt. Sie bieten viele Vorteile gegenüber Leuchten mit Hochdruk-Entladungslampen, wie z.B. schnelle Ein- und Wiedereinschaltzeiten oder die Möglichkeit der Dimmung zur Nutzung von Tageslicht. Durch die geringeren Lichtstrompakete der Lampen müssen jedoch mehr Leuchten im Raum installiert werden. Durch die Nutzung der vorverdrahteten Tragschienensysteme und die damit verbundenen schnellen

Montagemöglichkeiten bei gleichzeitig hoher Flexibilität der Beleuchtung ist dies kein Nachteil in der Installation. Diese wird oft sogar noch einfacher, weil nicht mehr jede einzelne Leuchte separat angeschlossen werden muss. Ein weiterer Vorteil der Leuchtstofflampen gegenüber den Hochdruck-Entladungslampen ist die deutlich längere Lebensdauer bei ebenfalls deutlich geringerem Lampenausfall. Und falls doch mal eine Lampe vorzeitig ausfallen sollte, so muss nicht gleich eine Einzelwartung durchgeführt werden, da die Arbeitsfläche durch andere benachbarte Lampen weiterhin ausgeleuchtet wird. Die Wartungsintervalle und Éingriffe in den Produktionsprozess konnten gegenüber Hallentiefstrahlern deutlich gesenkt werden. Geringere Anschlussleistungen und Energiekosten waren ebenfalls ein Entscheidungskriterium für ein Lichtbandsystem mit Leuchtstofflampen.

Mit dem Einsatz der T5 Lampen und einschaligen Aluminium-Reflektoren ist es möglich, sehr effiziente Beleuchtungslösungen mit optimaler, auf die jeweilige Anwendung abgestimmter Lichtverteilung einzusetzen.

Noch vor einem Jahr waren System-Lichtausbeuten von 70 lm/W für LED-Leuchten ein hervorragendes Ergebnis. Diese reichten noch nicht aus, um die eingesetzten effizienten 1-lampigen Leuchtstofflampen-Systeme ersetzen zu können. Inzwischen ist die Entwicklung der LED weiter deutlich vorangeschritten und es werden bei LED-Systemen Lichtausbeuten von 110 lm/W und mehr erzielt. Es ist hier zu betonen, dass es sich bei den Angaben bereits um die LED mit der entsprechenden Optik handelt. Somit ist es nun auch möglich, die effizienten 1-lampigen Lichtbandleuchten in Tragschienensystemen durch noch effizientere LED-Lösungen zu ersetzen.

Für Neuinstallationen werden LED-Systeme mit maximal verfügbarem Lichtstrom eingesetzt. So ist es möglich, die Anzahl der Lichtbänder oder die Anzahl der Leuchten je Lichtband zu reduzieren. Eine andere Möglichkeit ist der Ersatz bestehender Leuchtstofflampen-Systeme und deren Reflektor. Dazu wird der von den LED-Systemen abgegebene Lichtstrom dem der bisher eingesetzten Leuchtstofflampen angepasst. So sind in Hochregalgängen Energieeinsparungen von 40% im Vergleich zu Leuchtstofflampen möglich.

Es ist nur noch eine Frage der Zeit, bis auch 2-lampige Lichtbänder durch LED-Lösungen ersetzt werden können.

Genau wie Leuchtstofflampen können auch LEDs für die Not- oder Sicherheitsbeleuchtung eingesetzt werden. Es bedarf damit keiner weiteren zusätzlichen Leuchteninstallationen. Werden optisch durchlaufende Lichtbänder eingesetzt, können einzelne Leuchteneinsätze für die Notbeleuchtung ausgelegt werden. Dabei lässt sich der Lichtstrom sehr einfach an die geforderten Werte anpassen. Eine andere Möglichkeit ist der Einsatz von speziellen LEDs, z.B. in den Blindfeldern bei eine Montage „Leuchte-Lücke-Leuchte“ Für diesen Anwendungsfall stehen dem Nutzer sehr effiziente, langlebige und wartungsarme Lösungen zur Verfügung.

LED-Systeme sind damit auch in diesem Bereich der hochwertigen Beleuchtungssysteme angekommen.

Abbildung 4: Lichtbandsystem zur Regalgangbeleuchtung mit Leuchtstofflampensystemen (vor der Sanierung)

Abbildung 5: Lichtbandsystem zur Regalgangbeleuchtung mit LED-Systemen (nach der Sanierung)

3. Zusammenfassung

Aus heutiger Sicht entwickelt sich die LED-Beleuchtung zu einer sinnvollen Alternative nicht nur für Hallentiefstrahler sondern auch für Lichtbandsysteme. Durch konsequente Beachtung der Qualitätsanforderungen für die Beleuchtungsplanung und die Erreichung einer größtmöglichen Effizienz des Gesamtsystems wird hier eine absolut innovative, zukunftsorientierte und wirtschaftliche Beleuchtungslösung geschaffen, die auch in Bezug auf lange Wartungsintervalle der Beleuchtungsanlage neue Maßstäbe setzt.

Bildnachweis:

© Alle Bilder Philips Lighting

Planung biologisch wirksamer Beleuchtung – Vorstellung der Arbeitsergebnisse der Ad-Hoc Arbeitsgruppe des FNL 27

Autoren:
Matthias Fassian, Dipl.-Ing. Philips Lighting, Professional Lighting Solutions
Lübeckertordamm 5, 20099 Hamburg,
Tel: 040 2899-4623, Fax: 040 2899-4621, matthias.fassian@philips.com

Dr. Andreas Wojtysiak, Dipl.-Biol., OSRAM AG, Strategic Innovation Management
Hellabrunner Straße 1, 81536 München
Tel: 089 6213-2172 Fax: 089 6213-2059, a.wojtysiak@osram.de

Wolfgang Scharpenberg, Dipl.-Ing., INLIGHT GmbH & Co. KG, Geschäftsführer
Kurt-Schuhmacher-Straße 269, 46539 Dinslaken
Tel: 02064 456968-11 Fax: 02064 456968 9, wolfgang.scharpenberg@inlight-gmbh.de

Ulf Greiner Mai, Dipl.-Ing.(TU) / Weimar, Halle / Beratender Ingenieur VBI, öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Lichttechnik
Washingtonstraße 53A, 99423 Weimar
Tel: 0363 3851280 Fax: 03464 3851278, ugm_sv@hotmail.com

1. Einführung

Lange Zeit wurden biologische Wirkungen des Lichts auf den Menschen als ein überwiegend medizinisches Thema gesehen, welches für die Lichttechnik im Allgemeinen und insbesondere für die Lichtanwendung in der Allgemeinbeleuchtung von eher untergeordneter Bedeutung gesehen wurde. Seitens der Lichttechnik hatte man hat sich zwar um eine geeignete messtechnische Beschreibung gekümmert, die Anwendung aber den Spezialisten aus Biologie und Medizin überlassen.

Diese Sichtweise hat sich geändert, seit im Jahre 2001 im menschlichen Auge ein sogenannter dritter Photorezeptor nachgewiesen wurde, welcher für direkte biologische Lichtwirkungen verantwortlich ist. Die übliche Anwendung von künstlichem Licht bzw. Tageslicht ist damit eng mit den biologischen Wirkungen verbunden. Jede Beleuchtung zu jeder Tages- oder Nachtzeit wirkt auf das biologische System des Menschen. Auch die allgegenwärtig eingesetzte Standardbeleuchtung und sogar die Dunkelheit als vermeintlich „lichtlose“ Zeit haben Wirkungen auf die Biologie des Menschen.

2. Bedeutung für die Beleuchtungspraxis

Diese neuen Erkenntnisse sind bisher nur ansatzweise in die Beleuchtungsplanung eingeflossen. Der FNL 27 hat sich die Aufgabe gestellt, die normativen Voraussetzungen dafür zu schaffen, dass dies in Zukunft verstärkt möglich ist. /1/ Die biologischen Lichtwirkungen sollten bei der Beleuchtung von Innenräumen gleichrangig mit den bereits etablierten Qualitätsmerkmalen einer guten Beleuchtung für den Sehvorgang berücksichtigt werden können. Es ist nicht mehr ausreichend, nur gutes Licht für gutes Sehen bereitzustellen. Vielmehr wird das richtige Licht zur richtigen Zeit zur Unterstützung und Aufrechterhaltung wichtiger biologischer Funktionen benötigt. Die Beleuchtung - gleich ob mit Tageslicht oder künstlichen Lichtquellen - sollte soweit möglich, an die biologischen Bedürfnisse des Individuums angepasst sein und falls dies nicht möglich ist, zumindest nicht im Widerspruch dazu stehen.

Biologische Lichtwirkungen treten damit aus dem rein medizinisch-therapeutischen Umfeld heraus in die alltägliche Beleuchtungspraxis. Dies hat zur Folge, dass es gleichermaßen unverantwortlich wäre diese neuen Erkenntnisse in der Praxis zu ignorieren und alles beim Alten zu belassen, als auch ohne tieferes Verständnis einfach nur eine Maximierung von biologischen Lichtwirkungen durch künstliche Beleuchtung anzustreben. Mit dem Ziel die Umsetzung dieser komplexen Thematik in die Praxis zu ermöglichen, sind im FNL 27 Experten verschiedener Fachrichtungen engagiert. Die interdisziplinäre Aufstellung umfasst neben Lichtexperten Fachleute aus den Bereichen Medizin, Biologie - insbesondere der Chronobiologie -, Schlafforschung, Psychologie und anderen humanwissenschaftlichen Fakultäten.

3. Standardisierung und Normung

Der FNL 27 hat es sich zum Ziel gesetzt, den über die lichtempfindlichen Ganglienzellen in der menschlichen Netzhaut vermittelten biologischen Wirkungen des Lichts (hier immer kurz „biologische Wirkungen“ genannt) einen Stellenwert in der nationalen und langfristig auch internationalen Normung zu verschaffen, der sich an der Bedeutung orientiert, die diese Wirkungen für Gesundheit, Wohlbefinden, Leistungsvermögen und Konzentration haben.

Inzwischen wurde über das für Licht und Beleuchtung zuständige europäische Normungsgremium CEN/TC 169 die Arbeitsgruppe WG 13 gegründet, die sich auf europäischer Ebene der Thematik angenommen hat. Der FNL 27 ist das Spiegelgremium der WG 13. In beiden Gremien wird die Normungsarbeit mit gleicher Zielsetzung auf Deutscher und Europäischer Ebene betrieben. Einzelne Mitglieder beider Gruppen arbeiten ebenfalls in Arbeitsgruppen der Internationalen Beleuchtungskommission CIE mit, so dass auch auf globaler Ebene eine gute Vernetzung gegeben ist.

Mit der Erstellung der DIN V 5031-100 „Strahlungsphysik im optischen Bereich der Lichttechnik – Teil 100: Über das Auge vermittelte, nichtvisuelle Wirkung des Lichts auf den Menschen – Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren“ hat der FNL 27 im ersten Schritt die Grundlage für eine einheitliche Bewertung von Lichtquellen hinsichtlich ihrer biologischen Wirkungen geschaffen.

Darüber hinaus erarbeitet der FNL 27 ein Dokument für die richtige Umsetzung der Erkenntnisse in die Praxis.

4. Planung biologisch wirksamer Beleuchtung

Die Anwendungsgebiete für biologisch wirksame Beleuchtung sind sehr vielschichtig und umfassen nahezu alle Bereiche des täglichen Lebens, so dass diese Planungsaufgaben dazu in einem ganzheitlichen Umfeld zu sehen sind.

Biologisch wirksame Beleuchtung ist nämlich nur dann sinnvoll, wenn sie mit den biologischen Abläufen im Körper im Einklang ist. Eine Orientierung der Lichtdynamik an der circadianen Rhythmik der Nutzer ist daher erforderlich.

Da bei dynamischen Beleuchtungssystemen für biologische Lichtwirkungen im Allgemeinen sowohl Beleuchtungsstärken als auch Farbtemperaturen dynamisch geändert werden, sind Einzelfaktoren, wie z.B. harmonische Kontrastverhältnisse und die Lichtwirkung im Raum, in stärkerem Maße zu berücksichtigen, als bei einer herkömmlichen normgerechten Lichtplanung. Für hohe biologische Wirksamkeit sollen vertikale Beleuchtungsstärken mit indirekter Beleuchtung unter Einbeziehung größerer Flächen bei eher niedrigen Leuchtdichten erzeugt werden. Für ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Umgebungsleuchtdichten ist zu sorgen. Gleichzeitig ist bei den eingesetzten Materialien darauf zu achten, dass der von der Lichtquelle zur Verfügung gestellte erhöhte Blauanteil nicht durch ungeeignete Materialien in der Leuchte oder im Raum wieder absorbiert wird. Reflexions- und Transmissionseigenschaften von Materialien, sowie die Alterungsbeständigkeit von Kunststoffen unter Einwirkung von Licht mit höherem Blauanteil bei erhöhten Temperaturen sind dabei zu beachten. In der Planung sind auch die Flächengrößen, Leuchtdichten und Raumwinkel, unter denen Lichtquellen besonders wirksam sind, zu berücksichtigen. Hinweise zum Timing sind ebenfalls zu beachten.

Dazu ist eine integrierende Planung der Beleuchtung für alle Lebensräume, die Arbeitsstätten als auch Nichtarbeitsstätten sein können, notwendig. Die biologischen Wirkungen von Licht sind dabei von Anfang an gesamtheitlich und im interdisziplinären Kontext einzubeziehen. Die zusätzliche Nutzung von Tageslicht ermöglicht dabei energieeffiziente Lösungen in der Planung und Anwendung biologisch wirksamen Lichts.

Da in der Innenraumbeleuchtung die Verhältnisse der natürlichen Beleuchtung nicht exakt nachgebildet werden können und sollen, muss eine integrierende Planung unter Nutzung der verfügbaren Technologien zu geeigneten Beleuchtungslösungen führen.

Durch biologisch wirksame Beleuchtungsanlagen können planerisch folgende Zielgrößen positiv beeinflusst werden:

- Stabilisierung des individuellen circadianen Rhythmus
- Zeitliche Gestaltung des Schlaf-Wach-Rhythmus (Synchronisieren an den 24-stündigen Tag-Nacht-Zyklus)
- Stärkung der Amplitude der biologischen Uhr
- Aktivierung und Verbesserung der Konzentration
- Stabilisierung der Leistungsbereitschaft und Senkung der unmittelbaren Müdigkeit
- Ermöglichen und Fördern der Regeneration
- Verbesserung der Stimmungslage (z.B. Vermeiden von Depressionen)
- Stärkung des Immunsystems

Aus gesundheitlicher Sicht dürfen biologische Wirkungen nicht pauschal maximiert werden. Der Mensch als biologisches Wesen braucht Ruhephasen. In diesen soll Licht mit geringer biologischer Wirkung eingesetzt werden. Durch den in der Natur vorgegebenen Rhythmus sind diese Ruhephasen vorzugsweise in der Nacht.

Je nach Aufgabenstellung ist zu prüfen, welche Faktoren die biologische Lichtwirkung beeinflussen, damit diese in der Planung angemessen angewendet werden. Bekannt ist ein Einfluss der folgenden Parameter:

	Höhere biologische Wirkung wird erzeugt durch	**Geringere biologische Wirkung wird erzeugt durch**	**Erläuterungen**
a)	höhere Bestrahlungs-stärke	geringere Bestrahlungs-stärke	Höhe der biologisch bewerteten Strahlung (vgl. DIN V 5031-100).
b)	längere Dauer der Exposition	kürzere Dauer der Exposition	
c)	höhere Blauanteile	geringere Blauanteile	Die kurzwelligen Spektralanteile des Lichts haben eine größere biologische Wirkung. Für weißes Licht ist die biologische Wirksamkeit mit der Farbtemperatur positiv korreliert.
d)	flächiges Licht	punktförmiges Licht	Großflächiges Licht wird oft durch indirekte Beleuchtung erzeugt. Licht das von oberhalb der Blickrichtung ins Auge gelangt, ist wirksamer als Licht von unterhalb.

e)	dynamische Lichtänderungen	konstantes Licht	Zeitliche Änderungen der Beleuchtungsstärke, der Spektren, der Lichtverteilung und der Lichtrichtung.
f)	geringe Bestrahlungsstärke vor der betrachteten Lichtexposition		Längere Zeit dunkel adaptierte Personen sind lichtempfindlicher und reagieren auf die Lichtexposition stärker. Daher sind auch Dunkelphasen bedeutsam für die biologische Wirkung des Lichts (Lichthistorie).
g)	Licht am Morgen ist am wirksamsten zur Synchronisierung der inneren Uhr.	Licht am Nachmittag hat eine eher geringe Wirkung auf die innere Uhr.	Phasenverschiebungen mittels Licht sind um den Zeitpunkt des Minimums der Körperkerntemperatur am wirksamsten – gegen Ende der Schlafphase.

Tabelle 1 – Faktoren, die biologische Lichtwirkungen grundsätzlich erhöhen oder verringern können

In dem Arbeitspapier des FNL 27 werden einzelne Kriterien für biologisch wirksame Beleuchtung beschrieben und erläutert.

Bei der Planung biologisch wirksamer Beleuchtung sind vor Allem Räume zu berücksichtigen, in denen sich Menschen regelmäßig über längere Zeit aufhalten, wie bspw. Büros, Konferenzräume, Klassenräume, Wartebereiche oder Patientenzimmer. Vernachlässigbar sind dagegen Treppenhäuser, Nebenräume, Materiallager oder Parkgaragen. Auch die Beleuchtungsplanung von Außenanlagen kann – neben denen störender Lichtimmissionen – auch Abwägungen zur biologischen Wirksamkeit erfordern.

Je nach Aufgabenstellung und Nutzung stellen sich komplexe Anforderungen an die Planung biologisch wirksamen Lichts. Die Lichtplanung ist deshalb derart zu gestalten, dass den Anforderungen des Menschen in Bezug auf Sehen, Wohlfühlen und biologische Wirkungen möglichst umfassend entsprochen wird. Die Planung biologischer Wirkungen des Lichts stellt neue, besondere und fachgebietsübergreifende Anforderungen.

Es ist allerdings nicht Aufgabe der künstlichen biologisch wirksamen Beleuchtung, das Tageslicht in allen Eigenschaften komplett nachzubilden. Bei der Planung sind vielmehr die für den Aufenthalt in Innenräumen wesentlichen Komponenten zur Verfügung zu stellen. Nach allgemeinem heutigen Verständnis sollte dabei in der Allgemeinbeleuchtung die fehlende UV-Strahlung oder reduzierte Infrarot-Strahlung nicht nachgebildet werden.

Soweit die Planung einer biologisch wirksamen Beleuchtung „Arbeitsstätten“ betrifft, sind hier zunächst die in ASR 3.4 bzw. DIN EN 12464-1 beschriebenen numerischen Werte einzuhalten. Je nach Objekt kann es erwünscht oder sogar notwendig sein, über diese Mindestanforderungen hinauszugehen, wenn biologische Wirkungen erzielt werden sollen.

Mit den Informationen zur „Planung spezieller Objekte“ wird in den Arbeitspapier des FNL 27 auf einzelne Anwendungen und deren Besonderheiten in Bezug auf die Planung biologisch wirksamer Beleuchtung eingegangen.

Das Arbeitspapier legt keine Anforderungen hinsichtlich einer beabsichtigten Verschiebung der circadianen Phase mit Licht fest und enthält lediglich allgemeine Planungshinweise für Arbeitsplätze mit Schichtarbeit. Hinsichtlich der medizinischen Behandlung mit Licht werden keinerlei Hinweise gegeben, da dies nicht Inhalt von Lichtplanung ist.

5. Zusammenfassung

Licht ist für die Gesundheit und das Wohlbefinden der Menschen entscheidend. Die Wirkung von Tageslicht oder von geeigneter künstlicher Beleuchtung zur Stabilisierung des circadianen Rhythmus, d.h. der inneren Uhr, ist unumstritten. /2//3/ Ziel der integrierenden Planung von Licht ist es, die verschiedenen Aspekte für eine gute Beleuchtung in Bezug auf visuelle und nichtvisuelle Wirkungen – auch unter Gesichtspunkten der Energieeffizienz – miteinander zu vereinen und so einen günstigen Einfluss auf Leistungsvermögen und Konzentration in den aktiven Phasen und eine nachhaltige Verbesserung der Regeneration in den Erholungsphasen zu haben.

6. Literatur:

/1/ D. Lang, Statement des FNL 27 zur Eröffnung des 6. DIN-Expertenforums, Tagungsband 6. DIN-Expertenforum, Berlin, Beuth-Verlag, Berlin

/2/ CIE: Ocular Lighting Effects on Human Physiology and Behaviour. Report Nr. 158 (2009).

/3/ IESNA: Light and Human Health: An Overview of the Impact of Light on Visual, Circadian, Neuroendocrine and Neurobehavioral Responses. Product ID: TM-18-08 (2008).

Entscheidungskriterien für Lichtmanagement
– ein Bericht zum Sachstand

Dipl.-Ing. Peter Dehoff
Zumtobel Lighting GmbH
Schweizerstr. 30
A-6851 Dornbirn
Fon:+43 5572 390 687
Email : peter.dehoff@zumtobel.com

Es gibt vielfältig Gründe, sich für ein Lichtmanagement zu entscheiden. Häufig wird die Anbindung an das Tageslicht genannt und die dabei erzielbaren Energieeinsparungen für die künstliche Beleuchtung. Ein weiteres Argument zur Energieeinsparung ist die präsenzabhängige Steuerung. Weniger verbreitet, aber bereits in der EN 15193 vermerkt, ist die Konstantlichtsteuerung.

Zusätzlich ergeben sich geradezu zwangsläufig Möglichkeiten, die Qualität der Beleuchtung durch Lichtmanagement zu verbessern.

Lichtmanagement liefert den einzigen Schlüssel, die verschärften Anforderungen der Energieeinsparverordnung (EnEV 2012) zu erfüllen.

Bereits in der noch heute geltenden EnEV 2009 sind Präsenzmelder sowie für etliche Gebäude auch Konstantlichtregelungen vorzusehen. Im umlaufenden Referentenentwurf für die EnEV 2012 werden die Anforderungen nach Lichtregelung noch weiter verschärft.

In der CIE befasst sich seit 2009 das TC 3-49 (Decision schemes on lighting controls) mit ca. zwanzig Mitarbeitern mit der Auflistung der Kriterien, die für Lichtsteuerungen sprechen.

Ziel ist, einen Leitfaden zu erstellen, der die Entscheidungskriterien darstellt, um Lichtqualität, Nutzerkomfort und Energieeffizienz in professionellen Lichtlösungen zu ermöglichen.

Dieser Leitfaden soll neutral und objektiv als Entscheidungsgrundlage herangezogen werden für Bauherrn und Planer, aber und vor allem für politische Gremien, die sich mit Lösungen zum Klimawandel befassen.

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, indviduell 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 Anwesenheitsensor und einen Schalter voraus

8 Konstantlicht (ohne Tageslicht): Konstanthalten eines Lichtstromes zum Ausgleich des Rückgangs, der sich bei der Alterung ergibt. Stellsignal liefert eine vorgegeben 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

Nutzerakzeptanz und Energieeffizienz:

Die verschiedenen Strategien mögen aus einer planerischen Sicht einen großen Nutzen bringen, sie müssen aber auch von den Nutzern akzeptiert werden. Etliche Feldstudien haben sich mit der Akzeptanz durch den Nutzer befasst.

Eine Vorgabe ist dabei, dass jede angerufene Stimmung manuell übersteuert werden können sollte. Dies erschwert aber im Vergleich zu automatisierten Prozessen die Errechnung der Kennzahlen für eine mögliche Energieersparnis, deren Ermittlung eine der größten Herausforderungen mit vielen Unbekannten ist.

So werden energieeffizient denkende Menschen in diesen Berechnungssystemen zu wenig berücksichtigt. Möglichst kleine Leuchtengruppen haben die Konsequenz, dass die Lichtsituation individuell und bedarfsgerecht manuell beeinflusst werden kann. Große Räume mit mehreren Leuchtengruppen lassen diesen Ansatz nicht zu, weil eine Abstimmung zwischen zu vielen Nutzern der Beleuchtungsanlage schwer möglich ist. Daher müssen kleinere Leuchtengruppe und Bediengeräte für eine spontane Beeinflussung in unmittelbarer Nähe des Nutzers installiert werden.

Prognosen für den Energieverbrauch werden durch wechselnde Wettersituationen und nicht vorhersehbares Nutzerverhalten erschwert. Die Nachlaufzeit von Anwesenheitssensoren hat ebenfalls einen Einfluss.

Die dynamischen Änderungen der Arbeitswelt und Gebäudenutzung werden aufgrund der Komplexität in vielen Feldstudien von verschiedenen Branchen immer wieder untersucht und gemessen. Menschen sind letztendlich schwerer prognostizierbar als technisch definierte Werte im Rahmen eines Lichtmanagementsystems.

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

Die Entscheidung für ein Lichtmanagementsystem sollte in einer möglichst frühen Projektphase fallen. Lichtmanagement ist Teil der Gebäudeleittechnik. Oft fällt das Lichtmanagement in ein anderes Budget als die Beleuchtungsanlage.
Die Auswahl und die Anordnung der Leuchten soll es möglich machen, dass verschiedene gestalterische Lichtstimmungen auswählbar sind.
Die Lage der Bediengeräte, die Anordnung der Leuchten und insbesondere die Berücksichtigung des Tageslichtes sollte ganzheitlich geplant werden. Service und langfristige Betreuung der Lichtmanagementanlage gewährleistet den geplanten Nutzen.

Autor ist Peter Dehoff, Vertreter Österreichs in CEN TC 169, Vorsitzender der CEN TC 169 WG 2 und Vorsitzender des FNA 047, Licht und Optik sowie der Vorsitzende der CIE Austria und des TC 3-49

Kenngrößen der Farbqualität in der Innenraumbeleuchtung

PD Dr.-Ing. habil. Peter Bodrogi (TU Darmstadt), Dipl.-Ing. Stefan Brückner (TU Darmstadt), Dr. Holger Winkler (Merck KGaA), Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh (TU Darmstadt)

1 Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag beschreibt ein Experiment mit einem durch drei unterschiedliche Innenraumlichtquellen (Glühlampe, Kompaktleuchtstofflampe und weiße LED) beleuchteten Stillleben mit unterschiedlichen farbigen Objekten, die nach den verschiedenen Aspekten der Farbqualität (Helligkeit, Farbpräferenz, Farbharmonie, Farbkategorien, Farbgamut, Farbübergänge, Farbunterschiede, Gedächtnisfarben und Farbwiedergabe) von Versuchspersonen auf kontinuierlichen Skalen visuell bewertet wurden. Anhand dieser Bewertungen wurden die relevantesten Hauptfaktoren der Farbqualität (Farbwiedergabe, Farbpräferenz und Helligkeit) erfasst, und die durchschnittlichen Hauptfaktoren der Farbqualität für die drei Innenraumlichtquellen berechnet. Die drei untersuchten Lichtquellen weisen - je nach Farbqualitätsfaktor (Farbwiedergabe, Farbpräferenz oder Helligkeit) – unterschiedliche Rangordnungen auf.

2 Einleitung

Eine Beleuchtungsstärke von größer als ca. 600 lx sichert eine für die allgemeine Innenraumbeleuchtung (z.B. Bürobeleuchtung) annehmbare Sehleistung (Sehschärfe, Lesbarkeit, Kontrastwahrnehmung). Die Auswahl einer für die angegebene Anwendung geeignete Lichtquelle geschieht momentan – neben der räumlichen Lichtverteilung und der Blendungsfreiheit – aufgrund des Weißpunktes, z.B. 2700 K für Wohnungen und 4000 K oder 6500 K für Büros. Die verschiedenen Leuchtstoffmischungen moderner weißer leuchtstoffkonvertierter Leuchtdioden bieten gegenwärtig allerdings eine hervorragende neue Möglichkeit, einen vorgegebenen Weißpunkt mit mehreren unterschiedlichen relativen spektralen Strahldichteverteilungen (Emissionsspektren) zu erreichen.

So besteht die Forschungsfrage darin, wie die verschiedenen Aspekte der Farbqualität (z. B. Farbwiedergabe, Farbharmonie, Farbpräferenz, Farbdiskrimination, Farbgamut, usw.) identifiziert und in einem Probandenversuch mit Hilfe eines Stillleben-Aufbaus mit mehreren gezielt ausgewählten farbigen Objekten und eines effektiven Fragebogens visuell skaliert werden können.

Die Versuchsperson muss jeden Aspekt der Farbqualität anhand des gleichen Stilllebens unter den gleichen Testlichtquellen in der gleichen Sitzung bewerten, indem sie jeden Aspekt getrennt und in der Synopse aller Aspekte betrachtet. In diesem Fall ist es möglich, positive oder negative Korrelationen unter den Aspekten der Farbqualität zu finden, und eine möglichst geringe Anzahl von Hauptfaktoren der Farbqualität der Lichtquellen der Innenraumbeleuchtung zu bestimmen [1].

Die Kenngrößen der Farbqualität wurden von zahlreichen Autoren untersucht. So arbeiteten z.B. Nakano et al. [2] mit 18 semantischen Unterschiedsskalen der Farbqualität. Er setzte aber keine realen Objekte sondern eine Bildschirmsimulation ein. Laut Meinung der Autoren der vorhandenen Arbeit ist Letzteres – z. T. auch wegen der kognitiven

Teilmechanismen der Farbkonstanz – unrealistisch. Der in diesem Artikel beschriebene Stillleben-Aufbau [1] stellt eine realistischere Situation dar.

Etliche Aspekte von den oben erwähnten Kenngrößen der Farbqualität wurden von zahlreichen Autoren untersucht. Es fehlte allerdings eine systematische Untersuchung aller relevanten Aspekte der Farbqualität mit realen Testobjekten und einem allumfassenden Fragebogen, wo die gleichen Versuchspersonen alle Aspekte synoptisch skalieren müssen.

Dementsprechend werden in dieser Arbeit die folgenden Forschungshypothesen untersucht: 1. Es bestehen signifikante Korrelationen (sowohl negativ als auch positiv) unter den Variablen (visuellen Skalenwerten) der Farbqualität, wodurch sich eine begrenzte Anzahl von Hauptfaktoren ableiten lässt; 2. Die Rangordnungen der Farbqualität der drei untersuchten Lichtquellen (Glühlampe, Leuchtstofflampe und weiße LED) sind für die verschiedenen Hauptfaktoren i. A. unterschiedlich und 3. Die Mehrheit der Testpersonen liefert eine gemeinsame Tendenz der Antworten.

3 Untersuchungsmethodik

Am Fachgebiet Lichttechnik der TU Darmstadt wurde in einem Beobachtungskasten (sog. Stillleben-Aufbau, s. Abb. 1) ein Stillleben [1] aus mehreren farbigen Objekten (künstliches Obst und Gemüse, Puppen, ColorChecker-Farben, Textilien, Spielzeug, Bücher) erstellt. Die 30 Versuchspersonen bewerteten die farbigen Objekte des Stilllebens unter den drei gängigen Haupttypen der Innenraumbeleuchtung: Glühlampe (INC, Referenz, R_a=100), Kompaktleuchtstofflampe (CFL, Testlichtquelle, R_a=84) und weiße LED (LED, Testlichtquelle, R_a=89), s. Abb. 2.

Alle Lichtquellen hatten eine ähnlichste Farbtemperatur von ca. 2600K. Ein Weißstandard befand sich in der Mitte des Stilllebens, der für alle Lichtquellen eine Leuchtdichte von 107±6 cd/m^2 aufwies. Die drei Lichtquellen wurden abwechselnd eingeschaltet. Die Testperson skalierte - unter jeder Lichtquelle - auf kontinuierlichen Skalen [3] zwischen 0 und 100 (bei manchen Fragen: zwischen 0 und unbegrenzt) auf einem Papier-Fragebogen die folgenden neun Aspekte der Farbqualität [1]: Helligkeit, Farbpräferenz, Farbharmonie, eindeutige Farbkategorien, Farbgamut, Kontinuität der Farbübergänge auf den Oberflächen der Objekte, Wahrnehmbarkeit der kleinen Farbunterschiede, Annehmbarkeit der Farberscheinung im Vergleich zu Gedächtnisfarben sowie die Farbwiedergabe im Vergleich zur Referenzlichtquelle. Die ermittelten Skalenwerte wurden – in der vorherigen Reihenfolge - als numerische Variablen V_1-V_9 aufgefasst.

Abb. 1: Stillleben-Aufbau [1] zur Erfassung der Farbqualität der Lichtquellen der Innenraumbeleuchtung

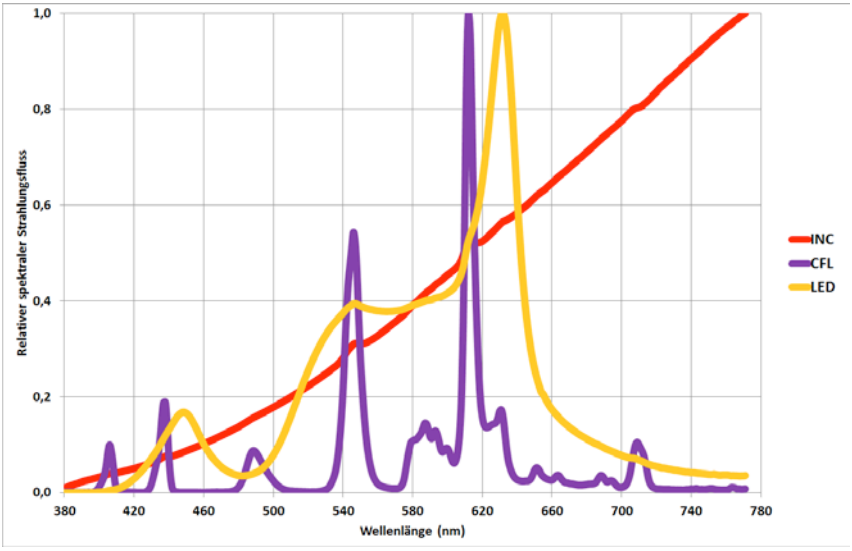


Abb. 2: Relativer spektraler Strahlungsfluss der drei Lichtquellen: Glühlampe (INC, Referenz, Ra=100), Kompaktleuchtstofflampe (CFL, Testlichtquelle, Ra=84) und weiße LED (LED, Testlichtquelle, Ra=89) [1]

4 Ergebnisse

Der Datensatz von 810 Werten der Variablen V_1-V_9 (9 Skalen x 30 Versuchspersonen x 3 Lichtquellen) bildeten die Eingabe für eine SPSS-Faktorenanalyse, die auf der Korrelationsmatrix {V_1-V_9} basierte. Sechs Faktoren (F_1-F_6) wurden gefunden [1], die jeweils als Farbgedächtnis, Präferenz, Helligkeit, Farbwiedergabe, Farbgamut und Farbunterschiede gekennzeichnet wurden. Die mittleren Faktoren Präferenz (F_2), Helligkeit (F_3) und Farbwiedergabe (F_4) unterscheiden sich unter den 3 Lichtquellen *signifikant* und ergeben jeweils unterschiedliche Rangordnungen für die 3 Lichtquellen, s. Abb. 3.

Es wurde durch Paarvergleiche mit Hilfe des T-Tests bestätigt (und es geht aus Abb. 3 ebenfalls hervor), dass der Faktor F_2 (Präferenz) für INC und LED höher ist, als für CFL. Der Faktor F_3 (Helligkeit) ist für die Lichtquelle LED höher, als für die Lichtquellen INC und CFL. Der Faktor F_4 (Farbwiedergabe) ist für die Lichtquelle INC höher, als für CFL und LED. Für die obigen drei Faktoren (F_2-F_4) wurden - unter den Beobachtern - jeweils drei Gruppen (sog. Cluster 1-3) gefunden. Abb. 4-6 zeigen die Angehörigkeit der einzelnen Beobachter zu den Clustern 1-3 (Abszissenachse) sowie die einzelnen Faktorenwerte des jeweiligen Beobachters (Ordinatenachse) jeweils für die Faktoren F_2-F_4.

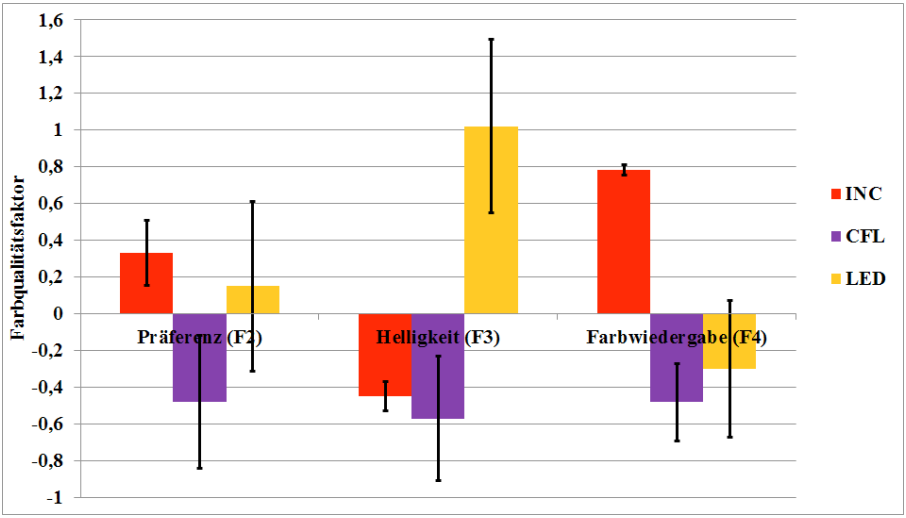


Abb. 3: Mittlere Werte und 95%-Konfidenzintervalle der Faktoren Präferenz (F2), Helligkeit (F3) und Farbwiedergabe (F4) für den ganzen Datensatz, nach Lichtquelle (INC, CFL, LED) [1]

Aus Abb. 4 (Präferenz, F_2) geht hervor, dass 15 Testpersonen zum Cluster 1 gehören, in dem i. A. CFL am schlechtesten abschneidet und LED besser als INC ist. Im Cluster 2 (8 Testpersonen) hat die Lichtquelle LED die schlechteste Bewertung. Im Cluster 3 (7 Testpersonen) hat CFL die schlechteste Bewertung und INC ist besser als LED.

Aus Abb. 5 (Helligkeit, F_3) geht hervor, dass 10 Testpersonen zum Cluster 1 gehören, in dem i. A. LED am besten abschneidet und CFL besser als INC ist. Im Cluster 2 (19 Testpersonen) hat die Lichtquelle LED die beste Bewertung und INC ist besser als CFL. Im Cluster 3 (1 Testperson) hat INC die beste Bewertung.

Aus Abb. 6 (Farbwiedergabe, F_4) geht hervor, dass 14 Testpersonen zum Cluster 1 gehören, in dem i. A. INC am besten abschneidet und LED besser als CFL ist. Im Cluster 2 (3 Testpersonen) hat die Lichtquelle LED die beste Bewertung. Im Cluster 3 (13 Testpersonen) hat INC die beste Bewertung und CFL ist besser als LED.

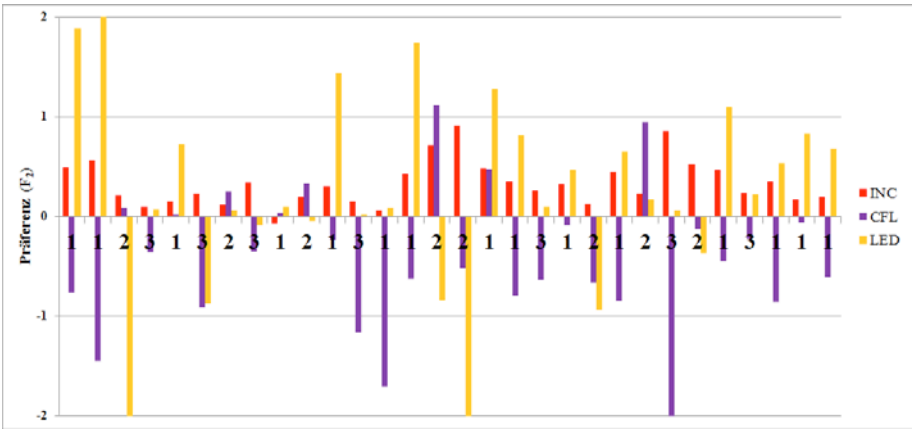


Abb. 4: Angehörigkeit der einzelnen Beobachter zu den Clustern 1-3 (Abszissenachse) sowie die einzelnen Faktorenwerte des jeweiligen Beobachters (Ordinatenachse) für den Faktoren F_2 (Präferenz) [1]

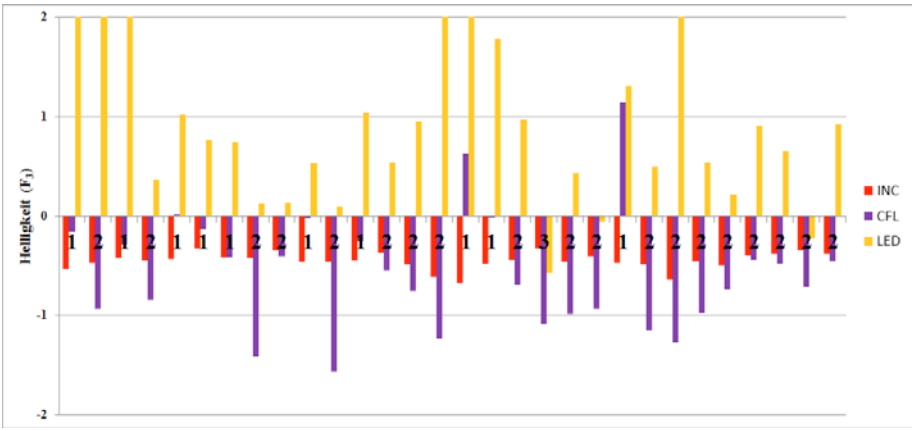


Abb. 5: Angehörigkeit der einzelnen Beobachter zu den Clustern 1-3 (Abszissenachse) sowie die einzelnen Faktorenwerte des jeweiligen Beobachters (Ordinatenachse) für den Faktoren F_3 (Helligkeit) [1]

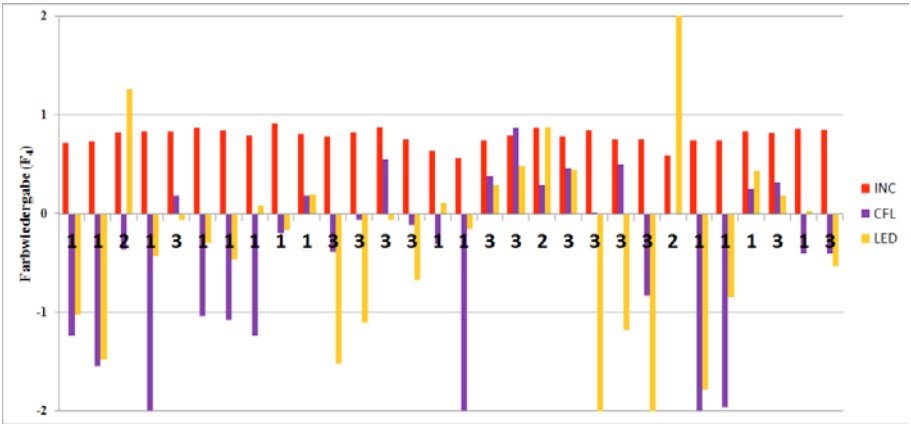


Abb. 6: Angehörigkeit der einzelnen Beobachter zu den Clustern 1-3 (Abszissenachse) sowie die einzelnen Faktorenwerte des jeweiligen Beobachters (Ordinatenachse) für den Faktoren F_4 (Farbwiedergabe) [1]

5 Diskussion

Für die praktische Anwendung der oben festgestellten Zusammenhänge unter den Farbqualitätseigenschaften ist es wichtig, diese Zusammenhänge richtig zu deuten. Es wird nämlich – trotz der Zusammenhänge - für jede Eigenschaft ein eigener numerischer Index benötigt, der die Lichtquelle in dieser Hinsicht *vollständig* charakterisiert. Eine andere Frage besteht in der Anzahl der relevanten Faktoren. In einer *rechnerischen* Analyse existierender Farbqualitätsmerkmale fanden Guo und Houser [4] *zwei* Faktoren, die den Aspekten Farbgamut und Farbwiedergabe entsprachen. In der vorhandenen *visuellen* Untersuchung zeigten sich hingegen *drei* Faktoren – Farbwiedergabe, Farbpräferenz und Helligkeit als relevant. Zur Validierung der visuellen und rechnerischen Ergebnisse werden von den Autoren weitere visuelle Tests und Berechnungen ausgeführt.

6 Fazit

In dieser Arbeit wurden die Hauptfaktoren der Farbqualität in einem visuellen Stilllleben-Experiment mit farbigen Objekten bestimmt, und die durchschnittlichen Hauptfaktoren der Farbqualität für die drei wichtigsten Typen üblicher Innenraumlichtquellen (Glühlampe, Kompaktleuchtstofflampe und weiße LED-Lampe) berechnet. Trotz der interpersonellen Streuungen kann die visuelle Rangordnung der drei Lampentypen nach Farbwiedergabe, Farbpräferenz und Helligkeit festgestellt werden. Diese drei Rangordnungen sind für die drei untersuchten Lichtquellen je nach Farbqualitätsfaktor (Farbwiedergabe, Farbpräferenz oder Helligkeit) unterschiedlich.

7 Literatur

[1] Bodrogi, P.; Brückner, S.; Khanh, T. Q.; Winkler, H.: Visual Assessment of Light Source Color Quality, *Color Res. Appl.*, Early View, 2011.

[2] Nakano Y, Tahara H, Suehara K, Kohda J, Yano T. Application of multispectral camera to color rendering simulator. In: Proc. 10th Congress of the International Color Association, Granada, pp. 1625-1628, 2005.

[3] Guilford. J. P.: Psychometric methods, New York: McGraw-Hill, 1954.
[4] Guo X, Houser KW. A review of colour rendering indices and their application to commercial light sources. *Lighting Res. Techn.* 36, pp. 183-199, 2004.

Aufmerksamkeitsäquivalent – Eine Studie zur Wirksamkeit einzelner Beleuchtungsparameter auf die Wahrnehmung und Präferenz von Kunden in einem Shop

Dipl. Ing. Birthe Tralau
Dipl. Ing. Tanja Kronibus
Dipl. Ing. Kay- Uwe Dingeldein
Zumtobel Lighting GmbH
Schweizerstr. 30
A-6851 Dornbirn
Fon:+43 5572 390 1281
Email: birthe.tralau@zumtobel.com

Prof. Jan Ejhed
Xu Haoming
KTH Royal Institute of Technology Stockholm
SE-136 40 HANDEN
Fon: +46 8 790 4854
Email: Jan.Ejhed@sth.kth.se

Prof. Dr. Roland Greule
Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW)
Finkenau 35
D-22081 Hamburg
Fon: + 49 40 42875 7664
Email: greule@mt.haw-hamburg.de

Markus Felsch
Felsch Lighting Design GmbH
Griegstraße 75 / Haus 3.2
D-22763 Hamburg
Telefon: +49 40 636 599 10
E-Mail: m.felsch@felsch.de

Carolin Fröhlich
HS Coburg

1. Problemstellung

Viele Jahre ging man davon aus, dass eine Erhöhung der Helligkeit eines Schaufensters oder eines Shops mit einer Steigerung der Aufmerksamkeit von Passanten einhergeht. Ein direkter Zusammenhang zwischen Beleuchtungsstärke und Attraktivität konnte nachgewiesen werden. Doch diese Anforderung steht in der heutigen Zeit stark im Widerspruch zu den Energieeffizienzanforderungen. Neue Wege müssen nun gefunden werden, die ebenso eine Auswirkung auf die Aufmerksamkeit potentieller Kunden bedeuten.
Ziel der vorgestellte Studie ist es ein Aufmerksamkeitsäquivalent für die Helligkeit der Verkaufsraumbeleuchtung zu finden und zu analysieren, welche Faktoren in der Shopbeleuchtung entscheidend sind, dass Kunden dort länger verweilen, mehr Kunden in die Shops kommen und sich schließlich dann für einen Kauf der Waren entscheiden.

Dabei soll gezeigt werden wie der Zusammenhang zwischen der Helligkeit, Lichtverteilung, Lichtfarbe und Kombinationen dieser auf die Attraktivität und das Kaufverhalten von Kunden in einem Shop Einfluss nehmen kann. Generell behandelt die Studie eine Anwendung, die primär sehr individuell, markenbezogen und emotional beurteilt wird. Daher ist eine wissenschaftliche Erhebung von Daten sehr schwierig. Ziel ist es daher, Methoden zu verwenden, aus denen Wahrnehmungs- und Verhaltensmechanismen abgeleitet werden können und in Hinweise für die Lichtplanung übersetzt werden können.

2. Stand der Wissenschaft / Stand der Technik

Viele Studien der Wahrnehmungspsychologie begründen die Anordnung von Waren und analysieren das generelle Blickverhalten während eines Einkaufprozesses. Kaum eine Studie zeigt die Auswirkung einzelner Beleuchtungsparameter auf das Kaufverhalten und die Verweildauer von Kunden. Die im Weiteren erläuterte Studie führt zu neuen Erkenntnissen im Bereich der Retailanwendungsforschung.

3. Forschungshypothesen

Die Studie soll zeigen, dass nicht alleine die Helligkeit eines Schaufensters oder eines Shops entscheidend ist für deren Attraktivität. Weniger ist manchmal mehr. So kann präzise eingesetztes Akzentlicht Wahrnehmungsschwerpunkte schaffen und die Aufmerksamkeit der Betrachter an sich ziehen. Neben der Attraktivität sind für den Umsatz und die Verweildauer in einem Shop aber auch das Wohlbefinden und die einfache Orientierung zwei wichtige Faktoren. Beides kann durch eine zusätzliche horizontale Beleuchtung zur vertikalen Akzentbeleuchtung ermöglicht werden.

Folgende Fragestellungen wurden im Rahmen der Untersuchung betrachtet:

- Welchen Einfluss hat die Beleuchtung, um diesen Effekt zu bekommen?
- Welche Faktoren und Kombinationen von Faktoren erzeugen die Wirkung?
- Gibt es einen Unterschied zwischen der Präferenz und Aufmerksamkeit bei den verschiedenen Faktoren?
- Gibt es unterschiedliche Präferenzen für unterschiedliche Zielgruppen (Arten von Kunden / Lifestyle)?
- Gibt es einen Zusammenhang zwischen dem Wetter / Jahreszeiten und die Bevorzugung oder Aufmerksamkeit?
- Ist die Präferenz / Aufmerksamkeit unterschiedlich für verschiedene Objekte / Materialien / Interior Design?
- Gibt es einen Unterschied für Vorzugsaktien bei unterschiedlichen Perspektiven oder Zonen in einem Geschäft? (Entfernungen)

4. Forschungsmethode(n)

Zur Überprüfung der Hypothesen wurden zwei Teilstudien durchgeführt.

4.1 Online-Befragung

Die erste Teilstudie analysiert einzelne Beleuchtungsparameter, wie Intensität, Lichtfarbe, Farbtemperatur, Lichtverteilung und Lichtrichtung und ihre Wirkung auf die Atmosphäre, das Wohlbefinden und die Präferenz der Kunden. Visualisierungen aus unterschiedlichen Raumperspektiven wurden angefertigt. Drei unterschiedliche Perspektiven kamen dabei zum Einsatz:

- Schaufenster, da hier die Entscheidung stattfindet, ob ein Shop betreten wird oder nicht

- Raumperspektive vom Eingang, die maßgeblich Einfluss auf die Orientierung und das Zurechtfinden in einem Shop hat
- Regalperspektive, da hier die tatsächliche Kaufentscheidung getroffen wird

Dabei wurde bewusst mit abstrakten Objekten in unterschiedlichen Materialitäten gearbeitet, so dass jegliche Markeneffekte ausgeblendet werden konnten. Auch die Materialien, sowie die Sättigung von Farben wurden variiert. Glänzende, transparente oder matte Oberflächen lassen die Beurteilung mit Fokus auf den Lichteffekt zu. Auf Basis dieser Visualisierungen wurden stets drei unterschiedlichen Lichtlösungen von den Probanden verglichen. Die Datenerhebung wurde mittels eines Online-Fragebogens durchgeführt. Der subjektive Vergleich unterschiedlicher Lichtlösungen zueinander wurde bewertet. Lichtlösungen konnten interaktiv optimiert oder bewertet werden. Abbildung 1 zeigt einen Ausschnitt aus dem Online Fragebogen mit drei unterschiedlichen Beleuchtungsvarianten für eine Regalperspektive.

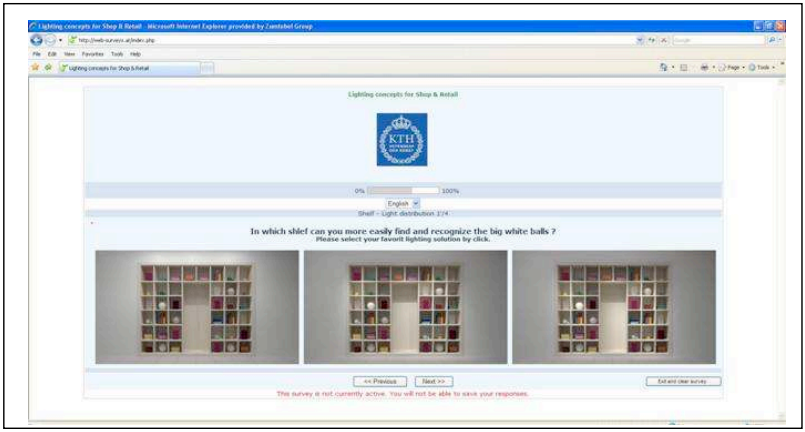


Abb.1: Online-Fragebogen zum Vergleich unterschiedlichen Lichtszenarien auf die subjektive Beurteilung

Folgende Fragetypen bzw. Skalen kamen zum Einsatz:

- Auswahlfrage (z. B. „Welche der drei Lichtlösungen gefällt Ihnen am besten?“)
- Ratingskala (z. B. „Wie zufrieden sind Sie mit der Lichtlösung?“)
- Einstellen (z. B. durch Wahl der optimalen Lichtverteilung durch manuelle Anpassung)

An der Online Befragung nahmen 97 Teilnehmer (w:50, m:47) aus Europa, Asien und auch Amerika teil.

4.2 Eye-Tracking

In der zweiten Teilstudie standen die Wirkung von Helligkeitsänderungen (Kontrastwahrnehmung), dynamischen Beleuchtungsszenarien und die Positionierung von Lichtschwerpunkten im Vordergrund. Mittels eines Eye-tracking Verfahrens konnten der erster Blick, Erkennungszeiten und die Blickdauer ermittelt und analysiert werden.
Zunächst wurden im Labor individuelle Lichtparameter isoliert betrachtet. Mittels Testtafeln, die über einen Beamer projiziert wurden die Einflussparameter auf die Wahrnehmung abstrakt erhoben. Für alle Testtafeln mit statischen Inhalten wurde nur jeweils der „erste Blick“ der jeweiligen Versuchsperson berücksichtigt. Für die Auswertung dieses ersten

Blicks wurden die Koordinaten in der Folie ermittelt, auf welche die Versuchsperson sofort nach dem Erscheinen einer neuen Folie als erstes geblickt hat.
Bei den dynamischen Änderungen wurde ermittelt, welche Änderung als erste erkannt wurde und wie viel Zeit ab Folienbeginn dieses Erkennen gedauert hat. Um die Rahmenbedingung für alle Versuchspersonen möglichst gleich zu halten, wurden die Messungen kompakt hintereinander an zwei Tagen durchgeführt. Den Versuchspersonen wurde jeweils die gleiche festgelegte Einweisung gegeben, um Beeinflussungen durch die Form der Einweisung klein zu halten. Schließlich war die Präsentation der Tafeln für alle Versuchspersonen absolut gleich. Die Testpräsentation hatte festgelegte, für alle Versuchspersonen gleichbleibende Darbietungsdauern der Testtafeln sowie der Übergänge zwischen den Testtafeln.
An dem Versuch nahmen 19 Testpersonen teil. Davon waren acht weiblich und elf männlich, im Alter von 22 bis 58 Jahren.

Abb.2: Eye-tracking im Douglas- Feldtest

Um die gewonnenen Kenntnisse aus der Laborstudie in die Praxis zu überführen, wurde im zweiten Teil eine Messung in realisierten Projekten durchgeführt.
Dafür wurden die Testpersonen mit dem Eye-tracking System ausgestatten, die sich durch den Douglas-Store in Frankenthal und dem LED-Spar-Supermakt in Murau bewegt haben. Bei den Messungen im Douglas- bzw. SPAR-Shop handelt es sich primär um eine Lokalisierung der „Points of attraction“. Die Messungen folgen der intuitiven Orientierung der Versuchsperson im Raum. Gemessen wurde mit dem SMI Eye-Tracking-System „iView X HED“, wie auch bei den anderen Messungen. Der Versuch wurde während der normalen Öffnungszeiten und im normalen Geschäftsbetrieb durchgeführt. Die Rahmenbedingungen waren für alle Versuchspersonen generell gleich, d. h. gleicher Shop, gleiche Einweisung und gleiche Aufgabe. Abbildung 2 zeigt die Probemessung im Douglas-Store.

5. Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Bisherige Erkenntnisse, die besagen, dass eine größtmögliche Helligkeit in einem Shop die Attraktivität steigert, konnten widerlegt werden. Die Studie zeigte, dass vielmehr die schwierigste Sehaufgabe, d.h. der größte Kontrast auf der Sehaufgabe, deren Detektion und Aufmerksamkeit beeinflussen. Die Kontrastwahrnehmung ist dabei abhängig von der Umgebungshelligkeit. Je heller die Umgebung ist, desto stärker muss der Kontrast

ausgeprägt sein. In dunklen Umgebungen sind bereits kleine Leuchtdichteunterschiede wirksam.
Weiterhin zeigte sich das vertikale Beleuchtungsstärken die Orientierung im Raum unterstützen und eine einfache Orientierung die Entscheidung des Betretens eines Shops unterstützt. Dabei ist ein starker Unterschied in der Bewertung von Männern und Frauen ersichtlich. Während Männer einen Verkaufsraum flächiger und ganzheitlich betrachten, schauen Frauen intensiver und detaillierter in einen Verkaufsraum.
Eine zusätzlich horizontale Beleuchtungsstärke erhöhten die Präferenz und das Wohlbefinden des Nutzers.
Die Lichtverteilung geht einher mit dem Charakter der Beleuchtung. Je kleiner und detaillierter die Lichtverteilung auf der Ware ist, desto attraktiver und exklusiver wirkt sie.
Eine Aktivierung durch Akzentlicht, aber auch durch Hinterleuchtung des unteren Drittels eines Regals führt zu einer erhöhten Wahrnehmung von diesem Bereich und damit zu einer längeren Verweildauer und mehr Umsatz

Zusammenfassung der Ergebnisse in acht Gestaltungsempfehlungen:
(1) Anstatt die Helligkeit und damit den Energieverbrauch in Shops zu erhöhen, empfiehlt es sich, eine stets kontrastreiche Beleuchtung zu planen, die die Wahrnehmung vereinfacht und die Aufmerksamkeit steigert. Um Kontraste zu schaffen, eignen sich punktuelle Akzentbeleuchtungen, die sich von der homogenen Grundbeleuchtung positiv abheben.

(2) Eine diffuse Allgemeinbeleuchtung sorgt für subjektives Wohlbefinden. Vertikale Beleuchtungsstärken unterstützen die Orientierung im Raum. Je einfacher sich die Kunden orientieren können, umso eher wird die Entscheidung begünstigt, durch einen Shop zu gehen. Daher sollte eine vertikale Beleuchtung der Raumbegrenzungen angestrebt werden. Parallel dazu sollten detaillierte Lichtakzente eingesetzt werden, die die Wahrnehmung und Attraktivität der Waren steigern.

(3) Farben vermitteln Emotionen und beeinflussen die Akzeptanz eines Raumes. Die Studienergebnisse haben belegt, dass kalte Farbtemperaturen, wie Tageslichtweiß, Räume großzügiger erscheinen lassen, warme dagegen einen kleineren, familiären Eindruck vermitteln. Neutralweißes Licht unterstützt die Verweildauer und das Wohlbefinden und sollte daher bei der Allgemeinbeleuchtung zum Einsatz kommen. Wer eine geborgene Atmosphäre seines Shops vorzieht, sollte auf warmweiße Temperaturen setzen.

(4) Innerhalb eines Beleuchtungskonzepts werden unterschiedliche Lichtfarben bevorzugt. Verschiedene Farbtemperaturen zwischen Allgemeinbeleuchtung und vertikaler Beleuchtung sollten daher bewusst eingesetzt werden. Besonders die moderne LED-Leuchtentechnologie Tunable White, die einen Farbtemperaturwechsel mittels Steuerungssystemen möglich macht, kommt hierbei zum Tragen.

(5) Es existieren Wahrnehmungsunterschiede nach Geschlecht, Alter und Käuferschichten: Während Männer einen Verkaufsraum z. B. eher großflächig betrachten, achten Frauen auf Details. Daher ist es wichtig, Lichtrichtung, Lichtfarbe und Lichtintensität über den Tag hinweg dynamisch an das Zielgruppenverhalten anzupassen.

(6) Oftmals sind die Schaufenster der erste Berührungspunkt des Kunden mit dem Shop: Zum Tageslicht hinzu geschaltete Akzentbeleuchtung auf die Waren wird hierbei bevorzugt. Dabei kommt es ebenfalls darauf an, durch punktuelle Hervorhebungen das Kontrastempfinden zu verstärken. Am Abend und bei wenig Tageslicht reichen schon

geringe Beleuchtungsstärken aus, um mit einer flächigen und sich subtil verändernden Grundbeleuchtung Aufmerksamkeit und Neugier bei den Passanten zu wecken.

(7) Die Eye-Tracking-Studien bei Douglas und SPAR haben belegt, dass insbesondere die unteren Bereiche von Regalen nicht wahrgenommen werden. Die gezielte Akzentuierung oder dynamisches Licht im unteren Drittel eines Regals führt zu einer längeren Verweildauer der Kunden und einer möglichen Umsatzsteigerung. Grundsätzlich empfiehlt sich eine regalintegrierte Beleuchtung in allen Ebenen.

(8) Auch die Lichtlenkung in Regalen ist entscheidend: Eine flächige Hinterleuchtung von Regalen wirkt attraktiver als die ausschließliche Akzentbeleuchtung. Eine Kombination aus beidem unterstützt die Warenerkennung und erhöht die Attraktivität der inszenierten Waren.

6. Diskussion und Ausblick

Die Studie hat gezeigt, wie subjektiv die Faktoren Helligkeit, Lichtverteilung und Lichtfarbe auf die Attraktivität und das Kaufverhalten von Kunden in einem Shop Einfluss nehmen. Ebenso wurde die Wahrnehmung von Probanden in einer virtuellen Umgebung mit wechselnden Lichtverhältnissen gemessen. Es zeigt sich generell wie schwierig es ist, bei einer derart individuellen, markenbezogenen und emotionalen Anwendung eine Erhebung zur Lichtwirkung durchzuführen. Trotz der Schwierigkeit konnte nachgewiesen werden, dass es nicht nur der hellste Punkt ist, der die Blicke von Passanten anzieht und damit die Wahrnehmung beeinflusst, sondern dass es vor allem auf die Kontraste in einem Schaufenster oder Shop ankommt. Die Lösung erscheint auch in der Praxis praktikabler, vor allem wenn es um eine Maßnahme zur Reduktion des Energieverbrauches kommt. Alternative Maßnahmen und Vorschläge sind innerhalb der Studie entwickelt worden. In einem nächsten Schritt müssen die definierten Grundsätze in der realen Anwendung mit mehr Testpersonen und unter kontrollier- bzw. vergleichbaren Lichtsituation untersucht werden. Auch die Kombination bzw. die Zusammenhänge aus den bisherigen Einzelparametern sollte untersucht werden. Dynamische Lichtlösungen bieten den Vorteil, die Lichtsituation an die jeweilige Situation individuell anzupassen.

Referenzen

- Underhill, Paco: Warum wir kaufen? – Die Psychologie des Konsums
- Schönhammer, Rainer: Einführung in die Wahrnehmungspsychologie – Sinne, Körper, Bewegung
- Shops + Stores (04/2006): Mehr Licht = Mehr Umsatz? (EHI)
- E. Bruce Goldstein: Wahrnehmungs- Psychologie der Grundkurs, Spektrum Akademischer Verlag, Nachdruck 2010 der 7. Auflage, 2008
- Gretz, Friedrich: Läden richtig planen – Fehler vermeiden
- Wahrnehmungsorientierte Shop-Studie: HAW Hamburg + Diplomarbeit Felsch
- Sasha Homburg Diplomarbeit: Wahrnehmungsorientierte Lichtplanung – mehr (Energie-) Effizienz in der Verkaufsraumbeleuchtung (TU Ilmenau)

Untersuchungen an LED-Leuchten im Bürobereich

Cornelia Vandahl
Ingo Herzog
Karin Bieske
Christoph Schierz
TU Ilmenau
Fachgebiet Lichttechnik
Prof.-Schmidt-Str. 26
98693 Ilmenau
(03677) 69-3732

Aleš Markytán
OSRAM
Opto Semiconductors GmbH
Leibnitzstr. 4
93055 Regensburg
(0151) 16255557

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13N10752 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

1. Einleitung

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

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

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

Forschungshypothesen:

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

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

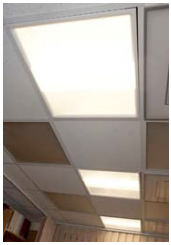
3. Das gewünschte Helligkeitsniveau wird aufgrund des abweichenden Spektrums anders bewertet.

2. Versuchsaufbau

In einem Testraum (6,6 m x 4,2 m, Höhe 2,8 m) wurden 5 LED-Leuchten-Systeme und 2 Rasterleuchten-Systeme mit Leuchtstofflampen installiert. Je drei Leuchten eines Systems beleuchteten dabei eine Raumzone. Die Beleuchtungsstärke betrug in der Nutzebene 500 lx im ganzen Raum und wurde durch Dimmen (PWM) der Leuchen eingestellt. Außerhalb der zu bewertenden Zone wurde das Beleuchtungsniveau durch zusätzliche blendfreie Leuchten auf 300 lx eingestellt, damit immer der ganze Raum beleuchtet wurde. Die Farb-

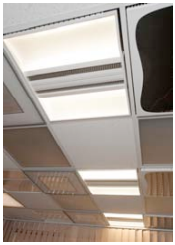
temperatur betrug bei allen Leuchten etwa 4000 K (Ausnahme: Leuchte L2: 3500 K). Abb. 1 zeigt alle untersuchten Leuchten, die in Tab. 1 beschrieben sind.

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

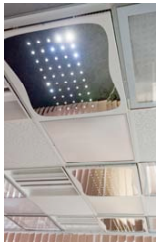


Leuchte L1

Leuchte L2

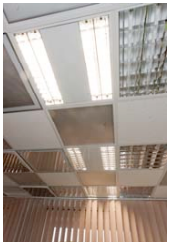


Leuchte L3

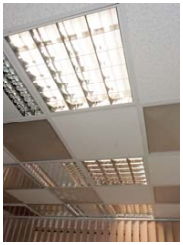


Leuchte L4

Leuchte L5



Leuchte L6 (Referenz)



Leuchte L7

Abb. 1: Untersuchte Leuchten

Tab. 1: Übersicht über die untersuchten Leuchten

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

3. Untersuchungsmethode

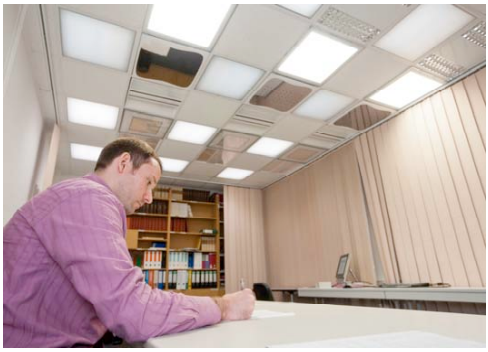


Abb. 2: Schreibarbeitsplatz im Testraum. Im Hintergrund ist der Bildschirm-Arbeitsplatz zu sehen.

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

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

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

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

4. Ergebnisse

4.1 Übersicht

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

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

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

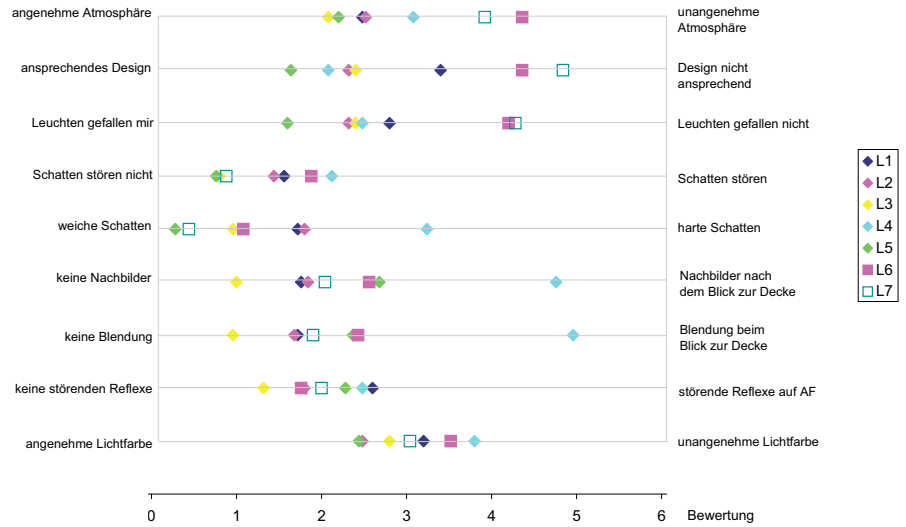


Abb. 4: Rangfolge der Bewertung, dargestellt ist jeweils der Mittelwert der Bewertung

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

4.2 Helligkeitsniveau

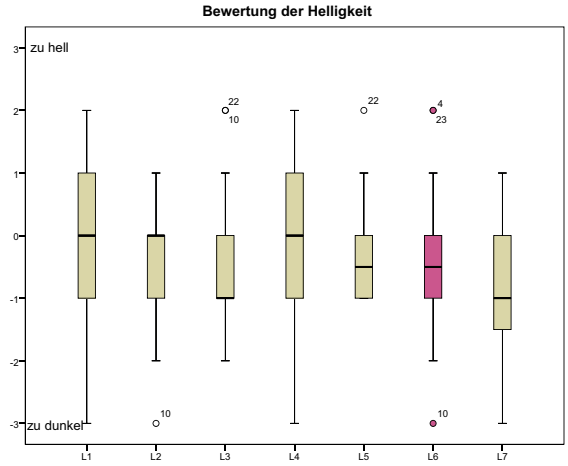


Abb. 5: Median und Boxplot der Bewertung der Helligkeit

Für alle untersuchten Leuchten wurde das Beleuchtungsniveau zunächst mit 500 lx vorgegeben. Diese Situationen wurden von den Probanden auch in etwa gleich hell bewertet. Es ergab sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Leuchten. Die Bewertung liegt im Bereich „hell genug“ bis „etwas zu dunkel“ (Abb. 5).

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

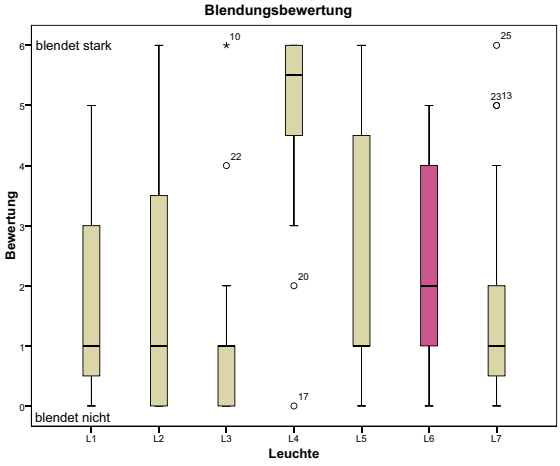


Abb. 6: Median und Boxplot der Blendungsbewertung beim direkten Blick in die Leuchte

4.3 Blendungsbewertung

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

Beim direkten Blick in die Leuchte wird bei den Leuchten L4 und der Hälfte der Testpersonen auch bei Leuchte L5 die Blendung als „deutlich“ bzw. „stark“ bewertet (Abb. 6). Die Blendungsbewertung der Leuchte L4 unterscheidet sich signifikant von der der Referenzleuchte L6. Hier wirkt sich aus, dass über die Optik direkt in die LED gesehen werden kann. Für diese Konstellation würde sich rechnerisch ein UGR-Wert von etwa 50 ergeben.

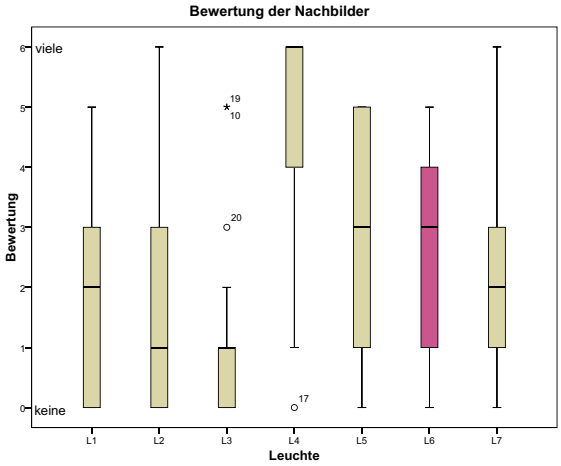


Abb. 7: Median und Boxplot der Bewertung der Nachbilder nach dem direkten Blick in die Leuchte

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

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

4.4 Bewertung der Lichtfarbe

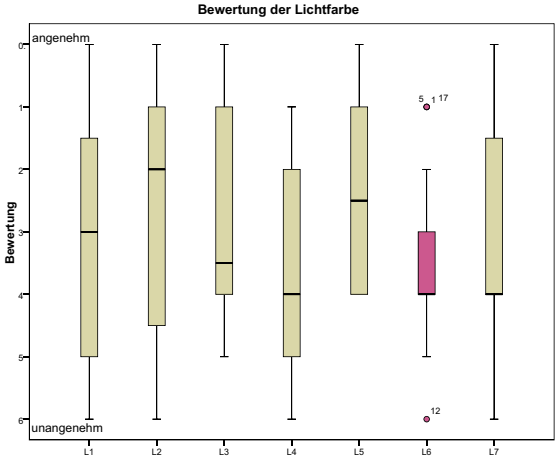
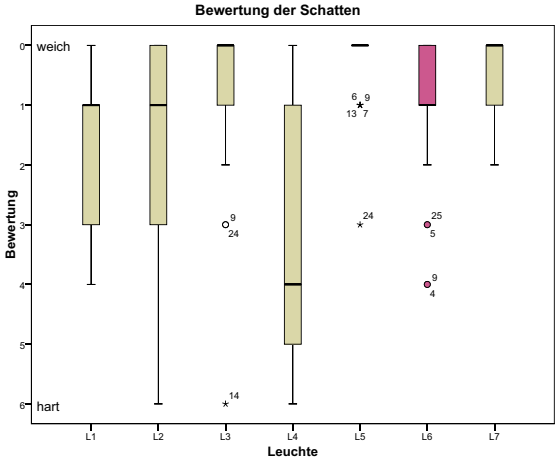


Abb. 8: Median und Boxplot der Bewertung der Lichtfarbe

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

Die Spektren der Leuchten sind in der elektronischen Veröffentlichung dargestellt.

4.5 Bewertung der Schatten



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

Abb. 9: Median und Boxplot der Bewertung der Schatten

4.6 Störende Reflexe

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

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

4.7 Weitere Bewertungen

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

5. Zusammenfassung

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

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

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

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

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

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

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

Bei LED-Leuchten mit diffusen Reflektoren und/oder Prismenabdeckungen ergaben sich kaum Unterschiede zwischen den LED-Leuchten und der hier als Referenz verwendeten Rasterleuchte. Reflexe auf der Arbeitsfläche treten bei einigen Leuchten etwas stärker in Erscheinung. Hinsichtlich Reflexblendung am Bildschirm gibt es keine nachgewiesenen Unterschiede zwischen den LED-Leuchten und der Referenzleuchte.

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

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

Einfluss unterschiedlicher Beleuchtungskonzepte und Lampenspektren in der Innenraumbeleuchtung

W. Pepler, M. Böll, P. Bodrogi, Prof. T. Q. Khanh (Technische Universität Darmstadt)

1 Einleitung

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

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

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

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

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

2 Testraum

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

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

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

Abb. 1: Multifunktionsraum am Fachgebiet Lichttechnik mit der Einrichtung für die hier vorgestellte Studie

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

Abb. 2: Abgehängte Decke des Multifunktionsraumes mit eingeschalteter Testbeleuchtung

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

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

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

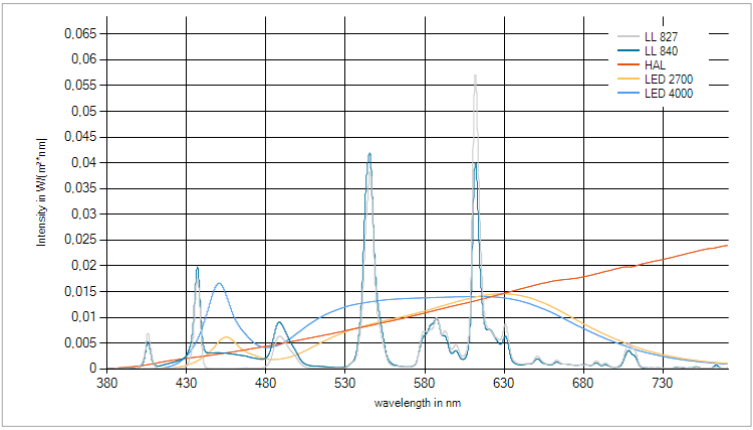


Abb. 3: Spektren der im Raum eingesetzten Lichtquellen

3 Methodik

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

Die einzelnen Szenen in dieser Untersuchung unterscheiden sich einzig bezüglich der Lichtquelle. Die Leuchten wurden jeweils so eingestellt, dass die Lichtverteilung und die Beleuchtungsstärke im Raum konstant waren. Die mittlere, horizontale Beleuchtungsstärke im gesamten Raum beträgt 800 lx bei einer Gleichmäßigkeit von ca. 0,55 für alle Lichtszenen.

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

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

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

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

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

Abb. 4: Evaluationsmatrix im Analytischen Hierarchieprozess

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

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

Die Probanden bestanden aus den Studenten und wissenschaftlichen Mitarbeitern des Fachbereichs Architektur und des Fachgebiets für Lichttechnik der Technischen Universität Darmstadt, sowie einer Chemie-Studentin. Insgesamt wurden für diese Untersuchung 22 Probanden befragt. Die Altersverteilung, sowie die Verteilung nach Geschlechtern können der Abbildung 5 entnommen werden.

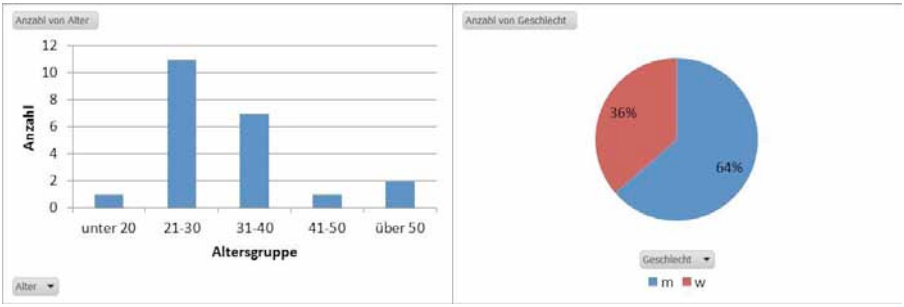


Abb. 5: Die Verteilungen der befragten Probanden bezüglich ihres Alters (links) und des Geschlechts (rechts)

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

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

4 Ergebnisse

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

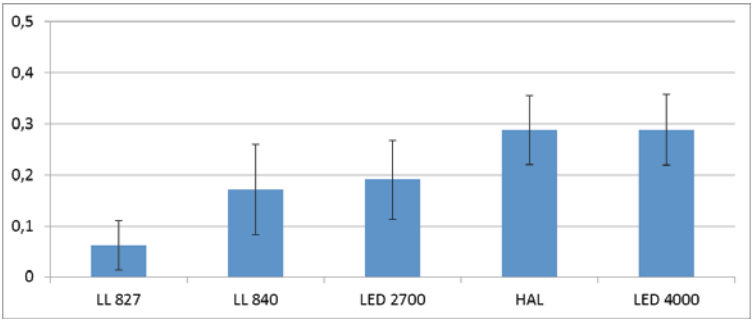


Abb. 6: Helligkeitswertung der verwendeten Lichtquellen relativ zu einander

Die LEDs mit 4000 K sowie die Halogenglühlampen wurden von Probanden am hellsten wahrgenommen. Danach folgen die LED mit 2700 K sowie die Leuchtstofflampe mit 4000 K. Am dunkelsten wurde die warmweiße Leuchtstofflampe wahrgenommen. Wenn man die LEDs (LED 4000 und LED 2700) und Leuchtstofflampen (LL 840 und LL 827) untereinander vergleicht, so erkennt man, dass die Lampen mit höherer Farbtemperatur jeweils heller als die mit niedrigerer Farbtemperatur bewertet wurden.

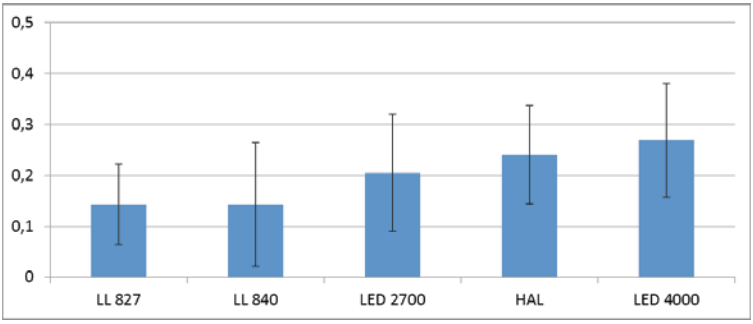


Abb. 7: Die Farbpräferenz der farbigen Objekte unter verschiedenen Lichtquellen

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

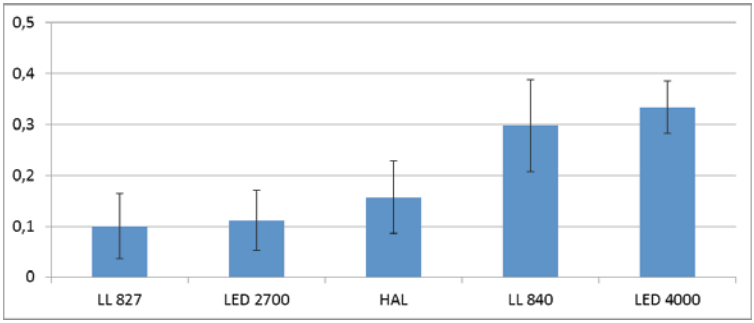


Abb. 8: Präferenz einzelner Lichtquellen für die Bürobeleuchtung

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

5 Diskussion

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

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

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

6 Danksagung

Diese Untersuchung ist gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung.

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

7 Literatur

/1/ DIN EN 12464

/2/ Dehoff, P.: Zum Stand der Innenraumbeleuchtung. CyberLux 2001

/3/ VBG: Bildschirm- und Büroarbeitsplätze (BGI 650). 2007

/4/ Reichardt, T.: Mehrkriterielle Entscheidungen mit dem AHP-Verfahren. Seminararbeit, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg 2003

Störung durch Reflexionen auf Flachbildschirmen

Paul W. Schmits
HAWK Hildesheim
Fakultät Gestaltung
Lighting Design
31134 Hildesheim
Kaiserstraße 43-45
(05121) 881-350

Cornelia Vandahl
Christoph Schierz
TU Ilmenau
Fachgebiet Lichttechnik
98693 Ilmenau
Prof.-Schmidt-Str. 26
(03677) 69-3732

1. Einleitung

Um störende Reflexe auf Bildschirmen zu vermeiden, sind in den Normen Grenzwerte, insbesondere für Leuchtdichten und Beleuchtungsstärken sich spiegelnder Leuchten festgelegt. Diese stammen jedoch noch auch Zeiten, in denen vorwiegend CRT-Bildschirme im Einsatz waren. Moderne Bildschirme sind hinsichtlich Entspiegelungstechnologie und Ausgangskontrast weiter entwickelt. Daher ist zu erwarten, dass die genormten Grenzwerte nicht mehr aktuell sind. Die Grenzen für LCD-Bildschirme sind bisher noch nicht detailliert ermittelt worden.

In dem Projekt wurden wissenschaftlich abgesicherte Ergebnisse gewonnen, die in die Normenwerke und Empfehlungen für Bildschirmanforderungen (z. B. DIN EN ISO 9241-30x) und für die Beleuchtung von Bildschirmarbeitsplätzen (z. B. DIN 5035-7, BGI 650) einfließen können.

An der TU Ilmenau und der HAWK Hildesheim wurden an 3 ausgewählten Bildschirmen Untersuchung der Störung durch Schleierleuchtdichte und Spiegelbilder bei der Variation von verschiedenen Parametern durchgeführt. Die Untersuchung fand auf der Basis von Urteilen durch 21 Versuchspersonen statt.

2. Reflexe am Bildschirm

Reflexionen auf Bildschirmen führen im Allgemeinen zur Verringerung des Kontrastes auf dem Bildschirm. Der Ausgangskontrast eines Bildschirmes (ohne Beleuchtung) ist dabei nach Gleichung (1) definiert.

$$(1) \qquad C_0 = \frac{L_H}{L_L}$$

Reflexionen an der Bildschirmoberfläche können gerichtet oder diffus erfolgen. Die Leuchtdichten der Reflexion überlagern sich den Ausgangsleuchtdichten (Abb. 1) und führen dann zur Kontrastreduktion.

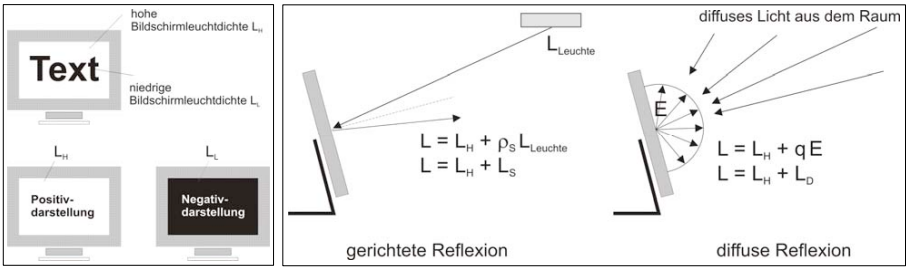


Abb. 1: Leuchtdichtedarstellung auf dem Bildschirm, gerichtete und diffuse Reflexion an der BS-Oberfläche

Die gerichtete Komponente L_S kann über den Grad der gerichteten Reflexion ρ_S und die Leuchtdichte der sich spiegelnden Leuchte $L_{Leuchte}$ beschrieben werden:

(2) $$L_S = \rho_s \cdot L_{Leuchte}$$

Die diffuse Komponente L_D lässt sich über den Leuchtdichtekoeffizient q und die auf dem Bildschirm herrschende Beleuchtungsstärke bestimmen. Diesen kann man in den Grad der diffusen Reflexion ρ_d umrechnen.

(3) $$L_D = q \cdot E \qquad q = \frac{L_D}{E} \qquad L_D = \frac{\rho_d \cdot E}{\pi \cdot \Omega_0} \qquad \rho_d = q \cdot \pi \cdot \Omega_0$$

Im Allgemeinen treten beide Reflexionskomponenten gleichzeitig auf, was zu folgendem Kontrast führt:

(4) $$CR = \frac{L_H + L_S + L_D}{L_L + L_S + L_D}$$

Bei Bildschirmen mit glänzender Oberfläche tritt fast ausschließlich gerichtete Reflexion auf. Bei matten Bildschirmoberflächen ist die gerichtete Komponenten jedoch nicht zu vernachlässigen, daher wird im folgenden nicht von diffuser sondern von gestreuter Reflexion gesprochen.

3. Untersuchte Bildschirme

Für die Untersuchungen wurden drei Bildschirme (zwei mit matter und einer mit hochglänzender Oberfläche) ausgewählt. Die Bildschirme wurden ausschließlich in Positivdarstellung betrieben. Den Testpersonen wurde ein Text (schwarze Zeichen mit Leuchtdichte L_L auf hellem Hintergrund mit Leuchtdichte L_H) präsentiert. Der weiße Hintergrund L_H wurde in 4 Stufen variiert: 200, 150, 115 und 80 cd/m^2. Zusätzlich wurde ein Foto dargeboten.

Ortsaufgelöste Messtechnik ergab für alle Bildschirme den mittleren Kontrast C_0 ohne zusätzliche Beleuchtung. In Tab. 1 sind die wesentlichen Kennzahlen der untersuchten Bildschirme dargestellt.

	BS1	**BS2**	**BS3**
Oberfläche	matt	matt	glänzend
q in cd/m^2/lx	0,0092	0,0105	0,00057
ρ_d	0,029	0,033	0,0018
ρ_s	0,0042	0,00089	0,047
$L_{L\ mittel}$ in cd/m^2	1,17	0,24	0,32
$C_{0\ mittel}$ bei L_H = 200 cd/m^2	232	799	738
$C_{0\ mittel}$ bei L_H = 150 cd/m^2	176	563	484
$C_{0\ mittel}$ bei L_H = 115 cd/m^2	131	384	386
$C_{0\ mittel}$ bei L_H = 80 cd/m^2	98	267	268

Tab. 1: Kennzahlen der Bildschirme

Die Bildschirme BS1 und BS2 hatten eine matte Oberfläche. Bei BS1 handelt sich um einen LCD-Bildschirm älterer Bauart, der hier als „worst case“ zum Vergleich mit in die Untersuchung einbezogen wurde. BS3 hat eine hochglänzende Oberfläche.

4. Versuchsaufbau

4.1 Untersuchungen zur gerichteten Reflexion

Die Untersuchungen fanden im Lichtlabor der HAWK Hildesheim, Kompetenzfeld Lighting Design statt. Der Arbeitstisch mit den drei Bildschirmen stand vor einer weiß verhängten Wand. Regelbare Wandfluter und eine mobilen Spiegelrasterleuchte (Abb. 2) optimierten so die Beleuchtung des Arbeitstisches, dass die folgenden Parameter während des gesamten Versuches stabil eingehalten werden konnten:

- Beleuchtungsstärke im Arbeitsbereich (Tisch und Bewegungszone): 500 lx (U_0 >0,65)
- Leuchtdichte auf der Wand hinter den Monitoren (bis zu einer Höhe von 2,2 m) 80 cd/m²
- Beleuchtungsstärke auf allen drei Bildschirmen < 25 lx

Als Störquellen (Abb. 2) befanden sich zwei Leuchten in 6 m Abstand so an einem Deckensystem, dass sich auf allen drei Bildschirmen mittig in der oberen Bildschirmhälfte für den Beobachter ein Reflexbild ergab.

Die leuchtenden Flächen beider Leuchten wurden so modifiziert, dass sich in Richtung der Bildschirme und bezogen auf diese eine weitgehend gleichmäßig leuchtende Fläche mit einem Raumwinkel von $5 \cdot 10^{-5}$ sr ergab

- Leuchte 1: längliche Fläche von 1,45 m x 16 mm (im folgenden „Linien-Leuchte“ genannt)
- Leuchte 2: rechteckige Fläche von 300 mm x 78 mm (im folgende „Rechteck-Leuchte“ genannt)

Die Linien-Leuchte wurde durch eine freistrahlende Lichtleiste mit T16 Leuchtstofflampen-Bestückung realisiert. Um das Leuchtenumfeld bei der Dimmung stabil zu halten, absorbierte schwarzes Blendenmaterial den rückwärtigen Lichtstrom.

Die Rechteck-Leuchte bestand aus einem tiefstrahlenden Rinnenstrahler mit T16 Leuchtstofflampen-Bestückung dessen Austrittsfläche mit einer Diffusorscheibe abgedeckt war. Eine Maskierung reduzierte die Lichtaustrittsfläche auf die oben angegebene Größe. Beide Leuchten konnten über eine DALI Anlage stufenlos zwischen 35 % und 100 % gedimmt werden.

Die Untersuchung wurde mit 21 Testpersonen durchgeführt, die nacheinander die drei Bildschirme bewerteten. Die Testpersonen stellten ihre Sitzposition mit Hilfe eines höhenverstellbaren Sitzes jeweils so ein, dass das Reflexbild der Störleuchten sich mittig in der oberen Bildschirmhälfte befand.

Auf dem Bildschirm wurde dreimal ein Text mit schwarzen Zeichen auf unterschiedlichen Hintergrundleuchtdichten dargestellt (200 cd/m², 150 cd/m² und 115 cd/m²) sowie eine Fotografie. Nach kurzer Adaptationszeit wurde jeweils eine Störquelle eingeschaltet und deren Leuchtdichte langsam solange erhöht, bis die Testpersonen den Reflexions-Effekt der Störquelle als „merkbar“ (BS1 und BS2) bzw. als „störend“ (BS3) empfanden.

Bei den Bildschirmen BS1 und BS2 wurde das Urteil „störend“ nicht untersucht, da bereits beim Vortest die 100 % Einstellung der Störquellen als „nicht störend“ empfunden wurde und höhere Leuchtdichten irrelevant sind. Aufgrund der hohen gerichteten Reflexion des Bildschirms BS3 waren die Spiegelbilder der Störquellen auch bereits bei der niedrigsten Dimmstellung sichtbar. Daher wurde hier auf das Urteil „merkbar“ verzichtet.

Abb. 2: Versuchsaufbau bei der Untersuchung der direkten Reflexion in Hildesheim

4.2 Untersuchungen zur diffusen Reflexion

Die Untersuchungen fanden in einem Laborraum der TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik statt. Der Raum war mit einem direkt abstrahlenden dimmbaren Deckensystem ausgestattet. Die drei Bildschirme wurden im Raum so positioniert, dass keine direkte Reflexion der Leuchten zustande kommen konnte.

Die Beleuchtungsstärke, die mit dem Beleuchtungssystem maximal möglich war, betrug 1400 lx in der Bildschirmebene. Vorversuche zeigten, dass die Beleuchtungsstärke nicht ausreichte, um vom Beobachter als „merkbare“ Änderung wahrgenommen zu werden. Daher kam zusätzlich ein Scheinwerfer zum Einsatz (Abb. 3). Dieser strahlte unter 25° gegenüber der Senkrechten auf den Bildschirm und führte nicht zu einer direkten Reflexion in Richtung des Beobachters. Mit dem Scheinwerfer waren Beleuchtungsstärken bis zu 65000 lx (Maximalwert auf der Fläche des Bildschirmes) möglich.

Durch die Verwendung des Scheinwerfers entspricht der gewählte Versuchsaufbau nicht den Mess- und Bewertungskriterien für eine diffuse Beleuchtung, die für die Festlegung zulässiger Beleuchtungsstärken gefordert sind. Andererseits sind im Innenraum Beleuchtungsstärken über 1400 lx in der Bildschirmebene unrealistisch. Höhere Werte werden meist durch direkte Sonneneinstrahlung erreicht, die ähnlich gerichtet wie die Scheinwerferbeleuchtung erfolgt.

Abb. 3: Versuchsaufbau zur Untersuchung der diffusen Reflexion in Ilmenau

Die Untersuchung fand mit 21 Testpersonen statt, die nacheinander die drei Bildschirme mit jeweils 4 Leuchtdichten L_H (200 cd/m², 150 cd/m², 115 cd/m² und 80 cd/m²) betrachteten.

Während der Betrachtung des Bildschirmes wurde nur die Helligkeit des Scheinwerfers langsam erhöht und die Probanden hatten anzugeben, wann sie eine Änderung bemerkten („merkbar“) bzw. als störend empfanden (“störend“). Mit jeder Testperson wurde die Einstellung dreimal vorgenommen. Die drei Ergebnisse jeder Testperson wurden anschließend gemittelt.

5. Ergebnisse

5.1 Direkte Reflexion

In den Abb. 14 bis 16 sind der Median und das Minimum über alle 21 Versuchspersonen für die Angabe „merkbar“ (BS1 und BS2) bzw. „störend“ (BS3) dargestellt. Die Werte der y-Achse entsprechen der Leuchtdichte der sich spiegelnden Leuchte $L_{Leuchte}$.

Es zeigt sich, dass bei allen Bildschirmen bei der Rechteck-Leuchte geringere Leuchten-Leuchtdichten als „merkbar“ angegeben werden als bei der Linien-Leuchte. Die Angabe ist von der Hintergrundleuchtdichte des Bildschirmes abhängig.

Beim glänzende BS3 wurden bereits Leuchten-Leuchtdichten größer als 4000 cd/m² als „störend“ eingestuft. Eine Testperson fühlte sich bereits bei der niedrigsten angebotenen Leuchtdichte ($L_{Leuchte}$ < 1500 cd/m²) gestört. Eine weitere Versuchsperson hingegen fühlte sich auch bei der höchsten realisierbaren Leuchtleuchtdichte nicht gestört. Hier zeigte sich auch eine Abhängigkeit der Bewertung von den Nutzergewohnheiten. Kritisch wird insbesondere die gute Erkennbarkeit des Spiegelbildes, unabhängig von der Leuchtdichte, gesehen.

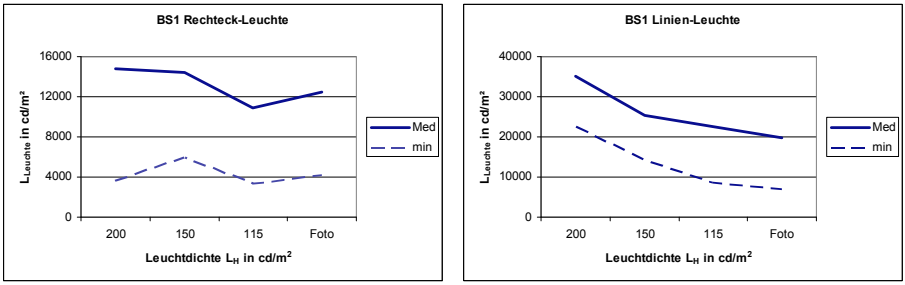


Abb. 4: Median und Minimum der Angabe für „merkbar“ für BS1

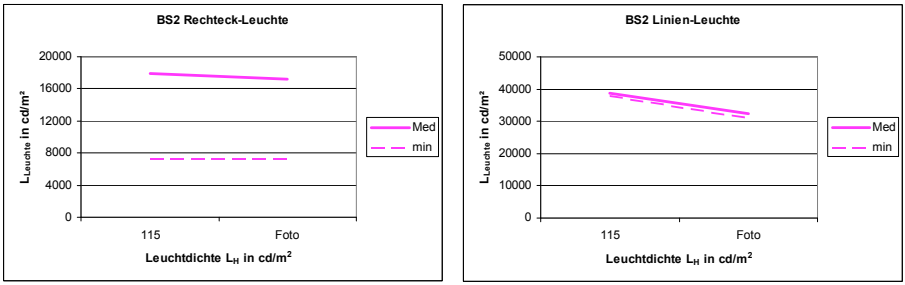


Abb. 5: Median und Minimum der Angabe für „merkbar“ für BS2

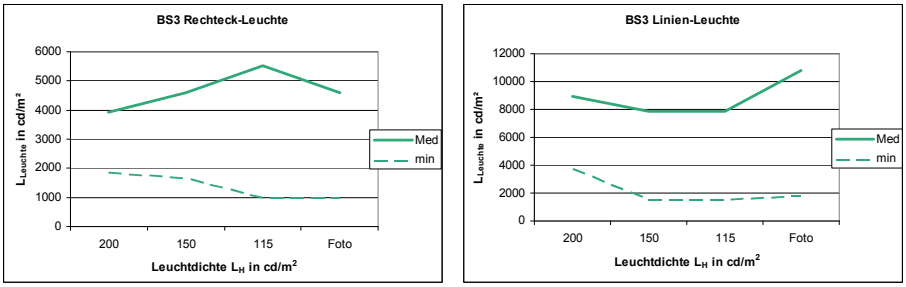


Abb. 6: Median und Minimum der Angabe für „störend“ für BS3

5.2 Diffuse Reflexion

In den Abb. 17 bis 19 sind der Median sowie Minimum und Maximum über alle 21 Versuchspersonen für die Angabe „merkbar“ und „störend“ dargestellt. Der Werte der y-Achse entsprechen dem Maximalwert der Beleuchtungsstärke auf dem Bildschirm. Bei der Untersuchung der gestreuten Reflexion wurden bei keinem Bildschirm bei Beleuchtungsstärken unter 3000 lx der Lichtschleier als „störend“ eingestuft.

Beim Bildschirm BS3 fiel den Testpersonen die Angabe einer Störwirkung sehr schwer. Entsprechend groß ist die Streuung. Selbst in der höchsten Einstellung von 50000 lx konnten einige Probanden keine Störwirkung feststellen. Für hochglänzende Bildschirme spielt die Beleuchtungsstärke keine Rolle, solange sie nicht durch sich direkt spiegelnde leuchtende Flächen erzeugt wird.

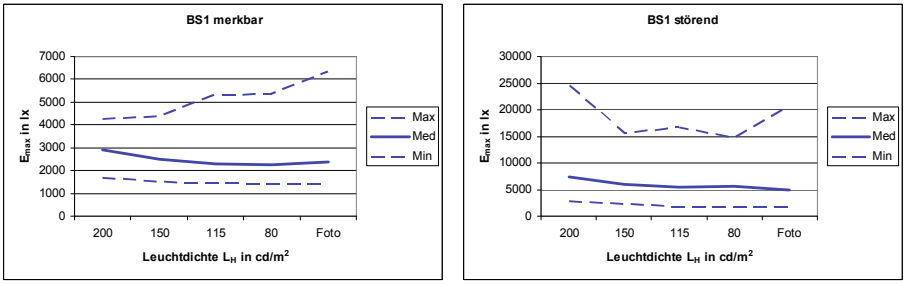
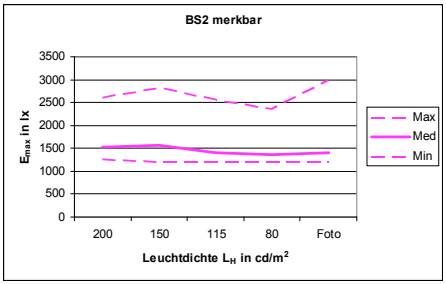


Abb. 7: Maximum, Median und Minimum der Angabe für „merkbar“ und „störend“ für BS1



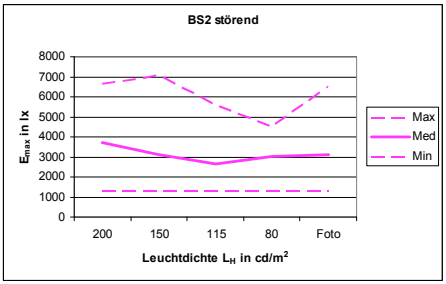
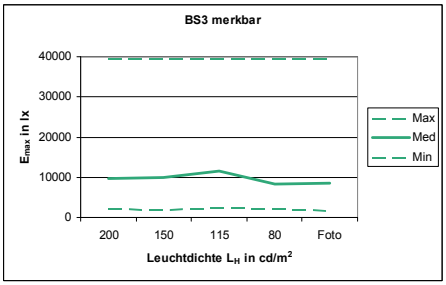


Abb. 8: Maximum, Median und Minimum der Angabe für „merkbar“ und „störend“ für BS2



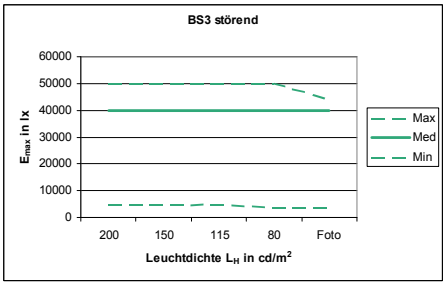


Abb. 9: Maximum, Median und Minimum der Angabe für „merkbar“ und „störend“ für BS3

6. Zusammenfassung

In der Studie wurden 2 Bildschirme mit matter Oberfläche und ein hochglänzender Bildschirm hinsichtlich ihrer Reflexionen und deren Störwirkung auf den Nutzer untersucht. Dabei wurden sowohl die Leuchtdichte der sich spiegelnden Lichtquelle als auch die diffuse Raumbeleuchtung variiert. Die Beleuchtungsstärke auf der Bildschirmoberfläche wurde weiterhin mit einer gerichteten, jedoch nicht in Beobachterrichtung gespiegelten Beleuchtung realisiert. Damit waren Beleuchtungsstärken bis 65000 lx erzielbar.

Bei der Untersuchung stellte sich heraus, dass bei den entspiegelten Bildschirmen der gerichtete Anteil der Reflexion sehr klein ist. Erst gerichtete Reflexionen mit Leuchtdichte-Werten $L_{Leuchte}$ > 10000 cd/m² wurden als „merkbar“ beurteilt. Leuchten mit so hohen Leuchtdichten oberhalb des Ausstrahlungswinkels von 65° führen aber mit Sicherheit zu UGR-Werten größer 19 und dürfen daher in Büros und vergleichbaren Bildschirmarbeitsplätzen nicht eingesetzt werden.

Bei zukünftigen Empfehlungen und Vorschriften kann daher für den Bildschirm-Typ „entspiegelter Flachbildschirm“ im bürotypischen Einsatz (Positiv-Zeichen-Darstellung) auf eine Begrenzung der Leuchtdichte von Leuchten in typischer Büroumgebung verzichtet werden, wenn die Begrenzung der Direktblendung eingehalten wird.

Bei dem hochglänzenden Bildschirmtyp wurden bereits Leuchten-Leuchtdichten größer als 4000 cd/m² als „störend“ eingestuft. Eine Testperson fühlte sich bereits bei der niedrigsten angebotenen Leuchtdichte gestört. Eine weitere Versuchsperson hingegen fühlte sich auch bei der höchsten realisierbaren Leuchtenleuchtdichte nicht gestört. Dies kann

als Hinweis betrachtet werden, dass als zusätzliche Einflussgröße auf das Urteil die Haltung zu dem Produkt eine Rolle spielen könnte. Bei dem hochglänzenden Bildschirmtyp scheint weniger die Höhe der Leuchtdichte für die Bewertung „störend" relevant zu sein als vielmehr die gute Erkennbarkeit des Spiegelbildes (unabhängig von der Leuchtdichte) und die damit verbundene ablenkende Information. Hochglänzend spiegelnde Bildschirme sollten daher beim bürotypischen Einsatz nicht verwendet werden.

Bei der Untersuchung der gestreuten Reflexion wurden bei keinem Bildschirm mit Beleuchtungsstärke auf der Bildschirmfläche E < 1500 lx Lichtschleier als „merkbar" eingestuft. Bei Beleuchtungsstärken ab 3000 lx wurden die Lichtschleier als „störend" empfunden. Diese Beleuchtungsstärken sind im Büroraum höchstens durch das Tageslicht in Fensternähe erreichbar. Mit der künstlichen Beleuchtung wären diese Werte mit horizontalen Beleuchtungsstärken über 3000 lx verbunden. Diese Werte dürften schon aus energetischen Gründen kaum zum Einsatz kommen.

Die mittlere horizontale Beleuchtungsstärke für die künstliche Beleuchtung am Büro-Arbeitsplatz dürfte zu keiner Zeit 1500 lx überschreiten, die Beleuchtungsstärke auf einem bis maximal 45° geneigten Bildschirm betrüge dann höchstens 1000 lx.

Mit den kritischeren Bedingungen für Störung durch gestreute Reflexion ist bei Tageslicht zu rechnen. Typische Beleuchtungsstärke-Werte auf Bildschirmen, die zu fensternahen Arbeitsplätzen (ohne direkte Sonneneinstrahlung) gehören und parallel zu den Seiten-Wandflächen ausgerichtet sind, dürften in diesem Fall 3000 lx nicht überschreiten.

Zur Vermeidung von Störungen auf entspiegelten Bildschirmen durch gerichtete wie auch durch gestreute Reflexion im Zusammenhang mit Büroarbeit bei Tageslicht und künstlicher Beleuchtung ist eine Beschränkung der Beleuchtungsstärke auf 3000 lx sowie die Einhaltung der Blendungsbegrenzung UGR 19 ausreichend.

Zur Erkennung der Farbcodierung von Bildschirmen wird nach DIN EN ISO 9241-307 ein Farbabstand von $\Delta E^*_{uv} \geq 20$ gefordert. Dieser muss auch unter einer gegebenen Beleuchtung erreicht werden. Für ausgewählte Testfarben wurden bei 1000 lx und bei 3000 lx in der Bildschirmebene die Farbabstände der Farben untereinander gemessen. Bei 1000 lx entsprachen alle Farbabstände der Anforderung und lagen über 20. Bei 3000 lx in der Bildschirmebene ergaben sich bei dunkleren Farben mehrheitlich Farbabstände unter 20. Die subjektive Einschätzung durch den Versuchsleiter zeigte, dass in diesen Fällen die Unterscheidung schwierig oder nicht mehr möglich war. Daraus ist abzuleiten, dass Bildschirme für eine vorgesehene Bildschirmbeleuchtungsstärke von mindestens 1500 Lux bis 2000 Lux ausgelegt sein sollten.

In der Norm DIN EN 12464-1:2011-08 sind für Leuchten, die sich in Bildschirmen spiegeln können, Grenzleuchtdichten festgelegt. Für Büroarbeit (d. h. Zeichen in Positivkontrast) beträgt für Bildschirmleuchtdichten unter 200 cd/m^2 diese Grenzleuchtdichte 1500 cd/m^2. Die Untersuchung hat gezeigt, dass für moderne Bildschirme diese Begrenzung nicht mehr notwendig ist. Vielmehr sind auch für diese Bildschirme Grenzleuchtdichten von 3000 cd/m^2 als unkritisch anzusehen, die nach DIN EN 12464-1 nur für Bildschirmleuchtdichten ab 200 cd/m^2 zugelassen sind. Der Anwender hat damit die Möglichkeit, nach dem aktuellen Stand der Technik zu planen.

Licht- und Raumwirkung in Universitätsbibliotheken
Wie nutzbar sind zeitgenössische Bibliotheken?

Maria Goldberg
TRILUX Vertrieb GmbH
Biedenkamp 5h
21509 Glinde

1 Problemstellung

„Architektur muss Orte schaffen, deren geistige Vitalität den Menschen in seinem täglichen Leben freisetzen kann. Licht erweckt die Architektur zum Leben und gibt Kraft."
(TADAO ANDO)
Dieses Zitat betont die Bedeutung von Licht und Architektur. Zusammen bilden Sie ein wichtiges Kriterium für die Nutzbarkeit. Bibliotheken stellen besondere Anforderungen an die Nutzbarkeit. Sie sind unter dem Einfluss neuer Medien im Wandel, weshalb die Architektur adäquate Formen finden muss, um darauf einzugehen. Insbesondere die Universitätsbibliothek kann deshalb ein Vorreiter für den zukünftigen Umgang sein.
Drei Bibliotheksbauten, die in den letzten Jahren entstanden sind, bilden die Grundlage für einen Vergleich, um daraus die Themengebiete Lichtplanung und Architektur stärker im Zusammenhang zu betrachten und eine fachübergreifende Kommunikation zu finden. Inwiefern Licht und Architektur, immer im Hinblick auf den Nutzer, aufeinander abgestimmt sind, soll im Folgenden herausgearbeitet werden. Hierfür sollen die Licht- und Raumwirkung in Universitätsbibliotheken genauer untersucht werden. Inwiefern ist die Wirkung von Licht und Raum für den Nutzer hinsichtlich der Arbeitsbedingungen zuträglich? Entspricht die durch das Licht erzeugte Raumwirkung der gewünschten Atmosphäre im Nutzungsbereich? Wie verändert sich die Raumwahrnehmung im Laufe des Tages?

2 Vorstellung der Vergleichsbibliotheken

Die drei Vergleichsbibliotheken sind zeitgenössische Bauten, welche erst in den letzten Jahren entstanden sind. Die erste der drei Bibliotheken befindet sich in Dresden. Es handelt sich um die Sächsische Landesbibliothek – Staats- und Universitätsbibliothek (kurz: „SLUB"). Unter der architektonischen Planung vom Büro Ortner & Ortner wurde das Gebäude 2002 fertiggestellt. Von dem Architekturbüro Norman Foster stammt der Entwurf für die Philologische Bibliothek der FU Berlin, welche 2005 fertiggestellt wurde. Die dritte Vergleichsbibliothek bildet das Informations-, Kommunikations- und Medienzentrum (kurz: IKMZ), es wurde ebenfalls 2005 eröffnet und ist ein Entwurf des Architekturbüros Jacques Herzog & Pierre de Meuron. Diese drei Bibliotheken sind aufgrund ihrer differenzierten Bauformen und den jeweiligen Nutzungskonzepten ausgewählt worden.

3 Licht- und Raumwirkung der Vergleichsbibliotheken

Der Baukörper des IKMZ` platziert sich als Solitärbau auf erhobenem Niveau. Ähnlich einer Amöbe ist der Grundriss geformt. Die vor- und zurückspringenden Geschossebenen mit ihren in grellem Gelb, Grün, Blau und Magenta gehaltenen Einbauten werden von einer gebäudeumschließenden Strukturglasfassade ummantelt. Die Lesesäle im IKMZ sind in den Außenwölbungen positioniert und von Geschoss zu Geschoss in sämtliche Himmelsrichtungen ausgerichtet. Die Raumhöhen sind überwiegend 2-geschossig. Galerien mit Lesearbeitsplätzen ragen in den Bereich der Lesesäle hinein. Die Raumbegrenzung bildet die Glasfassade, die Nutzungsbereiche gehen fließend ineinander über.
Im IKMZ nimmt die Nutzung des Tageslichts eine wichtige Stellung ein. Die allseits umschließende Glasfassade und die Position auf einem höher liegenden Niveau in

unverbauter Umgebung des städtischen Außenraums schaffen Voraussetzungen, um die Bibliothek mit großen Mengen an Tageslicht zu versorgen. Tageslicht tritt ausschließlich seitlich in die, einem Zylindersegment nachempfundenen, Lesesälen. Bei überschüssigem Lichteintritt im Raum findet eine Regulierung statt. Ein sensorgesteuerter, fast blickdichter Sonnenschutz dunkelt den Innenraum ab, ist beim etwas trägen Positionieren akustisch deutlich zu vernehmen und kann in Abhängigkeit zum Lichtbedarf im Innenraum dazu führen, dass künstliches Licht der Spiralkronleuchter (Anschalten akustisch deutlich zu vernehmen) unterstützend hinzu geschaltet wird, wenn die Sonnenrollos den Innenraum verschatten. Zusätzlich fungieren die Rollos auch als Blendschutz bei direktem Sonnenlicht.

Abb. 1: IKMZ, Cottbus: Außenansicht

Abb. 2: IKMZ, Cottbus: Blick in den Lesesaal

Oberflächenmaterialien wie Streckmetallgitter bilden den sichtbaren Deckenabschluss im Bereich der Regale. Die Tischoberflächen im Lesesaal bestehen aus hellgrauem, glatt geschliffenem Epoxydharz. Die Folge ist eine Reflexblendung im flachen Blickwinkel auf den Tischoberflächen. Dies stört den sitzenden Nutzer mit Sehaufgabe direkt am Tisch weniger als in der horizontalen Blickachse beispielsweise bei der Arbeit am Notebook. Hier stören die Reflexe auf den Tischen im etwas entfernten Bereich sowie die hellen Flächen der Glasfassade. Ebenso verhält es sich auf den Galeriearbeitsplätzen, weil diese geschossübergreifend zur Glasfassade ausgerichtet sind. Bei der Durchführung vertikaler Sehaufgaben (z.B. Arbeit am Notebook) ist die Sehleistung eingeschränkt. Im peripheren Gesichtsfeld erscheint die helle Glasfassade. Mit steigender Geschosszahl erhöht sich beim Blick in den Außenraum das Verhältnis von Himmelsanteil zu Umgebungsanteil. Der flächenmäßige Anteil an hoher Leuchtdichte auf der Glasfassade nimmt somit zu.
Die Pixelstruktur auf der Glasfassade soll das einfallende Tageslicht reduzieren und zudem streuen, so dass sowohl gerichtetes als auch diffuses Tageslicht bei direktem Tageslichteinfall im Innenraum eintritt. Angestrebt wurde eine relativ gleichmäßig Ausleuchtung des Raumes. Harte Schlagschatten konnten durch die Pixel vielleicht aufgeweicht, jedoch nicht gänzlich begrenzt werden. Außerdem zeigt die Pixelstruktur auf der zweischaligen Glasfassade eine weitere Eigenschaft auf. Durch die Überlagerung der Pixelstruktur entsteht ein „Moiré-Effekt“, welcher den Blick nach außen stört – ihn unklar erscheinen lässt. Unterscheidung zwischen bewölkten Himmel und geschlossener Wolkendecke ist teilweise schwer. Zudem entsteht im peripheren Blickumfeld eine flimmernde Dynamik, welche zusätzlich als störend empfunden werden kann. Im IKMZ wird ein Widerspruch deutlich. Zum einen werden dem Nutzer durch die Glasfassade großzügige Sichtbezüge suggeriert, zum anderen wird der Blick in den Außenraum durch die Pixelstruktur oder die Sonnenschutzvorrichtung irritiert.
Der Nutzer kann seine Platzwahl vom gewünschten Informationseinfluss des Außenraums abhängig machen. Der Einfluss der dynamischen, städtischen Umgebung sinkt mit

zunehmender Geschosshöhe. Grundsätzlich ist der Informationsgehalt, dem der Nutzer aufgrund der Glasfassade ausgesetzt ist, aber sehr hoch.

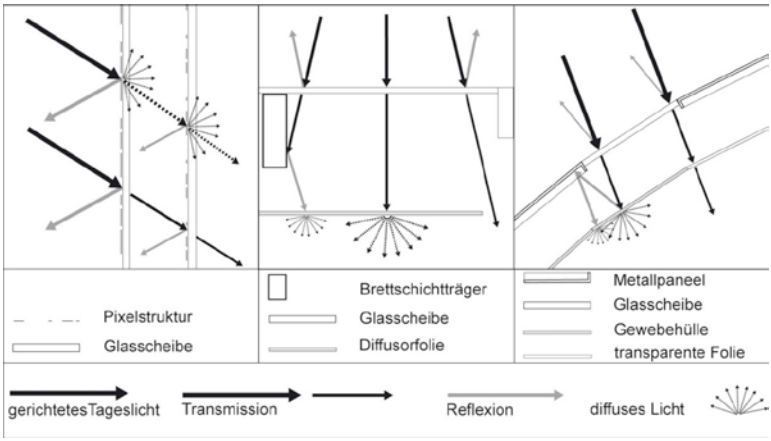


Abb. 3: Tageslichtschema: IKMZ, Cottbus; SLUB, Dresden; Philologische Bibliothek, Berlin (v.l.n.r.)

Den Nutzer qualitativ mit Tageslicht an den Arbeitsplätzen zu versorgen, ist hinsichtlich zweier Aspekte ungünstig gelöst. Die Eigenschaften des Sonnenschutzes und die Position der Galerie in der Tiefe eines Lesesaales schränken die Nutzung ein. Auch am Abend ist die Arbeit auf den Galerien eingeschränkt. Spiralförmige Kronleuchter sorgen für die Allgemeinbeleuchtung mit künstlichem Licht. Zusätzlich zum diffusen Licht der Kompaktleuchtstofflampen wirken sich die satinierten Abdeckungen lichtstreuend aus. Der primäre Lichtschwerpunkt wird am Abend deutlich auf den opalenen Abdeckungen der einzelnen Lichtpunkte wahrgenommen.
Mehrfachspiegelungen der Lichtpunkte zeichnen sich auf der Glasfassade vor der abendlichen, dunklen Himmelsfläche ab.

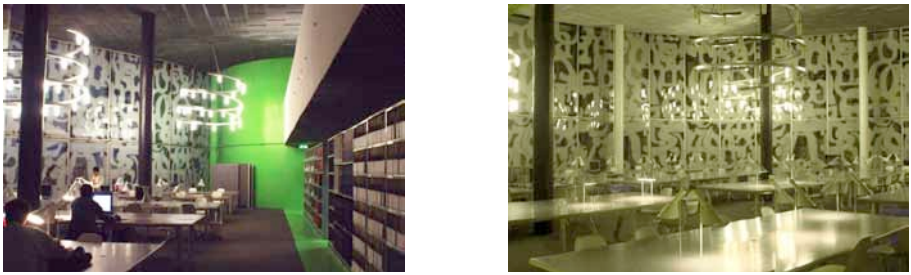


Abb. 4: IKMZ, Cottbus: Dominante Pixelstruktur, Mehrfachspiegelungen auf Glasfassade

Der Nutzer ist am Abend in den Lesesälen hohen punktuellen Leuchtdichten im peripheren Gesichtsfeld ausgesetzt, diese können sich ablenkend auf die konzentrierte Arbeit auswirken. Die Lichtpunkte der Kronleuchter können trotz Abdeckung direkt blenden, weil sie direkt auf der horizontalen Blickachse der Nutzer auf den Galeriearbeitsplätzen liegen. Hierzu kommt die am Abend deutlich sichtbare Pixelstruktur, welche als flächige, helle Bänder (Buchstaben nachempfunden) dominant in Erscheinung treten. ^

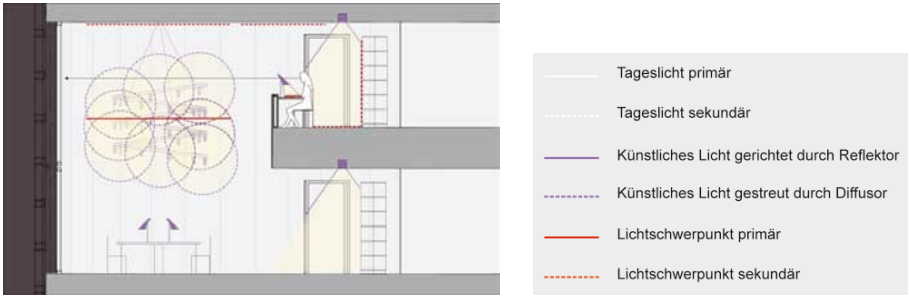


Abb. 5: IKMZ, Cottbus: Lichtschwerpunkte am Abend bezogen auf Galeriearbeitsplatz

Die Philologische Bibliothek in Berlin wird von umliegenden Gebäuden umschlossen und platziert sich mittig in einer Hofsituation. Nur der obere Abschluss der gebogenen Außenhaut ragt über den Dächern der sogenannten „Rostlaube“ hinaus und lässt vermuten, dass die Bibliothek im Inneren des Universitätsgeländes zu erreichen ist. Abwechselnde Glas- und Metallfelder gestalten die Fassade. Eine weiße, transluzente Textilhülle bildet einen visuellen Abschluss und verläuft parallel als vorgelagerte Schicht zur Fassade im Gebäudeinneren.
In allen Etagen der Philologischen Bibliothek sind die Bücherregale in der Gebäudetiefe der Geschosse angeordnet. Die Arbeitsplätze befinden sich überwiegend auf Galerien und sind zum Gebäuderand oder zur Gebäudemitte ausgerichtet. Besonders die Ausrichtung der Galeriearbeitsplätze zur Fassade hin erinnert an die Galeriearbeitsplätze im IKMZ. Doch der Nutzer schaut hier nicht auf eine transparente Glasfassade mit einer Pixelstruktur, sondern auf die transluzente, gespannte Textilfläche. Das Tageslicht gelangt durch Fassadenöffnungen der äußeren Schale und durch die Kunststofföffnungen in der Gewebehülle sowohl gerichtet als auch diffus in den Bibliotheksinnenraum. Bei gerichtetem Tageslicht zeichnet sich ein Schattenspiel der äußeren Fassadenschicht auf der innenliegenden Gewebeschicht ab.

Abb. 6: Philologische Bibliothek, Berlin: Außenansicht

Abb. 7: Philologische Bibliothek, Berlin: Innenansicht Galeriearbeitsplätz

Die Metallpaneele auf der äußeren Fassadenschicht fungieren als Sonnenschutz. Die Anordnung der Öffnungen variiert zwischen Nord- und Südseite. Im Bereich des Foyers öffnet sich die Fassade großflächiger als in den übrigen Bereichen. Das Tageslicht tritt seitlich wie auch von oben in den Innenraum. Ein dynamisches Bild wird auf die Gewebehülle projiziert und kann in subtiler Form Informationen z.B. zur Jahres- und Tageszeit, sowie vom Wetter transportieren. Deutliche Lichtstrukturen lassen den Sonnenstand, gleichmäßige Leuchtdichten mit wenigen Kontrasten lassen z.B. eine bedeckte Witterung erahnen.
Eine lichtdurchlässige Pixelstruktur auf den Folienöffnungen in der Gewebehülle wirkt im Gegensatz zum IKMZ nicht irritierend, sondern erzeugt eine leicht unscharfe Darstellung des Außenraumes, so dass dieser weniger ablenkend wirkt. Zudem ist der Blick auf die Entfernung der umgebenden Gebäude begrenzt. Ausschweifende Blicke sind somit nicht möglich. Dadurch ist die Störung durch dynamische Einflussfaktoren im Außenraum gering. Die architektonische Umsetzung zeigt die sensibilisierte Konzeption Architektur und Nutzer in festem Zusammenhang zu verstehen.
Obwohl Grautöne im Innenraum der Philologischen Bibliothek dominieren, wirkt er nicht monoton. Die helle Gewebefläche wirkt leicht und raumerweiternd. Die grauen, meist matten Oberflächen erscheinen in Kombination mit dem diffusen Tageslicht einheitlich. Sie schaffen keine Auffälligkeiten, sondern unterstützen eine ablenkungsreduzierte Raumatmosphäre. Das Lichtkonzept am Tag verdeutlicht die Intention der Architekten im gesamten Gebäude tageslichtbelichtete Arbeitsplätze zur Verfügung zu stellen. Architektonisch umgesetzt wird die Intention durch die kuppelartige Form und die Galerierücksprünge mit zunehmender Geschosshöhe des Gebäudes. Die Anordnungen der Arbeitsplätze unmittelbar an der Fassade und fortlaufend zur Gebäudetiefe mit großzügigem Luftraum bewirkt, tagesbelichtete Arbeitsplätze unterschiedlicher Qualitäten (z.B. durch Sichtbezüge, Öffentlichkeitscharakter, etc.) anbieten zu können.
Vollkommen abgeschottet vom Außenraum wurde der Lesesaal der SLUB unterirdisch gebaut. Nur zwei kubische Verwaltungsgebäude Außenraum ragen heraus. Der Grundriss des Bibliotheksbaus der SLUB gestaltet sich in einer auf den Lesesaal bezogenen Hierarchie. Im Zentrum platziert, ordnen sich alle weiteren Räume um den über dreigeschossigen Saal. Ein zentral in die Decke eingelassenes Oberlicht in Form eines Glasdaches belichtet den Lesesaal. Im oberen Bereich ist der Einblick in den Lesesaal durch Öffnungen möglichen. Hier befinden sich um den Saal umlaufend Galeriearbeitsplätze oder Carrels. Diese sind äußerlich dem Lesesaal angegliedert, werden jedoch zu den angrenzenden Nutzungsbereichen z.B. durch zweigeschossige Lufträume räumlich getrennt. Die Lufträume schließen nach oben mit Oberlichtbändern ab.

Abb. 8: SLUB, Dresden: Außenansicht

Abb. 9: SLUB, Dresden: Innenansicht Lesesaal

Unterhalb des Glasdaches verlaufen im Saal helle Brettschichtträger und werden von einem abgehängten Foliensegel größtenteils verdeckt. Durch das Segel wird das

Tageslicht gleichmäßig in den Lesesaal gestreut. Zusätzlich wird eine elektrochrome Verglasung eingesetzt, um die Sonneneinstrahlung zu regulieren. Im Raum wirkt das Licht durch die Streuung gleichmäßig verteilt und modelliert die Objekte im Raum weich.
Die Lichtsituation stellt sich dem Nutzer am Abend ähnlich wie am Tag dar, da der Lichtschwerpunkt auf der Höhe des Foliensegels unverändert bleibt. Leuchten hinter dem Foliensegel bzw. zwischen den Brettschichtträgern werden bereits am Tage unterstützend hinzu geschaltet. Ein fließender Übergang vom Tag zum Abend wird erzielt.

Die Arbeitsplätze werden weitestgehend mit Tageslicht versorgt. Doch der Umgang ist vielschichtiger. Ausdehnung, Position und Einsatz der Oberlichter führen zu folgender Beobachtung. Vom Zentrum des Lesesaales ausgehend, wird mit zunehmender Entfernung die Größe der Oberlichter kleiner. Das große Glasdacht betont die zentrale Position des Lesesaals innerhalb der Bibliothek. Umgebende Räume sind auf den Lesesaal ausgerichtet und ihm untergeordnet. Darauf verweisen die Oberlichtbänder, welche dem Lesesaal vorgelagert und in der Länge angepasst sind. Vom Lesesaal entfernte Nutzungsbereiche werden nur noch über Lichtschächte mit Tageslicht versorgt. Die Menge an Tageslicht zeigt dem Nutzer aufgrund der Größe und Form der Oberlichtöffnung wie weit entfernt er sich vom Lesesaal aufhält.
Diese Wechselwirkung zwischen angrenzenden und dunkel erscheinenden Räumen und dem lichtdurchfluteten Lesesaal beschreibt ein Lichtleitsystem, erzeugt durch Kontraste. Dies schärft den Charakter bzw. die Bedeutung eines Raumes. Zu beachten ist jedoch auch, dass auf der anderen Seite das architektonische Konzept Auswirkungen auf die subjektive Wahrnehmung der Nutzer hat. Bezugnehmend auf eine Umfrage von DUFTER geht aus Antworten von Nutzern der SLUB hervor, dass „eine einnehmende Wirkung vom Saal ausgeht“ /DUFTER 2009, S. 211/. In der SLUB wurde das „gleichmäßige Licht von oben“ im Lesesaal betont und als „angenehm“ beschrieben, wohingegen die umgebenden Nutzungsbereiche als „dunkel“ und „künstlich“ bezeichnet wurden /DUFTER 2009, S. 158/. Im Lesesaal der SLUB wurde eine konstante Lichtsituation angestrebt, welche von Witterungseinflüssen des Außenraumes größtenteils unbeeinflusst bleibt. Eine „Schön-Wetter-Situation“ und eine „Schlecht-Wetter-Situation“ sind hier vom Lichtcharakter aufgrund der Eigenschaften des Oberlichts im Saal ähnlich. /VGL. ANDRES 2007, S. 42 – 44/. Der Nutzer kann jedoch aufgrund der Lichtsituation eine beständige, heitere Lichtsituation im Außenraum assoziieren. Dies kann positive Auswirkungen auf das Engagement haben und zudem wird die Möglichkeit der Ablenkung durch äußere Einflüsse reduziert.

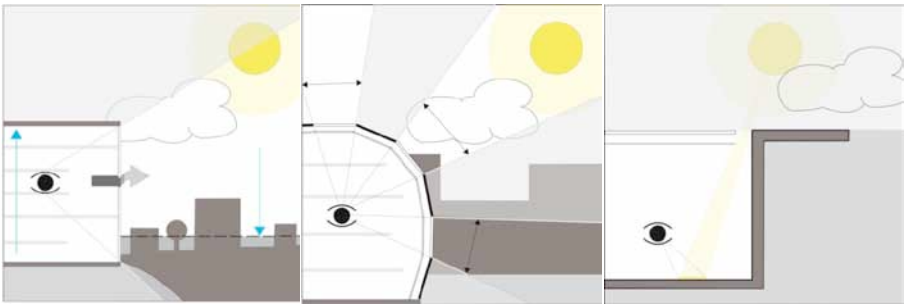


Abb. 10: Sichtbezüge zum Außenraum: IKMZ, Cottbus, Philologische Bibliothek, Berlin; SLUB, Dresden (v.l.n.r.)

4 Handlungsempfehlungen

Drei Bibliotheken wurden in Hinsicht auf ihren Umgang mit Tageslicht und künstlichem Licht untersucht und verglichen. Dabei wurde deutlich, wie unterschiedlich mit der Lichtgestaltung umgegangen wurde. Für eine verbesserte Berücksichtigung lichtgestalterischer Aspekte beim Entwurf werden im Folgenden Handlungsempfehlungen formuliert. Dabei ist allerdings immer zu bedenken, dass es sich nur um Empfehlungen, niemals um verbindliche Patentrezepte handeln kann, da die vielfältigen und komplexen Wechselwirkungen von Licht und Architektur eine Reduktion auf wenige allgemeingültige Gestaltungsregeln grundsätzlich nicht zulassen.

4.1 Lichttechnische Anforderungen einhalten

Das Licht muss optimale Voraussetzungen für die funktionalen Anforderungen zum Ausüben der Sehaufgabe bereitstellen. Aus diesem Grund sollte einer qualitativen Lichtplanung eine quantitative Klärung der lichttechnischen Anforderungen auf Basis von Normen und Richtlinien voran gehen, um Mindestvoraussetzungen für die geplanten Nutzungen im Gebäude zu erfüllen. Dafür ist im Vorfeld zu klären, welche einzelnen Nutzungen statt finden werden.

4.2 Raumcharakter während der Entwurfsphase Formulieren

Für die Beschreibung eines Raumcharakters eignen sich Eigenschaftswörter, weil sie emotionale, kulturelle und gesellschaftliche Aspekte von Licht und Raum enthalten. Da Wertungen aufgrund von individuellen Erfahrungen unterschiedliche Assoziationen hervorrufen können, sind Eigenschaftswörter zur abstrakten, nicht wertenden Beschreibung geeigneter. Somit stellt eine Beschreibung eine mögliche Entwurfshilfe eines zu planenden Raumes dar, unter der Fragestellung, welche Atmosphäre von dem Raum ausgehen soll.

4.3 Beschaffenheit des Lichts

Die Beschaffenheit des Lichts bezogen auf die gewünschte Darstellung der raumumgrenzenden Bauteile und der Objekte im Raum wird bei der künstlichen Beleuchtung durch die ausgewählte Lichtquelle und Leuchte und beim Tageslicht durch bauliche Öffnungen beeinflusst.
Während des Entwurfs ist zu prüfen wie groß der Einfluss von Licht und Schatten sein soll. Dabei ist zu berücksichtigen, welche Nutzungen im Raum stattfinden werden. Lichtstreuende Maßnahmen sollten in Bibliotheken grundsätzlich berücksichtigt werden, um den Anteil gerichteten Tageslichts gering zu halten und eine gleichmäßige Lichtverteilung zu ermöglichen.

4.4 Tageslichtversorgung durch Oberlichter oder seitlichen Lichteinfall

Die Darstellung von Licht- und Schatten bei Tageslicht ist im Innenraum zusätzlich von der Position (Oberlicht oder eines seitlicher Lichteinfall) abhängig. Die Arbeitsplätze sind in den Räumen bei seitlichem Lichteinfall aufgrund der Lichtverteilung qualitativ verschieden (Arbeitsplätze an der Fassade erhalten viel Licht – Arbeitsplätze in der Raumtiefe erhalten weniger Licht). Ein Oberlicht ermöglicht eine freie und flexible Verteilung der Arbeitsplätze bei einer gleichmäßigen Lichtverteilung.
Ein Vorteil der seitlichen Tageslichtversorgung ist Sichtbezüge zur Umgebung und zum Himmel herzustellen. Bei längeren Aufenthalten erhält der Nutzer im Innenraum mit

seitlichem Tageslichteinfall Informationen zum Tagesverlauf oder zum Wetter. Der Informationsgehalt, welcher aus dem Außenraum auf den Nutzer einwirkt, ist durch die bautechnischen Maßnahmen zu regulieren. Öffnungen, insbesondere Glasfassaden, sollten einen ungehinderten Blick nach außen garantieren. Blick irritierende Maßnahmen auf einem Öffnungselement sind zu vermeiden, weil sich der Nutzer verunsichert fühlen kann. Grundsätzlich ist der Entwurf an den konzeptionell erwünschten und psychologisch notwendigen Informationsgehalt anzupassen.
Weiterhin ist bei dem seitlichen Tageslichteinfall zu bedenken, dass mit geschosshohen Glasflächen oder Öffnungselementen der Silhouetten-Effekt verbunden ist.

4.5 Gestaltung des Überganges der Lichtsituation vom Tag zum Abend

In der Philologischen Bibliothek passt sich die Lichtsituation den natürlichen Bedingungen an. Der Übergang vom Tag zum Abend ist in dieser Bibliothek fließend. Der Lichtschwerpunkt senkt sich durch das individuelle Zuschalten der Tischleuchten von der Gewebeschicht auf die Nutzebene. Ein steigender Lichtschwerpunkt vom Tag zum Abend wird hingegen dem Nutzer im IKMZ durch das plötzliche Zuschalten der Kronleuchter, den Reflexionen auf der Glasfassade und auf der Streckmetalldecke erzeugt. Im Lesesaal der SLUB bleibt der Lichtschwerpunkt konstant auf der Höhe des Foliensegels.
Die Verschiebung des Lichtschwerpunktes verändert die Raumwirkung. Diese Veränderung vom Tag zum Abend kann vom Nutzer durchaus erwünscht sein, weil ihm Informationen zum Tagesfortschritt vermittelt werden und weil sich auch das Befinden des Nutzers über den Tag verändert.
Ein hoher Lichtschwerpunkt am Tag und ein gesenkter Lichtschwerpunkt am Abend wirken dem Tagesfortschritt angelehnt. Den Lichtschwerpunkt im Raum und die damit verbundene Raumwirkung am Tag wie am Abend aufrecht zu erhalten, wird im Fall des Lesesaales in der SLUB als kritisch bewertet. Da der Übergang zwischen Tages- und Abendsituation für den Nutzer durch Sichtbezüge zum Außenraum nicht wahrgenommen werden kann, ist er zeitlos. Allein die Uhr im Lesesaal der SLUB zeigt einen Tagesfortschritt an.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Lichtplaner und Architekt eine enge Verbindung eingehen sollten, um die funktionalen, psychologischen und architektonischen Anforderungen an einen Lichtplanungsentwurf optimal, d.h. dem Nutzerbedürfnis entsprechend, zu erfüllen. Die vorliegende Arbeit versuchte anhand einer Analyse und eines anschließenden Vergleichs dreier zeitgenössischer Bibliotheksbauten Architekten auf aktuelle Probleme der Lichtplanung zu sensibilisieren und das Licht in seiner vielfältigen Form näher in den Fokus des Architekturentwurfs zu rücken.

Literaturnachweis:

Andres 2007 Andres, P.: Lichtplanung im künstlichen Himmel. In: Licht Architektur Technik, Nr. 1 (2007), S. 42 – 44.

Dufter 2009 Dufter, M.: Bibliothek als Ort der Ruhe und Konzentration – Bibliothek als Ort der Arbeit und Kommunikation: Vergleichende Untersuchung zur Wirkung unterschiedlicher architektonischer Konzepte am Beispiel zweiter zeitgenössischer Universitätsbibliotheken. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, 2009.

Das Schädigungspotential von unterschiedlichen Lichtspektren am Beispiel eines Picassos

Dipl. Betriebswirtin Carina Buchholz
Zumtobel Lighting GmbH
Lighting Application Management
Schweizerstr. 30
A-6851 Dornbirn
Fon:+43 5572 390 26526
Email: carina.buchholz@zumtobel.com

Dipl. Ing. Ralf Müller
Zumtobel Lighting GmbH
Schweizerstr. 30
A-6851 Dornbirn
Fon:+43 5572 390 2815
Email: ralf.mueller@zumtobel.com

1. Problemstellung

In den Anfangsjahren der LED wurde von Spezialisten die Halbleitertechnologie hinsichtlich konservatorischer Aspekte als besonders schonend für Exponate proklamiert. Keine Belastung durch UV- oder IR-Strahlung, keine zusätzlichen Schutzfilter. Tatsächlich haben LEDs Meilensteine hinsichtlich schonender Exponat-Beleuchtung definiert.
Trotzdem wurde der Spektralverteilung im sichtbaren Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm anfangs zu wenig Beachtung geschenkt. Je kurzwelliger die Strahlung, umso schädigender ist sie – je nach Material und Absorptionsverhalten – für ein Kunstobjekt. Deshalb wurden schon bald kritische Stimmen mit der Frage laut, ob wohl die Spitze im niedrigwelligen, energiereichen blauen Spektralbereich, die bei weißen LEDs mehr oder weniger stark zu finden sei, zur Schädigung von Ausstellungsobjekten beitragen könne.

2. Zielsetzung

An einer Zeichnung von Pablo Picasso von 1916, die als Motiv einen Harlekin zeigt, sollten verschiedene Beleuchtungsparameter, die im Speziellen für Kunst relevant sind, bewertet werden. Die Bewertungsparameter umfassten elektrische und lichttechnische Eigenschaften der Leuchten sowie Beleuchtungsstärke, Homogenität, wirksame Beleuchtungsstärke Edm und Schädigungspotential Pdm nach CIE 157:2004.

Für die Untersuchung von elektrischen und lichttechnischen Parametern wurden zwei Leuchten miteinander verglichen: eine Halogenbeleuchtung und eine farbtemperaturveränderliche LED Beleuchtung. Die Messgrößen wurden zunächst direkt im Museum an dem Gemälde aufgenommen. Anschließend wurden die Messwerte im Labor verifiziert und speziell für die Messung der Strahldichte der sensible Spektralbereich erweitert. Abbildung 1 zeigt den Messaufbau im Labor und im Museum.

Ziel der Fallstudie war es, zu zeigen, dass die LED-Beleuchtung in der Museumsanwendung gegenüber der Halogenbeleuchtung Vorteile in der Lichtqualität und der Energieeffizienz hat und für den Einsatz zusätzlichen Nutzen bringt.

Abb.1: Messaufbau im Stadtmuseum Lindau, Lichtbank der TU Darmstadt

3. Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Labor hat der LED-Strahler bei vergleichbarer Farbtemperatur grundsätzlich deutlich weniger Schädigungspotential aufgewiesen – und zwar bei allen in der CIE 157:2004 aufgeführten Materialen von Hadernpapier, Textilien, Aquarellfarben auf Hadern bis hin zu Ölfarben auf Leinwand und Zeitungspapier. Durch das geringere Schädigungspotential der LED-Strahler erhöht sich die mögliche Bestrahlungsdauer bei den meisten Materialien um zirka 50 Prozent, bei Zeitungspapier sogar um 300 Prozent.

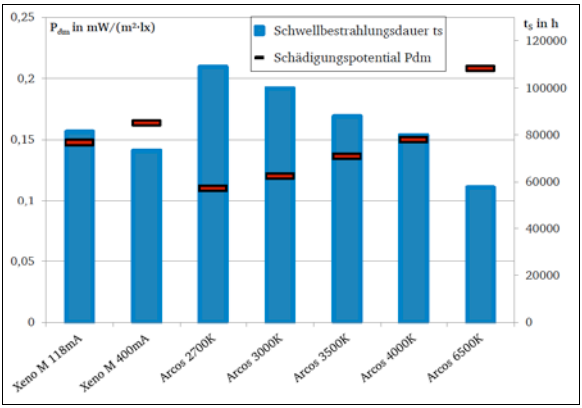


Abb.2: Schädigungspotential und Schwellenbestrahlungsdauer

Diese Ergebnisse bestätigten auch die Messungen an der Picasso Zeichnung:

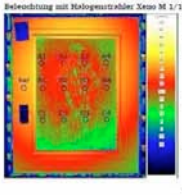
Beleuchtungssituation im Museum

	XENO gedimmt	XENO ungedimmt	ARCOS 2700 K	ARCOS 3000 K	ARCOS 3500 K	ARCOS 4000 K	ARCOS 6500 K
Farbtemperatur im Zentrum der Leuchte [K]	2032	2717	2519	2786	3258	3722	5909
$U_{0,CCT}$	0,971	0,991	0,992	0,986	0,976	0,990	0,984
$U_{1,CCT}$	0,952	0,986	0,982	0,973	0,965	0,980	0,969
Mittlere Beleuchtungsstärke $\bar{E}$ [lx]	112,4	2651,2	136,4	130,3	126,7	123,1	118,4
Minimale Beleuchtungsstärke E_{min} [lx]	71,8	1647,4	124,2	119,6	116,9	112,8	108,7
Maximale Beleuchtungsstärke E_{max} [lx]	146,2	3427,2	136,4	138,0	133,0	130,1	123,8
$U_{0,E}$	0,639	0,621	0,911	0,918	0,923	0,917	0,919
$U_{1,E}$	0,491	0,481	0,862	0,867	0,879	0,867	0,879
R_a	99	99	91	93	93	91	84
Schädigungspotential $\left[\frac{mW}{m^2 \cdot lx}\right]$							
Zeitungspapier	0,0009	0,0026	0,0008	0,0010	0,0013	0,0016	0,0026
Hadernpapier	**0,1476**	**0,1637**	**0,1102**	**0,1202**	**0,1365**	**0,1501**	**0,208**
Öl auf Leinwand	0,2025	0,2102	0,1394	0,1510	0,1698	0,1856	0,2532
Textilien	0,3338	0,3128	0,2000	0,2142	0,2374	0,2569	0,3414
Aquarell auf Hadern	0,2025	0,2102	0,1394	0,1510	0,1698	0,1856	0,2532

Tab. 1: Messwerte am Picasso

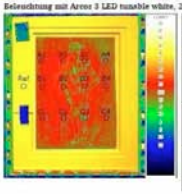
Der gedimmte Halogenstrahler erzeugt weißes Licht mit sehr niedriger Farbtemperatur. Um brillantes Weiß zu erzeugen, muss folglich die Stromzufuhr erhöht werden. Die so produzierte Beleuchtungsstärke vergrößert nicht nur das Schädigungspotenzial, sondern wirkt sich auch negativ auf die Energiebilanz aus.
Durch das Dimmen des Halogenstrahlers auf die gewünschte Beleuchtungsstärke verschiebt sich die Lichtfarbe von 2900K bis zu 2000K. Dieser Wert beeinträchtigt die Wahrnehmungsstabilität. Beim LED-Strahler hingegen erfolgt das Anpassen der Beleuchtungsstärke, ohne dass die Lichtfarbe wahrnehmbar verändert wird.
Bei der Farbwiedergabe zeigen sowohl Halogen- als auch LED-Strahler sehr gute Werte von Ra > 90. Lediglich bei höheren Farbtemperaturen, wie 6500 K (tageslichtweiß), sinkt die Farbwiedergabe beim LED-Strahler auf Ra 84. Farben werden also von beiden Lampentechniken ähnlich gut wiedergegeben.

Die Bewertung der Beleuchtungsstärken hat gezeigt, dass die Halogenleuchte auf der „Harlekin“-Zeichnung Ungleichmäßigkeiten aufweist, die auch dem Betrachter nicht verborgen bleiben. Trotzdem sollte dieses Kriterium nicht überbewertet werden, da die gleichmäßige Inszenierung eines Gemäldes oft nicht erstrebenswert ist. Vielmehr kann ein Exponat auch durch bewusst eingesetzte Hell-/Dunkelzonen passend inszeniert werden.



Beleuchtung mit Halogenstrahler Xenos M 1/100W QR111, gedimmt, 110 mA

	x y CCT in K E in lx	1	2	3	4
A		0,5240 0,4040 1930 124,9	0,5240 0,4034 1966 146,2	0,5243 0,4028 1940 133,2	0,5163 0,4095 2030 104,1
B		0,5190 0,4079 2035 117,6	0,5154 0,4080 2035 128,0	0,5150 0,4082 2030 124,8	0,5150 0,4090 2035 107,2
C		0,5226 0,4030 1956 93,1	0,5244 0,4013 1956 99,3	0,5234 0,4030 1970 96,1	0,5180 0,4054 2030 71,8



Beleuchtung mit Arcoo 3 LED tunable white, 2700K, gedimmt 19 %

	x y CCT in K E in lx	1	2	3	4
A		0,4661 0,4150 2663 143,21	0,4650 0,4150 2670 144,1	0,4635 0,4157 2690 138,2	0,4630 0,4155 2705 127,7
B		0,4656 0,4156 2682 143,7	0,4645 0,4156 2670 145,3	0,4632 0,4164 2690 140,8	0,4620 0,4160 2700 129,9
C		0,4655 0,4140 2660 130,6	0,4642 0,4146 2670 130,9	0,4635 0,4142 2680 126,1	0,4626 0,4136 2674 125,8

Abb.3: Schädigungspotential und Schwellenbestrahlungsdauer

Die Aufnahme elektrischer Energie ist beim LED-Strahler um ca. 50 Prozent geringer als bei einem Halogenstrahler. Im ungedimmten Bereich sind es 30 Prozent.

4. Bewertung der Ergebnisse

Die LED-Beleuchtung ist effizienter als die Halogenbeleuchtung.
Die Farbwiedergabewerte der LED sind für die Museumsanwendung sehr gut geeignet, wenn auch in manchen Punkten schwächer als das kontinuierliche Spektrum von Halogenstrahlern. Vor allem beim Dimmen ergeben sich immense Vorteile, weil die Lichtfarbe stabil bleibt.
Das Schädigungspotential der LED-Beleuchtung ist in Bereichen bis ca. 3500 K geringer als jenes der Halogenbeleuchtung. Im Falle hochsensibler Objekte sollten deshalb möglichst warmweiße Lichtfarben ausgewählt werden. Außerdem sollte für schonende Beleuchtung zusätzlich eine Präsenzüberwachung integriert werden, die die LED-Strahler nur bei Anwesenheit von Besuchern aktiviert. Vorteil bei LED: Das Lebensdauerverhalten dieser Lichtquelle wird durch häufiges Schalten nicht beeinträchtigt.

5. Referenzen

/1/ Zumtobel Research: Vermessung der Beleuchtung von Pablo Picassos „Harlekin“ (1916) im Stadtmuseum Lindau
http://www.zumtobel.com/media/downloads/Studie_Kunst_und_Kultur_Picasso_de.pdf
/2/ Prüfbericht PB320/2011:„Vermessung der Beleuchtung von Pablo Picassos Harlekin“ (1916) im Stadtmuseum Lindau, 2011, S. Söllner, N. Müller
/3/ CIE 157/2004 – Technical Report: „Control of damage to Museum objects by optical radiation“

Die Dimensionen der Lichtqualität: Ein neues ganzheitliches Konzept für Planung und Anwendung

Dipl. Ing. Birthe Tralau
Zumtobel Lighting GmbH
Schweizerstr. 30
A-6851 Dornbirn
Fon:+43 5572 390 1281
Email: birthe.tralau@zumtobel.com

Dipl. Ing. Peter Dehoff
Zumtobel Lighting GmbH
Schweizerstr. 30
A-6851 Dornbirn
Fon:+43 5572 390 687
Email: peter.dehoff@zumtobel.com

Dipl. Ing. Carolin Liedtke
Technische Universität Berlin (TU Berlin)
Einsteinufer 19
10587 Berlin
Fon: +49 30 314 2986
Email: carolin.liedtke@tu-berlin.de

Mit Unterstützung des Expertenforums Innenraumbeleuchtung (EFI) der LiTG

1. Problemstellung

Es ist deutlich spürbar, dass aktuelle Projekte sehr stark von Vorgaben zur Energieeinsparung und Kosteneffizienz geprägt sind. Oft geht dies zu Lasten der Lichtqualität, so dass zwar normative Kriterien der Beleuchtung erfüllt werden, aber die Bedürfnisse des eigentlichen Nutzers eine untergeordnete Rolle spielen.
Dabei ist der direkte Zusammenhang der Nutzeranforderungen und der Lichtqualitätskriterien entscheidend. Lichtqualität verbindet die Ansichten unterschiedlichster Personen wie Fachleute, Endnutzer, Architekten oder Investoren und grenzt sie ab von den Faktoren der Energieeffizienz und der Kosten. Je nach Anwendung entstehen spezifische Bedürfnisse der Personen, so dass jeweils geeignete Werkzeuge und Maßnahmen zur Erfüllung der Anforderungen in der Lichtplanung eingesetzt werden müssen. Nicht zuletzt ist die Lichtqualität die Erfüllung aller bestehenden Anforderungen, die teils quantitativ, teils qualitativ zu bewerten sind.
Die vielschichtigen Dimensionen und ihre Abhängigkeiten zwischen Anwender, Projektprozess und Qualitätsparametern wurden im Zuge des Auftrags der LitG, zur Formulierung einer Schrift über die Lichtqualität, transparent aufbereitet. Es wurde ein Modell gefunden, dass die komplexen Zusammenhänge der Lichtqualität vereinfach darstellt und so als Leitfaden für Planer, Nutzer oder Investor verwendet werden kann.

2. Zielsetzung

Ziel der Schrift ist es, ein Bewusstsein für ganzheitliche Lichtlösungen und Qualitätsfaktoren zu schaffen, die über die normativen Kriterien hinausgehen und die Bedürfnisse unterschiedlicher Anwender berücksichtigt. Dafür wurden die Anforderungen

und beschreibenden Lichtqualitätskriterien erfasst und in Umsetzungsmaßnahmen der Lichtplanung transparent abgebildet. Empfehlungen zum Erreichen und Erhöhen der Lichtqualität lassen sich ableiten und mittels quantitativer und qualitativer Größen messen und bewerten.

3. Was ist innovative / “best practise“ an der Lösung?

Mit dem Prozess, der im nächsten Abschnitt „Realisierungsgrad“ beschrieben wird, ist es gelungen, die Komplexität von Lichtqualität ganzheitlich darzustellen und den Zusammenhang zwischen Bedürfnis, Maßnahmen der Lichtplanung und deren Bewertung anwendbar zu machen. Dies schafft nicht nur Bewusstsein über die Lichtqualitätskriterien, sondern stellt einen Leitfaden zur ganzheitlichen Berücksichtigung von Lichtqualität über den Projektprozess dar.

4. Bewertung der eigenen Lösung im Vergleich zu anderen Lösungen

Es gibt bereits in der Historie einige Ansätze zur Beschreibung und auch zur Bewertung der Lichtqualität (Vgl. /1/,/2/,/3/,/4/,/5/,/6/,/7/,/8/). Im Gegensatz zu den bisherigen Ausarbeitungen schafft das vorgestellte Modell erstmals, die Anforderungen unterschiedlicher Nutzer in Abhängigkeit zu konkreten Maßnahmen der Lichtplanung in den einzelnen Anwendungsbereichen zu setzen und diese anschließend zu bewerten. Neben einer reinen Sammlung oder Gewichtung von Lichtqualitätskriterien, wie sie bisher in der Literatur zu finden sind, stellt diese Arbeit ein für Planer und Nutzer anwendbares Modell zu ganzheitlichen Betrachtung von Lichtqualität dar.

5. Realisierungsgrad

5.1 Lichtqualität

Bisher konnte keine Kennziffer gefunden werden, die die Bewertung von Nutzern auf die Lichtwirkung vorhersagt. Zu viele, teils messbare, teils individuelle Kriterien sind notwendig, um Lichtqualität adäquat zu beschreiben.

Alle bisherigen Ansätze zur Definition der Lichtqualität stimmen darüber überein, dass Lichtqualität jeweils die Ansichten unterschiedlicher Personengruppen verbindet. Fachleute, sei es der Lichtplaner oder der Architekt, sowie der Nutzer haben unterschiedliche Anforderungen und Erwartungen an die Lichtqualität. Eine hohe oder gute Lichtqualität ist erreicht wenn die Anforderungen ganzheitlich erfüllt werden können. Die Beteiligung der Benutzer in dem Entwicklungsprozess liefert eine wertvolle Wissensquelle über den Nutzungskontext. Die Akzeptanz und Benutzerbeteiligung nimmt mit wachsender Interaktion zwischen Lichtplanung und Benutzern zu. Eine Iteration mit dem Benutzer führt deshalb zu einer schrittweise Verbesserung der Lichtqualität.

Am Ende des in der Schrift entwickelten Vorgehens wird das Lichterleben durch den Nutzer in einer Anwendung beurteilt und mit den zuvor definierten Anforderungen abgeglichen. Dabei ist für das Konstrukt der Lichtqualität zunächst irrelevant von welcher Lichtquelle die Lichtwirkung erzeugt wird. Es kann also sowohl das Tageslicht die Lichtwirkung in einem Raum bestimmen, als auch die Beleuchtungslösung durch Kunstlicht. Dennoch muss man beachten, dass die Beurteilung der Lichtqualität sich je nach Tageszeit und Vorhandenseins des Tageslichts ändert.

In Abbildung 1 wird der Prozess zum Erreichen von Lichtqualität .

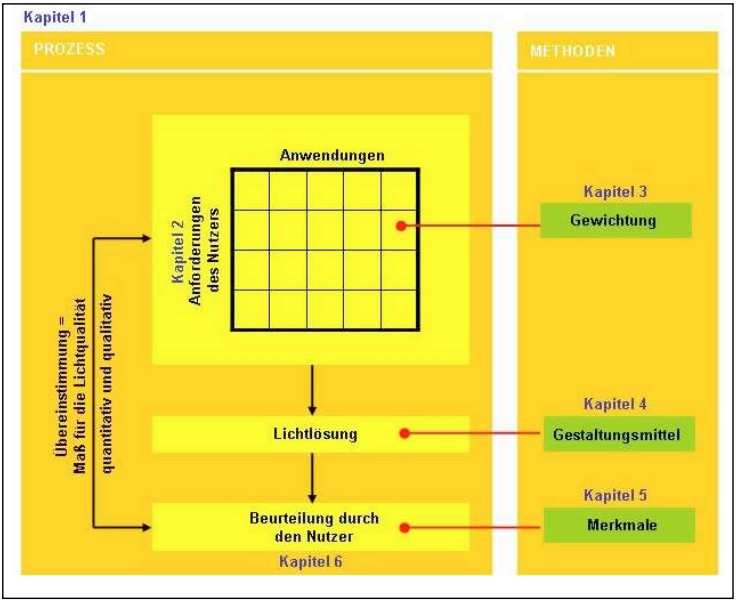


Abb. 1: Beschreibung der Lichtqualität als Prozess

In der Zusammenfassung beschreibt Lichtqualität demnach das Erleben der Lichtwirkung bzw. der Lichtverteilung in einem Raum oder einer Umgebung. Prozesse und Methoden sind notwendig um ein derartiges Konstrukt zu fassen. Dabei stellt sich Lichtqualität als eine dynamische Größe dar. Sie wird von den Anforderungen des Nutzers definiert und ist relativ. Letztendlich ergibt sich das Maß der Lichtqualität aus dem Abgleich zwischen Anforderungen an eine Lichtlösung und der Beurteilung dieser.

5.2 Anforderungen

Es besteht allgemein Konsens darüber, dass die Anforderungen der Nutzer weit über die reine Erkennbarkeit der Sehaufgabe hinausgehen. Weitere Anforderungen, die sich beispielsweise aus individuellen Bedürfnissen entwickeln oder das ästhetische Empfinden, können für die qualitative Wahrnehmung eines Raumes jedoch ebenfalls entscheidend sein. In der vorliegenden Methode wurden die Anforderungen in vier Untergruppen unterteilt:

- Funktionale Anforderungen
- Biologische Anforderungen
- Psychologische Anforderungen
- Architektonische Anforderungen

Die Tabelle 1 zeigt die Anforderungen im Überblick.

Funktionale Anforderungen	Biologische Anforderungen	Psychologische Anforderungen	Architektonische Anforderungen
• Sehen und Identifizieren von Details (Sehschärfe / Kontrast) • Sehen und Identifizieren von Formen (räumlich) • Sehen und Identifizieren von Farben und Farbunterschieden • Schnelligkeit des Sehens und Identifizierens • Sehen und Identifizieren über die Zeit / Visuelle Leistungsfähigkeit • Aufmerksamkeits-führung • Ordnung / Unterscheidbarkeit • Physische Sicherheit • Objektsicherheit	• Körperliche Aktivierung • Körperliche Erholung • Circadiane Rhythmik • Strahlungsschutz • Physiologische Wirkung	• Räumliche Orientierung • Zeitliche Orientierung • Orientierung über das Geschehen • Privatheit / Kommunikation • Persönliches Territorium • Selbstdarstellung / Repräsentation • Gerechtigkeit • Sicherheitsgefühl • Eigene Kontrolle • Geistige Aktivierung • Geistige Erholung • Vertrautheit / Überraschung (keine Monotonie)	• Gliederung des Raumes nach Form • Gliederung des Raumes nach Rhythmik (Symmetrien) • Gliederung des Raumes nach Modulen • Unterstützung des Charakters und Stimmung der Architektur unterstützen • Betonen architektonischer (gestalterischer) Besonderheiten

Tab. 1: Anforderungen an die Lichtqualität nach den Untergruppen

5.3 Anwendungsbezogene Anforderungen

Die anwendungsbezogenen Anforderungen beschreiben die für die jeweilige Anwendung zu erfüllenden Aspekte. Die Anforderungen werden zunächst innerhalb ihrer Relevanz gewichtet und sind je nach Anwendung unterschiedlich.

Die mittlere Anforderung beschreibt dabei die allgemeine Anforderung in einer Anwendung. Die Anwendung selber ist nur ein Überbegriff. Sie kann in vielen unterschiedlichen Ausprägungen und Tätigkeiten vorkommen.

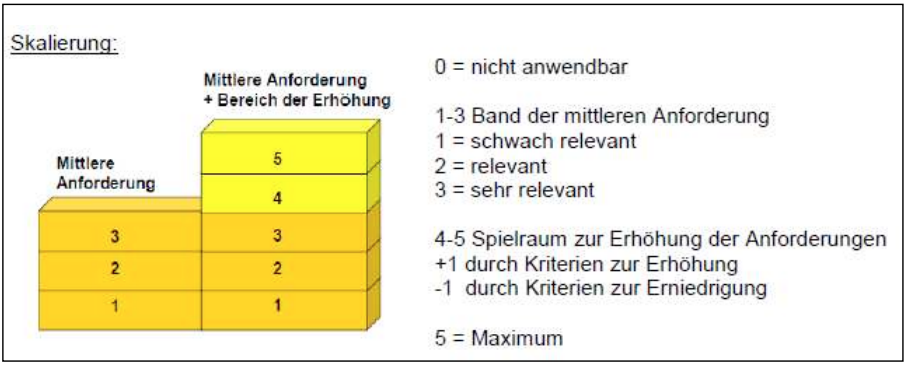


Abb. 2: Skalierung der Anforderungen je Anwendung

So kann es in den jeweiligen Einzelanwendungen Aspekte geben, die zu einer Erhöhung oder Erniedrigung der mittleren Anforderung führen.

Dabei werden die mittlere Anforderung jeweils um den Wert +1 erhöht oder - 1 erniedrigt, unabhängig davon was der Ausgangswert der mittleren Anforderung ist (siehe Abbildung 2). Mit dem Wert 5 ist das Maximum der Erhöhung erreicht, mit dem Wert 0 das Minimum der Erniedrigung. Die Abbildung 3 zeigt am Beispiel des Büros, wie die mittleren Anforderungen für diese Anwendung und die weiteren Einzelanwendungen gewichtet werden.

	Mittlere Anforderung Büro	Chefbüro	Einzelbüro	Gruppenbüro	Großraumbüro	Besprechungsraum	Eigene Anforderungen
Funktionale Anforderungen							
Adäquate Sichtbarkeit von Details	**2**	2	2	2	2	1	
Adäquate Sichtbarkeit von Formen	**2**	2	2	2	2	2	
Adäquate Sichtbarkeit von Farben	**2**	2	2	2	2	2	
Schnelligkeit der adäquaten Sichtbarkeit	**2**	2	2	2	2	2	
Adäquate Sichtbarkeit über die Zeit / Visuelle Leistungsfähigkeit	**3**	2	2	3	3	2	
Aufmerksamkeitsführung	**1**	3	2	1	1	1	
Ordnung / Unterscheidbarkeit	**1**	2	2	2	2	1	
Physische Sicherheit	**1**	1	1	1	1	1	
Objektsicherheit	**0**	0	0	0	0	0	
Biologische Anforderungen							
Körperliche Aktivierung	**3**	3	3	3	3	3	
Körperliche Erholung	**3**	3	3	3	3	3	
Circadiane Rhythmik	**2**	2	2	2	2	1	
Strahlungsschutz	**1**	1	1	1	1	1	
Physiologische Wirkung	**1**	1	1	1	1	1	
Psychologische Anforderungen							
Räumliche Orientierung	**2**	2	2	3	3	2	
Zeitliche Orientierung	**3**	3	3	3	3	2	
Orientierung über das Geschehen	**2**	2	2	2	2	2	
Privatheit	**2**	3	3	2	2	1	
Persönliches Territorium	**2**	3	3	2	2	1	
Selbstdarstellung / Repräsentation	**1**	3	3	2	2	2	
Gerechtigkeit	**2**	1	1	2	3	1	
Sicherheitsgefühl	**2**	2	2	2	2	2	
Eigene Kontrolle	**1**	2	2	1	1	3	
Geistige Aktivierung	**3**	3	3	3	3	3	
Geistige Erholung	**3**	3	3	3	3	3	
Vertrautheit	**2**	2	2	2	2	1	
Architektonische Anforderungen							
Gliederung des Raumes nach Form	**1**	2	1	1	2	1	
Gliederung des Raumes nach Rhythmik	**1**	1	1	1	2	1	
Gliederung des Raumes nach Modulen	**1**	1	1	1	1	1	
Charakter und Stimmung der Architektur unterstützen	**1**	2	1	1	1	1	
Architektonische (gestalterische) Besonderheiten betonen	**1**	2	1	1	1	1	

Abb. 3: Beispiel für die Gewichtung von Anforderungen für die Anwendung Büro

Für folgende Anwendungen beinhaltet die Schrift eine Gewichtungsmatrix:

- Büro
- Bildung

- Krankenhaus
- Pflege
- Industrie
- Kunst und Kultur
- Hotel
- Shop

5.4 Gestaltungsmittel der Lichtlösung
Um die Anforderungen der Nutzer erfüllen zu können, ist es notwendig, die Gestaltungsmittel, die einem Lichtplaner oder Anwender zur Verfügung stehen zu kennen. Diese Gestaltungsmittel stellen grundlegende Elemente der Lichtplanung bzw. Gestaltung dar, die einzeln oder auch kombiniert eingesetzt werden können.

Übersicht über die Gestaltungsmittel einer Lichtlösung:
- Lichtmenge der Lichtquelle
- Relative Größe der Lichtaustrittsfläche
- Anzahl, Anordnung und Position der Lichtquelle(n)
- Lichtfarbe
- Lichtverteilung
- Beleuchtungsart
- Spektrum der Lichtquelle
- Regel- oder Steuerbarkeit der Beleuchtung
- Bedienung der Beleuchtung

Die Lichtlösung stellt die Planung gemäß den Anforderungen mit Hilfe der Gestaltungsmittel dar.
Die Anforderungen haben je nach Anwendung spezifische Ausprägungen. Eine Verknüpfung beider Aspekte resultiert dann in einem je nach Anwendung spezifischem und nach Rangfolge der Gewichtung entstandenem Maßnahmenkatalog.

5.5 Merkmale zur Bewertung einer Lichtlösung
Um die Lichtqualität zu bewerten, werden Merkmale vorgeschlagen, die in der Lichttechnik bekannt und definiert sind. Dadurch kann der Bezug der Anforderungen zur Bewertung hergestellt werden. Es werden für jedes zur Bewertung herangezogene Merkmal zur Erfüllung der Anforderungen werden Mindestwerte vorgegeben.
Dadurch werden Maßnahmen vorgeschlagen, die zur Steigerung der Lichtqualität führen können.

Übersicht über die Merkmale zur Bewertung einer Lichtlösung:
- Beleuchtungsstärke auf der Sehaufgabe
- Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke
- Farbkontrast
- Helligkeitskontrast (gestalterisch)
- Psychologische (Direkt) Blendung
- Physiologische Blendung
- Reflexe
- Farbwiedergabe
- Lichtfarbe
- Kontrastwiedergabe
- Schlagschatten
- Ausgewogene Leuchtdichten

- Modelling
- Freiheit von Flackern / Flimmern
- Lichtzonierung
- Qualitative Aspekte

6. Diskussion

Zwei weitere Schritte sind noch notwendig um den Prozess der Lichtqualität zu vervollständigen.
Eingeführt wurden bisher die Anforderungen des Nutzers an die Beleuchtung, die die Basis der Lichtqualitätsbeurteilung darstellen. Diese können pauschal per vorgegebener Gewichtung oder individuell auf die Anwendung fokussiert werden.
Anschließend wurden die Gestaltungsmittel des Planers vorgestellt, mit denen die Anforderungen in eine Lichtlösung umgesetzt werden können. In einer weiterführenden Arbeit muss eine konkrete Verknüpfung zwischen den Gestaltungsmitteln und den Anforderungen erarbeitet werden, so dass sich als Konsequenz ein auf die Anforderungen des Nutzers angepasster Maßnahmenkatalog ergibt.
Letztendlich stellt eine gute Lichtqualität die Übereinstimmung zwischen den Anforderungen des Nutzers auf der einen Seite und der Beurteilung der Lichtlösung auf der anderen Seite dar. Zu dieser Beurteilung wurden zunächst quantitative Größen der Lichttechnik eingeführt, die eine Beurteilung der Lichtsituation ermöglichen. Diese quantitativen Größen decken aktuell jedoch nur einen Teil der Anforderungen ab. Für eine vollständige Bewertung der Lichtqualität ist zusätzlich die qualitative Beurteilung des Nutzers notwendig. Die Kombination von beidem und der Grad der Erfüllung der Anforderungen stellt schließlich das Maß an Lichtqualität dar.
Die Grundlage für die Beurteilung durch den Nutzer ist der Maßnahmenkatalog der sich aus der anforderungsbezogenen Umsetzung der Lichtlösung mit Hilfe der Gestaltungsmittel ergibt. Qualitativ hat der Nutzer zu beurteilen welche Maßnahmen ausreichend umgesetzt wurden, um die Anforderungen zu erfüllen.
Diese beiden, bisher noch fehlenden Aspekte sollten in einer weiterführenden Arbeit beleuchtet werden und in der realen Anwendung geprüft werden.

Referenzen

/1/ Stein, B., Reynolds, J.S. & McGuiness, W.J. (1986) Mechanical and electrical equipment for buildings (7th edition) New York: Wiley

/2/ Veitch, J.A. & Newsham, G.R. (1998). Determination of lighting quality I: State of the science. Journal of the Illuminating Engineering Society, 27(1),92-106

/3/ Lighting handbook (8th edition). New York: Illuminating Engineering Society of North America

/4/ Flynn,J.E., Hendrick, C., Spencer, T. & Marytyniuk,O. (1979) A guide to methodology procedures for measuring subjective impressions in lighting. Journal of the Illuminating Engineering Society.8, 95-110

/5/ Veitch, J.A. (2001).Psychological processes influencing lighting quality. NRCC-42469

/6/ Veitch, J.A. & Newsham, G.R. (2006). Quantifiying Lighting Quality Based on Experimental Investigations of End User Performance and Preference. NRCC-38940

/7/ Bean, A. R. & Bell, R. I. (1992) The CSP index: A practical measure of office lighting quality as perceived by the office worker. Lighting Research and Technology, 24, 215-225

/8/ Rowlands, E., Loe, D.L., McIntosj, R.M. & Mansfield, K.P. (1985), Lighting adequacy and quality in office interiors by consideration of subjective assessment and physical measurement. CIE Journal. 4:23-37

Entwicklung einer Hybridleuchte mit LEDs und OLEDs

B.Sc. Johannes Seifermann, Prof. Dr. Paola Belloni
Hochschule Furtwangen, Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen,
Robert-Gerwig-Platz 1, 78120 Furtwangen
Dipl.-Ing. Oliver Stefani, Dipl.-Ing. Achim Pross, Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

1. Problemstellung und Vorarbeit

Der Einsatz von LED-Leuchten an Arbeitsplätzen bietet gegenüber den herkömmlichen Beleuchtungslösungen eindeutige Vorteile. Die neusten LED-Leuchten sind dimmbar und lassen sich dank Computeranbindung dynamisch dem sich ständig verändernden Tageslicht anpassen; aber gerade im Bereich Blendung müssen oft Kompromisse akzeptiert werden. Das Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO) widmet sich dem Thema „Licht und Mensch“ seit 2008 und hat im März 2010 eigens dafür ein neues Lichtlabor eröffnet. Ein gemeinsames Projekt mit der Hochschule Furtwangen stellte bei Probanden die Akzeptanz neuer LED-Leuchten fest. In einem Usabilitylabor wurde dazu von den getesteten Leuchten die Farbtemperatur gemessen und anschließend der UGR-Wert ermittelt.

Um die subjektive Blendung zu ermitteln war es notwendig eine ausgewogene Probandengruppe zu finden. Besonderer Wert wurde hierbei auf Geschlecht, Alter, Beruf und Gesundheit gelegt. Durch eine Befragung vor dem Test wurden weitere Einflussfaktoren wie etwa Schlafgewohnheiten, Arbeitszeiten, Alkoholkonsum oder persönliche Befindlichkeit erfasst. Die Probanden testeten jeweils vier verschiedene Leuchten und mussten dabei unterschiedliche bürotypische Arbeiten erledigen (Arbeiten am PC, Abschreiben eines Textes von Hand, Artikel in einer Zeitschrift lesen). Ein Fragebogen ermittelte im Anschluss an den Test die Beleuchtung (im Raum, beim Lesen, beim Arbeiten und die Helligkeit der Leuchte), die Blendung (Allgemein, beim Lesen und beim Arbeiten) sowie die psychologische Wirkung (Müdigkeit und Aufmerksamkeit). Durch die Bewertung der Probanden konnten die spezifischen Vor- und Nachteile der untersuchten Leuchten ermittelt und Anforderungen an eine zukünftige LED-Arbeitsplatzleuchte gestellt werden.

Die Gesamtbetrachtung der objektiven Ergebnisse ergab keine eindeutig favorisierte Leuchte. Die Blendung wurde von den Probanden als zufriedenstellend wahrgenommen, lediglich die indirekte Blendung beim Lesen der Zeitschrift wurde bemängelt (Abb.1.). Die Aussagen für die Beleuchtung beim Lesen und Arbeiten liegen sehr eng beieinander. Geringe Unterschiede lassen sich bei der Beleuchtung im Raum, sowie bei der Helligkeit der Leuchte ausmachen.

Die Auswertung des Usability-Tests zeigte auch deutlich das unterschiedliche Anforderungsverhalten der unterschiedlichen Probandengruppen. So nahmen weibliche Tester öfter Bezug auf das Leuchtdichteverhältnis im Raum, männliche Probanden bezogen sich eher auf die Blendung und Helligkeit der Leuchten.

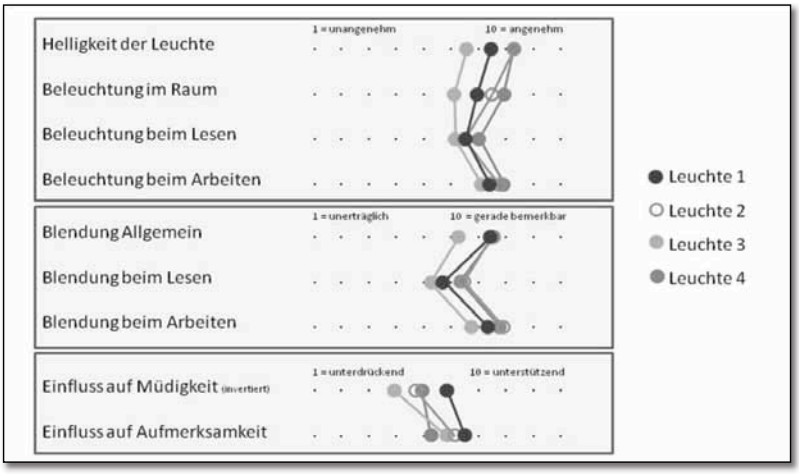


Abb.1:Gesamtergebnis der Untersuchung der vier LED-Leuchten

2. Zielsetzung

Basierend auf den gewonnen Erkenntnissen der vorangegangenen Versuchsreihe wurde eine Neukonzeption einer Arbeitsleuchte für Innenraumanwendungen geplant. Berücksichtigt wurde dabei zum einen das Thema Blendung, der technische Fortschritt der Leuchtmittel und Erkenntnisse aus der physiologischen Wirkung von Licht.

Um die Blendung des Anwenders zu reduzieren kommen daher 9 OLEDs zum Einsatz. Diese homogenen und blendfreien Flächenlichtquellen sind prädestiniert dafür Blendungserscheinungen zu minimieren. Für eine ausreichend starke Beleuchtung kommen zusätzlich spezielle LEDs zum Einsatz, welche die Fotorezeptoren im Auge anregen und indirekten Einfluss auf die biologische Rhythmik des menschlichen Körpers haben. Dadurch können Phasen der Aktivität und Entspannung bewusst unterstützt werden.

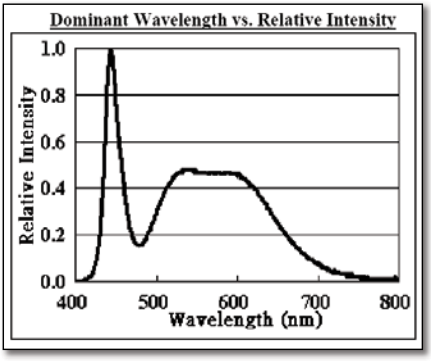


Abb.2:Spektrale Energieverteilung der LEDs (Model AS-3528WCA2-C2 von Alder)

Mit diesem Hintergrund wurden die LEDs auf ihr Spektrum hin untersucht: zum Einsatz kommt das Model AS-3528WCA2-C2 von Alder. Die Farbtemperatur liegt bei dieser LED

bei 5.500 Kelvin und sie hat eine Lichtausbeute von 70 lm/W. Deutlich zu erkennen ist der größte Peak bei einer Wellenlänge von 460nm und damit genau im Bereich von biologisch aktivem Licht. Die LEDs sind als Streifen mit jeweils 54 LEDs erhältlich. Insgesamt kommen bei dieser Leuchte 6 solcher Streifen zum Einsatz.

Als OLED wird das rechteckige Model ORBEOS RMW-046 von Osram eingesetzt. Diese blendfreie homogene Lichtquelle war das erste OLED-Serienprodukt auf dem Markt und zeichnet sich durch seine sehr gute Farbwiedergabe sowie schnelle Schaltzeiten aus. Die Farbtemperatur liegt mit 2.800 Kelvin im warm-weißen Bereich und die Lichtausbeute liegt bei 10,4 lm/W. Die OLED ist insgesamt nur 1,8 cm dünn und hat eine Gesamtgröße von 12,5 cm x 4,7 cm.

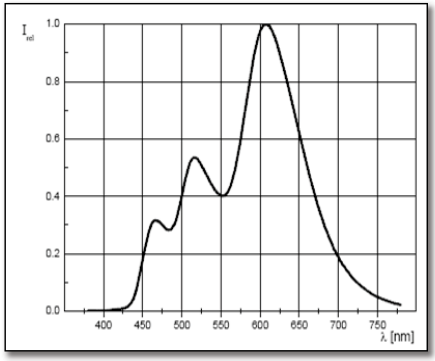


Abb.3: Bild der OLED (links: Model ORBEOS RMW-046 von Osram) und spektrale Energieverteilung

Die optische Simulation der Leuchte wurde mit Hilfe des Simulationsprogramms LightTools durchgeführt. Abb.3 zeigt die berechnete Beleuchtungsstärke aus einem Abstand von 1m. Das Beleuchtungsmaximum liegt hier bei 740 Lux und erstreckt sich auf einer Fläche von 40 cm x 30 cm. Die durchschnittliche Beleuchtungsstärke über die gesamte Fläche (1,60 m x 0,80 m) beträgt 520 Lux. Somit werden die durch die DIN EN 12464-1 vorgeschriebenen Mindestbeleuchtungsstärken eingehalten.

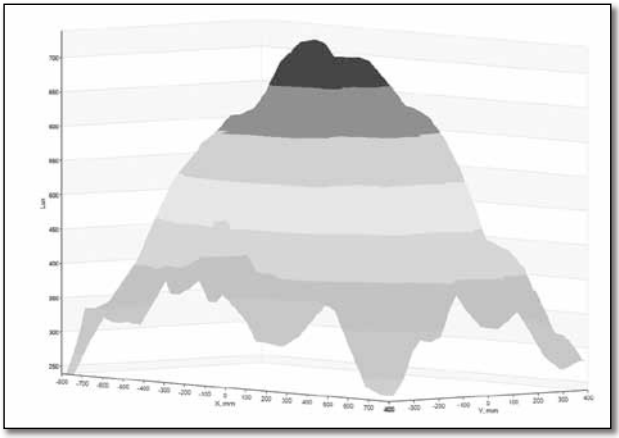
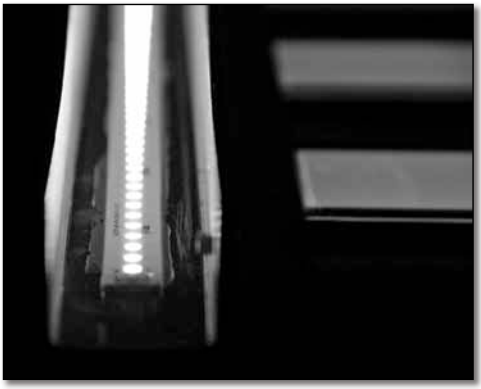


Abb.4: Berechnete Beleuchtungsstärkeverteilung der Hybridleuchte

Ein Prototyp der Leuchte wurde wie folgt realisiert. Die Rahmenkonstruktion der Leuchte wurde aus 1,5 mm bzw. 3 mm dickem Aluminium hergestellt, welches anschließend weiß lackiert wurde. Es wurde Wert darauf gelegt, dass die Installation der Lichtquellen schnell und unkompliziert erfolgt. Betrieben werden beide Lichtquellen mit einem Vorschaltgerät. Die LEDs können gedimmt und der gewünschten Helligkeit angepasst werden. Dank der geringen Wärmeentwicklung der LEDs und OLEDs, konnte auf das Anbringen von Kühlkörpern verzichtet werden. Dies wirkt sich, auch Dank des Aluminiums, positiv auf das Gesamtgewicht der Leuchte aus. Das schmale, längliche Design orientiert sich an bisherigen Modellen der Arbeitsplatzbeleuchtung.



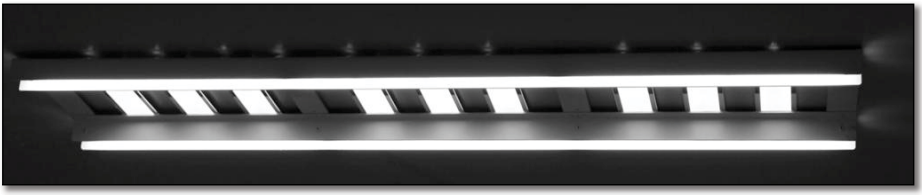


Abb.5: Abbildungen der Hybridleuchte mit LEDs (oben) und OLEDs (unten)

Erste Messungen der Leuchte bestätigten die berechneten Beleuchtungsstärkewerten.

3. Was ist innovativ / “best practice" an der Lösung?

Die Kombination von OLEDs und LEDs als Lichtquellen für eine Pendelbüroleuchte ist neu, da OLEDs bisher hauptsächlich in Designerschreibtischleuchten verwendet wurden. Um die Ganglienzellen im Auge bestmöglich anzuregen und damit den Effekt des biologisch wirksamen Lichts nutzen zu können, ist eine flächige Beleuchtung notwendig. Im Gegensatz zur LED als Punktlichtquelle, bieten OLEDs als Flächenlichtquelle diese Möglichkeit. Beschränkungen müssen zurzeit noch aufgrund geringer Leuchtmittelauswahl hingenommen werden, jedoch sind neue Fertigungsstraßen für die nächste OLED-Generation bereits fertiggestellt.

4. Realisierungsgrad

Die Leuchte wurde als Prototyp fertiggestellt. Dabei wurde für Anschauungszwecke auf eine Anbringung von Diffusoren bzw. lichtlenkenden Strukturen unten den LEDs verzichtet. Auch die Dimmbarkeit der OLEDs wurde zunächst außer Acht gelassen. Die nächsten Schritte sind nun das Prüfen und Anbringen geeigneter Diffusoren, sowie das Dimmen der OLEDs. Außerdem steht eine lichttechnische Optimierung durch weitere optische Simulationen an. Die hier verwendeten OLEDs gehören noch der ersten Generation an und werden schon bald durch lichtstärkere Modelle abgelöst. Schon bald sind reine OLED-Leuchten möglich, die ohne unterstützende Leuchtmittel die Beleuchtungsnormen einhalten. Auch das Design und die Gestaltung der Leuchten werden sich dank flexibler Gestaltungsmöglichkeiten ändern.

LEDs als Lichtquelle für die Museumsbeleuchtung

Alexander Wilm, OSRAM Opto Semiconductors, Leibnizstraße 4, 93055 Regensburg, Deutschland

1 Einleitung

LEDs dringen in immer neue Bereiche der Allgemeinbeleuchtung vor. Dabei gibt es neben den oft genannten Vorteilen wie hohe Effizienz und lange Lebensdauern gerade in der Museumsbeleuchtung durchaus problematische Aspekte wie Farbwiedergabe und mögliche Schädigung von Ausstellungsobjekten. Gerade diese Schädigung vor dem Hintergrund des hohen Blau-Anteils im Spektrum der LEDs gibt derzeit noch Grund zur Sorge. Im Rahmen des Vortrags wird das Schädigungspotential der LED Beleuchtung kritisch hinterfragt, bewertet und im Vergleich zu konventionellen Beleuchtungslösungen eingeordnet.

2 Weißes Licht aus LED und Glühlampe

Weißes Licht wird in LEDs vorwiegend durch die Kombination eines blauen LED Chips mit und einem Phosphorkonverter erzeugt. Dabei wird das blaue Licht des Chips teilweise durch eine entsprechende Phosphormischung in Licht mit längerer Wellenlänge konvertiert. Durch die Mischung erhält man weißes Licht der gewünschten Farbtemperatur. Der Beitrag des blauen Chips ist im Spektrum deutlich als Peak zu erkennen.

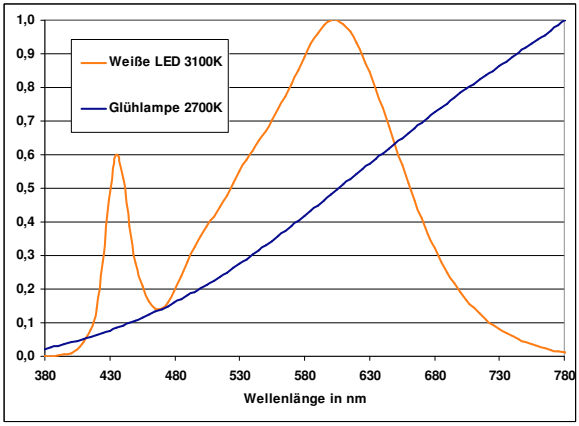


Abb. 1: Typische Spektren von weißer LED und Glühlampe

Aus der CIE 157:2004 ist bekannt, dass gerade optische Strahlung mit kürzerer Wellenlänge ein zunehmend höheres Schädigungspotential aufweist. Der oberflächliche Vergleich der Spektren von weißer LED und Glühlampe erweckt nun den Eindruck, dass die weiße LED über einen deutlich höheren Blaulichtanteil verfügt und somit schädlicher zu sein schein, als die Glühlampe. Dies ist jedoch nur vordergründig der Fall. Um eine

fundierte Aussage über das Schädigungspotential treffen zu können werden die Spektren auf Basis der CIE 157:2004 untersucht und verglichen.

3 Vergleich von Spektren hinsichtlich ihres Schädigungspotentials

In der CIE 157:2004 ist eine geeignete Methode zur Evaluierung und Abschätzung des Schädigungspotentials von optischer Strahlung auf Museumsobjekte beschrieben. Kern der Evaluierung ist die Gewichtung des Spektrums der Beleuchtung mit der relativen spektralen Objektempfindlichkeit.

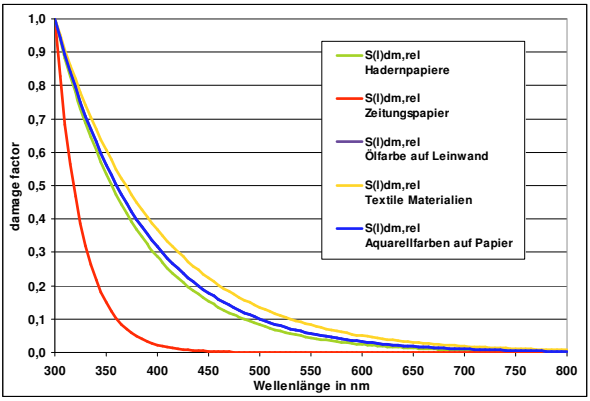


Abb. 2: relative spektrale Objektempfindlichkeit

Zusammen mit den experimentell ermittelten Schwellenbestrahlungen ist es möglich das Schädigungspotential für die unterschiedlichen Spektren und Lichtquellen abzuschätzen.
Das Schädigungspotential ergibt sich aus dem Verhältnis der objektschädigenden Bestrahlungsstärke zur Beleuchtungsstärke. Für die Berechung der objektschädigenden Bestrahlungsstärke wird die relative spektrale Objektempfindlichkeit von Aquarellfarben auf Papier zugrunde gelegt. In einem ersten Schritt werden verschiedene weiße LED Spektren mit unterschiedlichen Farbtemperaturen und Phosphormischungen mit der bereits angesprochenen Glühlampe verglichen.

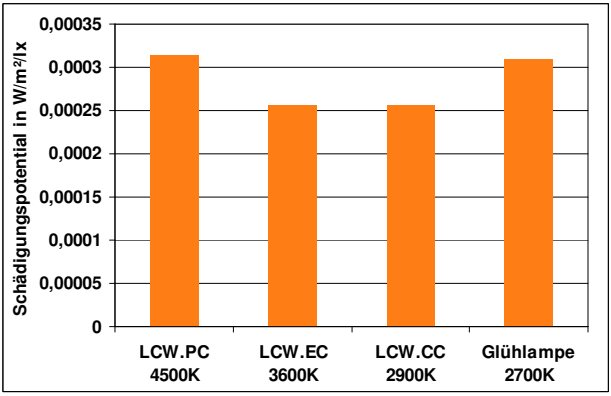
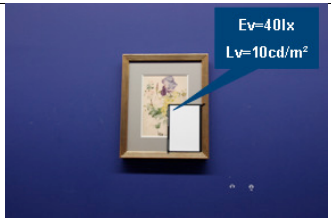
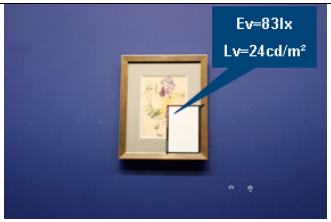
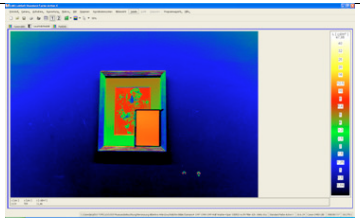
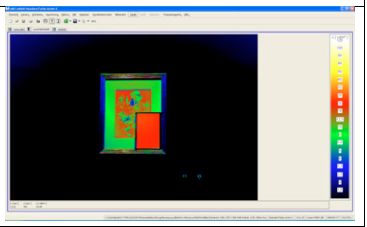
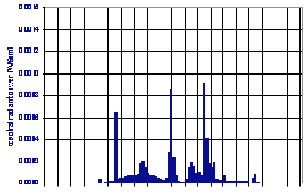
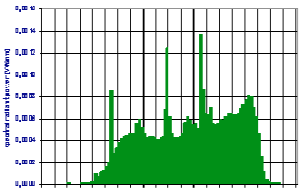


Abb. 3: Schädigungspotential verschiedener Lichtquellen

Trotz des offensichtlichen Blaupeaks der weißen LEDs ergibt sich im Vergleich mit der Glühlampe ein sogar geringeres Schädigungspotential. Demnach ist eine Beleuchtung von Museumsobjekten mit LED Beleuchtung weniger schädlich als mit einer Glühlampe.

4 Vergleich des Schädigungspotentials zwischen LEDs und einer realen Museumsbeleuchtung

In Museen werden Lichtquellen häufig mit speziellen UV- und Infrarotfiltern versehen um die Schädigung der Objekte möglichst gering zu halten. Um das Schädigungspotential von LEDs richtig einordnen zu können wurde eine repräsentative und hochwertige Beleuchtungssituation in einem Museum vermessen. Die Beleuchtung wird einerseits durch eine Grundbeleuchtung mittels Wallwasher sowie einer Akzentbeleuchtung durch einen Spot realisiert.

Beleuchtung	Wallwasher	Wallwasher + Spot
Foto und Beleuchtungs-stärkemessung		
Leuchtdichte-verteilung		
Spektrum		

Tab. 1: Beleuchtungsszenario im Museum

Als Lichtquelle wurde für die Grundbeleuchtung mittels Wallwasher eine Fluoreszenzlampe, für die Spotbeleuchtung eine Halogenlampe verwendet. Beide sind mit den für Museen üblichen UV und IR Filtern ausgestattet.

Erneut wurden die Spektren von einer möglichen LED Beleuchtung sowie das gemessene Spektrum der existierenden Museumsbeleuchtung auf 50lx Beleuchtungsstärke normiert und bezüglich des Schädigungspotentials auf ein Gemälde mit Aquarellfarben auf Papier bewertet.

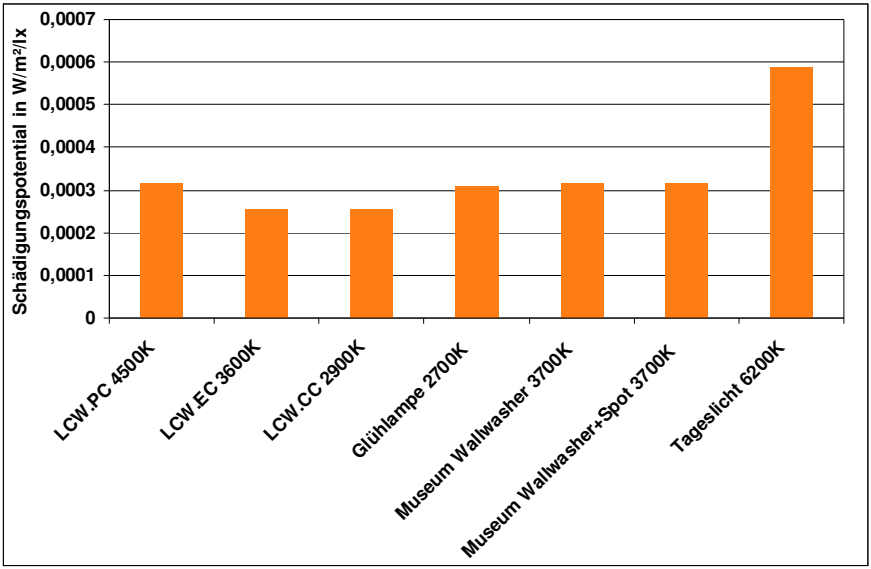


Abb. 4: Vergleich des Schädigungspotentials

Der Vergleich zeigt, dass die LED Lösungen bei vergleichbarer Farbtemperatur ein ähnliches, sogar geringeres Schädigungspotential aufweisen als existierende hochwertige Lösungen für Museumsbeleuchtung. Das Schädigungspotential von Tageslicht ist nur exemplarisch aufgeführt, da viele Museen versuchen auf Tageslicht zu verzichten, um die Schädigung der Museumsobjekte so gering wie möglich zu halten.

5 Fazit

Moderne Leuchtdioden sind sehr wohl als Lichtquellen für hochwertige Museumsbeleuchtung geeignet. Der offenkundige Blaupeak im Spektrum der weißen LED wirkt abschreckend, stellt jedoch bei genauer Betrachtung keine Gefahr für die empfindlichen Objekte dar. Neben dem geringeren Schädigungspotential macht die hohen Lichtausbeute sowie die lange Lebensdauer die LED zur idealen Lichtquelle im bereich der Museumsbeleuchtung.

[1] CIE, Control of damage to museum objects by optical radiation, Publ. CIE 157:2004

Hallenbeleuchtung in der Automobilindustrie. Aktueller Stand der Entwicklung am Beispiel des VW Konzerns

Matthias Strutz *VW Wolfsburg* *matthias.strutz@volkswagen.de*
Norbert Wasserfurth *Studio DL Hildesheim* *wasserfurth@studiodl.com*

Abb. 1: Darstellung eines integriertes Hallen- und Shedbeleuchtung-Konzeptes für das Stammwerk in Wolfsburg

Die Hallenbeleuchtung stellt in der Planung von Industriebauten einen sehr hohen Stellenwert da. Die eingesetzten Leuchten hatten in der Vergangenheit nicht selten eine Standzeit von 30 Jahren und wurden oft an mehr als 8000h im Jahr betrieben. Die Abstimmung eines einheitlichen Beleuchtungskonzeptes erfordert die Einhaltung von hohen Qualitätsstandards, abgestimmter Untersuchungsmethoden und die Erfüllung der hausinternen Kriterien einer Industrietauglichkeit. Ein intensiver Dialog mit der Industrie sollte diesen Prozess begleiten. Ziel war es, eine energieeffiziente Lösung zu schaffen, mit der sowohl die Halle als auch das Umfeld beleuchtet werden kann (Abb.1). Die Untersuchungsmethoden beinhalten je nach Detaillierungsgrad der Aufgabe auch eine Überprüfung der Blendung und Umgebungshelligkeit mittels einer ortsaufgelösten Leuchtdichtemessung (Abb.2)

Die Untersuchung, die im Jahr 2008 begonnen wurde, umfasste die Beurteilung von fünf Lichtsystemen unterschiedlicher Leuchtenhersteller. Die Ergebnisse wurden in einer Tabelle Zusammengefast, dabei wurden sowohl technische Parameter als auch „weiche Faktoren“ wie: Montagefreundlichkeit, optischer Eindruck, Wartung und die Kosten bewertet. Um eine ganzheitliche Bewertung zu erleichtern und eine objektive Beurteilung der Lichtsysteme durchführen zu können wurde für alle Kriterien eine Beurteilungsskala eingeführt (Tabelle 1).

Bewertung	***Note***	***Symbol***
sehr gut	1	**++**
gut	2	**+**
neutral	3	**o**
ungenügend	4	**-**
schlecht	5	**--**

Tabelle 1: Bewertungsskala der Untersuchung

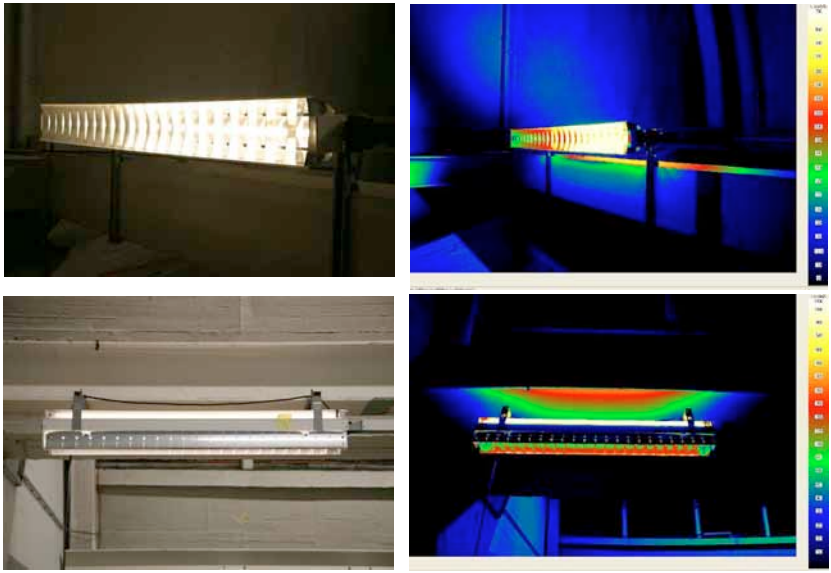


Abb. 2: Beispiel eines Probeaufbaus zu Beurteilung der Blendung und der Hintergrundleuchtdichte

Hersteller		A	B	C	D	E
Leistung		35W / 35W	58W / 58W	58W / 35W	35W / 35W	49W / 35W
Spezifische Anschlusswert W/100lx m2		2,65	2,99	3,28	2,5	2,79
Lichttechnische Werte laut Hersteller	Emittel G	260 lx 0,66	287 lx 0,83	226 lx 0,45	243 lx 0,81	261 lx 0,62
	Evertikal G	158 lx 0,76	118 lx 0,8	85 lx 0,65	83 lx 0,62	133 lx 0,62
	UGR	< 19	< 19	< 19	< 16	< 19
	Leuchtdichte G	29 cd/m2 0,79	23 cd/m2 0,79	31 cd/m2 k.A.	12,86 cd/m2 0,79	35,7 cd/m2 0,7
Montage / Wartung		Keine Tragschiene --	 +	 +	zu schwer --	Schwer auszurichten -
Bestückung / Leistung		Einheitlich +	Einheitlich +	 -	 +	 -
Optische Eindruck		-	o	o	--	+
L Shed gemessen		16,1 cd/m2 -	20 cd/m2 o	13,9 cd/m2 o	16 cd/m2 -	32 cd/m2 +
Blendung gemessen		 +	Kein Raster -	 +	 +	 +
Kosten		-	++	+	--	-
Bewertung		2,8	2,5	2,8	3,6	3

Tabelle 1: Ergebnisse der Untersuchung der Lichtsysteme für das Werk Wolfsburg aus dem Jahr 2010

Bereits in der ersten Phase der Untersuchung wurde sichtbar, dass die Schwerpunkte der Hersteller auf unterschiedliche Aspekte der Lichtsysteme gelegt wurden und nicht immer alle Kriterien der Industrietauglichkeit erfühlt wurden. Zum Beispiel der Hersteller D, der definitiv die besten Werte im Bereich Energieeffizienz

mit einem spezifischen Anschlusswert von 2,5W/m²/100lx erreicht hat, wurde auf Grund der schlechten Montagefreundlichkeit des Systems, der höchsten Anschaffungskosten und des optischen Eindrucks, am Ende am schlechtestem bewertet (Tabelle 2). Selbstverständlich wurden für alle Systeme auch die Gesamtjahreskosten und die Payback-Zeit des Systems, die mit der Energieeinsparung gekoppelt ist, berechnet und ausgewertet. Die Wartungskosten und Anschaffungskosten der Anlagen fließen in dieser Bewertung zahlenmäßig in das Ergebnis mit ein. Diese Daten werden jedoch nicht publiziert.

Die Untersuchungen wurden im Jahr 2011 fortgesetzt, es ging in erster Linie um die Wahl der Produkte für die Sanierung von bestehenden Anlagen und die neu entstehenden VW-Werke in Russland, Indien und der USA. In dieser Betrachtung spielen neue Aspekte wie Logistik, Verpackung und Vertriebsnetz des Herstellers ebenfalls eine Rolle. Die Entwicklung der LED-Technologie machte es möglich auch diese Technik in die Betrachtung mit einbeziehen. Bereits nach einer kurzen Zeit wurde es klar, dass die sogenannten LED-Röhren (Retro fit) bei VW keine Rolle spielen werden. Interessant war, zu beobachten, wie sich die Energieeffizienz der Hallenbeleuchtung (Anforderung Beleuchtungsstärke 200lx) bei VW in den letzten Jahrzehnten entwickelt hat (Tabelle 3).

TECHNISCHE DATEN	vor 1985	90er Jahre	2008/9	2008/9	2010	2011	2013?
Lampentyp:	2x65W	2x58W	2x58W	2x36W	2x54W	2x35W	
Systemleistung:	160W	132W	110W	72W	121W	78W	
Anzahl Leuchten: (24mx24m)	45 Stk	24 Stk	24 Stk	40Stk	21Stk	24Stk	
Leistung/ 24mx24m:	7.200W	3.168W	2.640W	2.880W	2.541W	1.872W	
W/m² (200lx):	13W/m²	5,5W/m²	4,6W/m²	5W/m²	4,4W/m²	3,3W/m²	<3W/m²

Tabelle 2: Entwicklung der Hallenbeleuchtungssysteme bei VW

Die Effizienz der Hallenbeleuchtung hat sich in den letzten 30 Jahren im Bereich der Systemleistung der einzelnen LL-Hallenleuchten von 160W auf 78W pro Lichtpunkt also um 51% verringert. Noch deutlicher fällt der Vergleich des tatsächlichen Energieaufwands pro m² einer typischen VW-Hallenbeleuchtung bei einer Anforderung an die Beleuchtungsstärke von 200lx. Dieser Wert hat sich in den letzten 30 Jahren von 13W/m² auf 3,3W/m² verringert, die damit verbundene Ersparnis liegt bei 75%. Selten wird in diesem Zusammenhang erwähnt, dass bei großen Konzernen wie VW der Einzug der EVG's und der T16 Leuchtstofflampe erst mit der Entwicklung der Industrie EVG's, mit einer zu erwartender Lebensdauer von 100.000h, möglich war. Der Einsatz von konventionellen EVG's mit einer

Lebensdauer von 50.000h bedeutet bei 8000h/Jahr eine Lebensdauererwartung von ca. 6 Jahren. Ein Zustand, den keine Instandhaltungsabteilung akzeptieren konnte.

Diese hervorragende Werte, die auch den Fortschritten in der Entwicklung der Lichtoptiken zu verdanken sind, stellen eine natürliche Barriere für den Einzug der LED-Technologie dar – ein Wert von 3,3W/m² wird schwer zu schlagen sein. Wie in der Tabelle 4 dargestellt, erreichen die LED-Leuchten heute theoretisch die angeforderten Werte und sind mit den T16 Lösungen vergleichbar oder besser. In der Praxis werden jedoch besonders in den vertikalen Ebenen schlechtere Werte erzielt. Die Lebensdauer der elektronischen Betriebsgeräte muss der Lebensdauer der LED-Module angepasst werden.

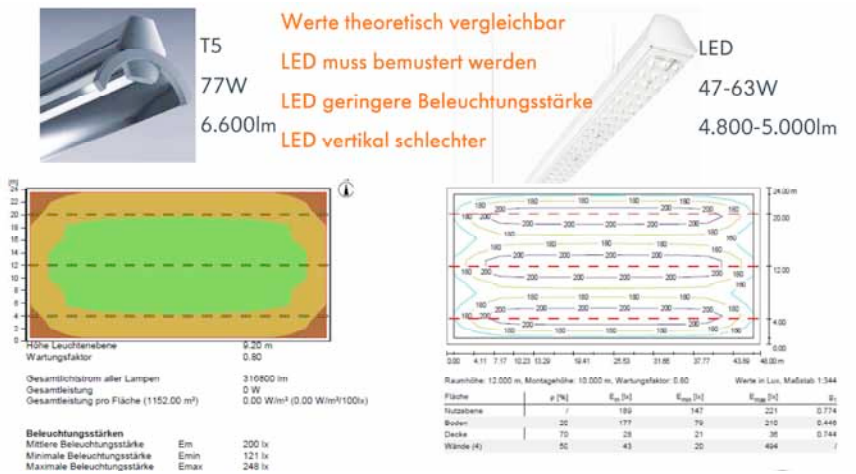


Tabelle 3: Vergleich der T16 Lichtbandsysteme mit Lösungen auf LED-Basis

In Folge der Untersuchung wurde der Leuchtenkatalog von VW aktualisiert und erweitert. Der Konzern erzielt Dank der Modernisierungsmaßnahmen nicht nur hohe Energieersparnisse, sondern auch eine wesentliche Verbesserung der Lichtqualität am Arbeitsplatz. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen den Stand der Technik aus Sicht eines Automobilherstellers. Nicht alle Argumente der Leuchtenindustrie bestätigen sich in der Praxis. Besonders bei der Entwicklung neuer LED-Produkte sollte auf folgendes geachtet werden:

- Die Lichttechnische Effizienz der Produkte wird sehr oft durch höhere Lichtstärken in den Hauptrichtungen erzielt, dies kann niedrigere Helligkeitsniveaus in den vertikalen Flächen verursachen
- Die Lebensdauer der Betriebsgeräte spielt in industriellen Anwendungen eine entscheidende Rolle

- Die LED-Technologie bieten neue Lösungsansätze, die nicht nur lichttechnische sondern auch logistische Vorteile bieten könnten
- Die Austauschbarkeit der LED Module und LED Treiber muß gewährleistet sein, da sowohl Entwicklung und Marktdurchdringung rasant steigen.

Der Vortrag zeigt mit welcher Intensität an der Erarbeitung von neuen Lichtkonzepten in Großkonzernen gearbeitet wird. Die lichtspezifischen Ergebnisse stellen den aktuellen Stand der Lichttechnik bis Anfang 2012 dar. Es empfiehlt sich, ähnliche Untersuchungen auch für andere Bereiche durchzuführen. Weiter Informationen sind bei den Autoren der Publikation erhältlich.

Matthias Strutz
Norbert Wasserfurth

Quellen

Alle Abbildungen und Tabellen stammen aus den internen Präsentationen der Abteilung Fabrikplanung VW und Forschungsergebnissen des Unternehmens Studio DL / Dynamisches Licht.

Mit LED 80% Strom sparen gegenüber T5-Lampen bei Korridorbeleuchtung

Stefan Gasser, Dipl. El. Ing. ETH/SIA
elight GmbH, Schaffhauserstr. 34, CH-8006 Zürich
+41 (44) 273 08 62, sg@elight.ch

1 Ausgangslage und Zielsetzung

Die Stadt Zürich hat im Jahr 2005 das Hochhaus Werd von der Bank UBS übernommen und das Gebäude anschliessend vollständig saniert. Beim Umbau wurde speziell auf Nachhaltigkeit und Energieeffizienz geachtet, auch bei der Beleuchtung. So wurden die ersten Minergie-Stehleuchten eingesetzt, die speziell für dieses Gebäude entwickelt wurden und halb so viel Strom brauchten wie damals übliche Stehleuchten.

Abbildung 1: Aussenansicht Verwaltungszentrum Werd in der Stadt Zürich

Auch die Korridorbeleuchtung wurde nach dem damals besten Stand der Technik realisiert. Das architektonischen Konzept verlangte durchgehende Lichtbänder. Diese wurden mit den effizientesten Leuchtstoffröhren (35 Watt, Typ T5) bestückt; und weil die Lichtbänder bei Volllast mehr als die verlangten 100 Lux Beleuchtungsstärke lieferten, wurde eine konstante Dimmung der elektronischen Vorschaltgeräte auf rund 60% des Lichtstromes programmiert. Mittels Bewegungsmeldern wurde zudem eine automatische Abschaltung der Korridorbeleuchtung bei Abwesenheit von Personen installiert (nach jeweils 10 Minuten).

Messungen zeigten später, dass die Personenfrequenz in den Korridoren so hoch ist, dass es mit der 10-minütigen Ausschaltverzögerung bei den Bewegungsmeldern nur zu sehr wenigen Abschaltungen kommt und die erhoffte Reduktion der Betriebszeiten dieser Beleuchtung mit über 3'000 Stunden pro Jahr bei weitem nicht erreicht wird. Da man Leuchtstofflampen wegen ihrer langsamen Aufstartzeit von mehreren Minuten aber nicht kürzer schalten sollte, gab es keine Möglichkeit, die Beleuchtungsregelung in den Korridoren zu optimieren.

Mit dem Einzug der LED-Technik steht nun neu eine Beleuchtungstechnik zur Verfügung, die viel flinker geregelt werden kann und die zudem keine Verluste bei der Dimmung aufweist – im Gegensatz zur Dimmung von Leuchtstofflampen. Mit einem Pilotprojekt in einem Korridor des Verwaltungszentrums Werd wollte das Amt für Hochbauten testen, wie viel Energie sich beim Ersatz eines 30 Meter langen Lichtbandes durch LED und gleichzeitiger Reduktion der Verzögerungszeiten bei den Bewegungsmeldern einsparen lässt.

Abbildung 2: Korridor im VZ-Werd mit Lichtbändern

2 Messungen

Es wurden also zwei identische Korridore (30 m auf 2,4 m) während mehreren Wochen mit je einem Energie- und Leistungsmessgerät ausgemessen. In beiden Korridoren herrschen dieselben Beleuchtungsstärken und Lichtverteilungen. Die zwei Beleuchtungen lassen sich kaum unterscheiden.

- Korridor 1 mit Leuchtstofflampen und Präsenzmeldern mit 10-Minuten-Intervall
- Korridor 2 mit LED-Licht-Linie und Präsenzmeldern mit 1-Minute-Intervall

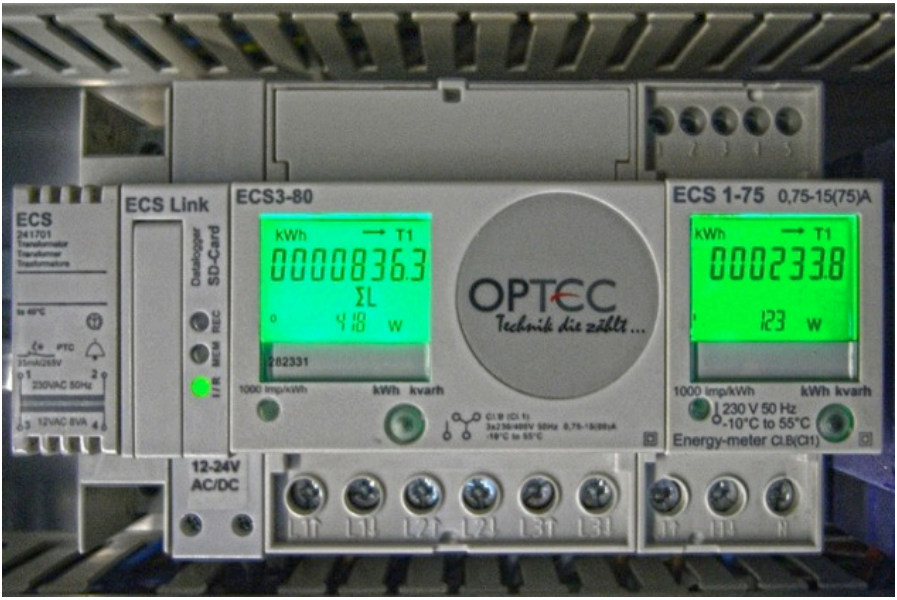


Abbildung 3: Energie- und Leistungsmessgerät mit Datenlogger für SD-Karte

3 Auswertung

Das Resultat ist beeindruckend. Die LED-Beleuchtung spart gegenüber der bisherigen Leuchtstofflampentechnik über 80% elektrische Energie ein.

Einerseits reduziert sich die elektrische Leistung, weil LED im Gegensatz zu Leuchtstofflampen keine Dimmverluste ausweisen; im vorliegenden Fall von 5,9 W/m² (Leuchtstofflampen) auf 2,6 W/m² (LED).

Andererseits reduzieren sich die täglichen Betriebszeiten aufgrund der kürzeren Schaltzeiten von durchschnittlich 13,2 h/d bei der Beleuchtung mit Leuchtstofflampen auf 5,7 h/d bei LED. Während die Leuchtstofflampen über die Bewegungsmelder lediglich 4-mal pro Tag ein und ausschaltet, sind es bei der LED-Beleuchtung über 100-mal.

Daraus ergibt sich eine Reduktion der Energiekennzahl Beleuchtung für die Korridorbeleuchtung von 19,5 kWh/m² auf 3,6 kWh/ m², was einer effektiven Energieeinsparung von 81% entspricht.

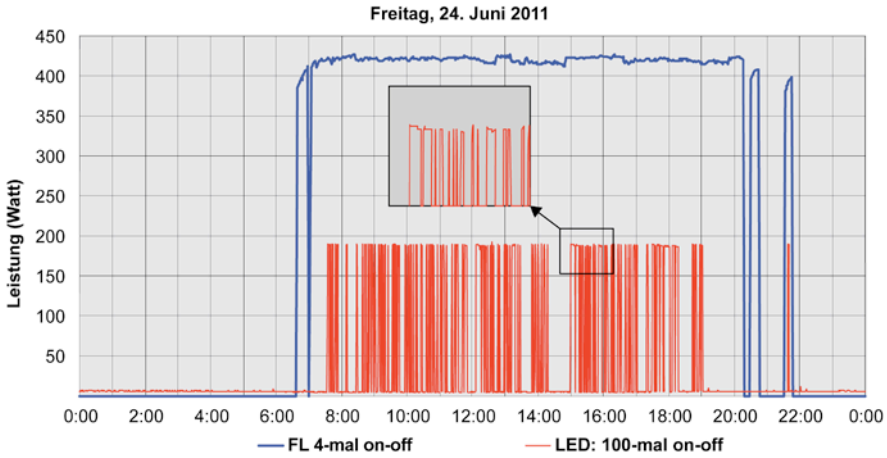


Abbildung 4: Tagesgang der Leistung an einem typischen Werktag

Es stellte sich auch die Frage, ob das häufige Ein- und Ausschalten das Personal beeinträchtig. Systematische Befragungen dazu wurden zwar keine gemacht, aber es sind auch keine Reklamationen bekannt; offensichtlich bemerkten die Angestellten gar keine Änderung. Ergänzend dazu wurde versuchsweise eine zusätzliche Stufe in der LED-Beleuchtung eingefügt, bei welcher das Licht nicht völlig ausschaltet, sondern auf 15% Lichtstrom bleibt. Durch dieses Komfortlicht, welches den Effekt des häufigen Schaltens stark lindert, geht die Einsparung zurück, allerdings nur geringfügig: die Gesamteinsparung sinkt von 81% auf 77%.

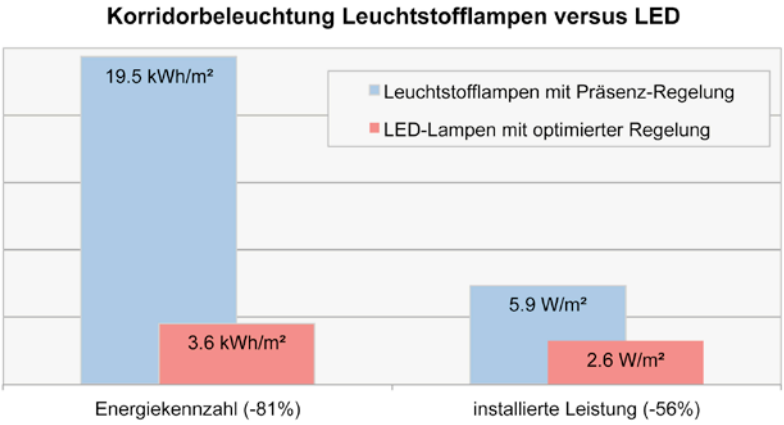


Abbildung 5: Einsparung Energieverbrauch und installierte Leistung

4 Energiebilanz und Wirtschaftlichkeit

Hochgerechnet auf ein Jahr ergibt sich eine Reduktion der Energiekennzahl Beleuchtung von 19,5 kWh/m² (Grenzwert SIA: 19,0 kWh/m²) bei der bisherigen Beleuchtung mit Leuchtstofflampen auf 3,8 kWh/m² (Zielwert SIA: 7,5 kWh/m²) mit LED-Leuchten.

	LED-Lampen	Kompaktleuchtstofflampen
max. Betriebsleistung	187 W	420 W
Betriebsstunden	1'463 h/a	3'343 h/a
Energieverbrauch	274 kWh/a	1404 kWh/a
Energiekennzahl	3,8 kWh/m²	19,5 kWh/m²
	0.80 Fr./m²a	3.90 Fr./m²a
Grenzwert SIA 380/4	19,0 kWh/m²	
Zielwert SIA 380/4	7,5 kWh/m²	
Anforderung Minergie	10,5 kWh/m²	

Tabelle 1: Energiebilanz LED versus FL

Es ergibt sich eine jährliche Stromeinsparung von 15,7 kWh/m² oder 3.10 Fr./m², das entspricht 7.50 Fr/a. pro Laufmeter Korridor. Da LED-Leuchten während der gesamten Nutzungszeit (15 Jahre) keine Ersatzlampen benötigen, mindern sich auch die Unterhaltskosten – erfahrungsgemäss um etwa den gleichen Betrag wie die Energiekosteneinsprung. Bei einer angenommenen Mehrinvestition von 100 Franken pro Laufmeter LED-Licht im Korridor ergibt sich also eine Amortisationszeit der LED-Beleuchtung von gut sechs Jahren.

5 Fazit

Dieses Resultat des Messprojektes zeigt exemplarisch auf, das die LED-Technik mit entsprechender Lichtregelung ein enormes Sparpotenzial aufweist gegenüber heute üblichen – als energieeffizient geltenden – Korridorbeleuchtungen. Beachtenswert ist ausserdem, dass Lichtregelungen in heute üblichen Beleuchtungsanlagen in der Praxis meist viel weniger Einsparungen bringen als vermutet. Der Einsatz von LED in Beleuchtungen bringt auch gestalterische Vorteile: Die unbeliebten „Schattenschnäuze" zwischen den Leuchtstofflampen sind bei LED-Lampen nicht vorhanden (Abbildung 6).

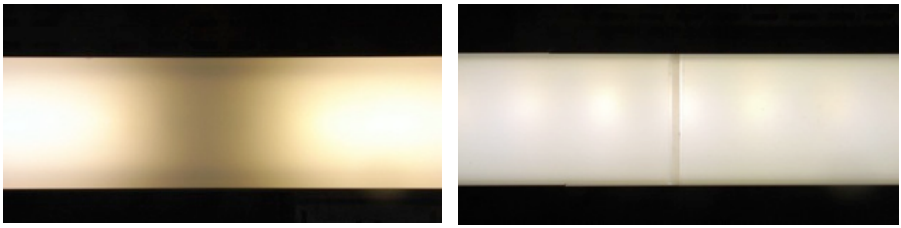


Abbildung 6: Übergang von einer Leuchte zur anderen: links Leuchtstofflampe, rechts LED

Innenraumbeleuchtung mit LED- und Leuchtstofflampen - lichtmesstechnische und visuelle Feldtests

Dipl.-Ing. Marvin Böll, Dipl.-Ing. Friederike Geßner, Dipl.-Ing. Wjatscheslaw Pepler, Prof. Dr.-Ing.-habil. Tran Quoc Khanh

1.Problemstellung

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

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

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

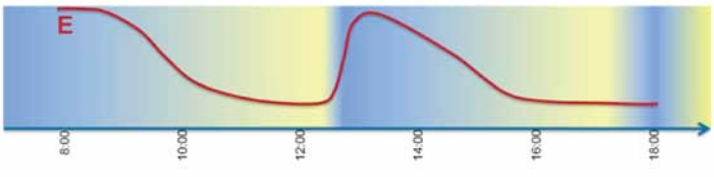


Abbildung 1: Konzept der aktivierenden Beleuchtung

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

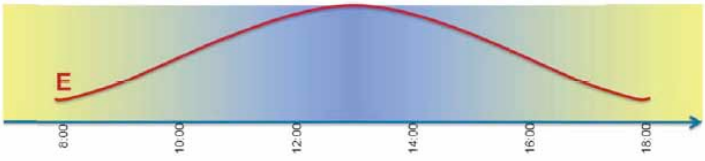


Abbildung 2: "natürliche" Beleuchtung

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

Ziel des Beitrages

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

Stand der Forschung und Forschungshypothesen

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

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

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

2.Messungen

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

Tabelle 1: Fensterausrichtung der vermessenen Büroräume

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

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

Die Messwerte wurden in den Monaten Januar, Februar, April und Mai aufgenommen. Der Großteil der Büros (35) ist mit Langfeldleuchten vom Typ T5 und Farbkennung 840 ausgestattet. Die restlichen vier Räume sind mit T5 Leuchten mit einer Farbkennung 958

ausgestattet. Die Beleuchtungsstärke und die Farbtemperatur wurden an sechs selbst definierten Messpunkten mit einem Farbmessgerät HCT-99 der Firma Gigahertz-Optik aufgenommen (siehe Abbildung 3).

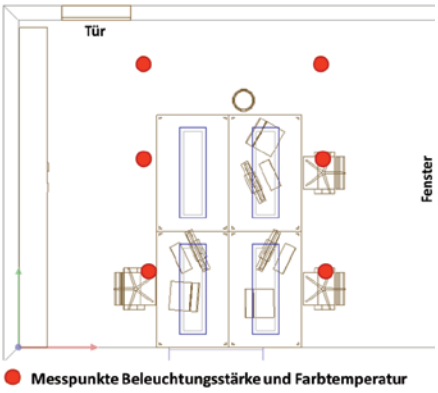


Abbildung 3: Beispiel für die Verteilung der Messpunkte im Raum

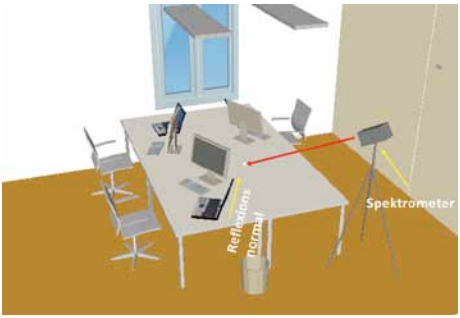


Abbildung 4: Beispiel für den Messpunkt für das Spektrum

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

Ergebnisse

Beleuchtung

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

Tabelle 2: Beleuchtungsstärke für die Monate Januar und Februar

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

Abbildung 5 zeigt die prozentuale Verteilung der jeweiligen Beleuchtungssituationen.

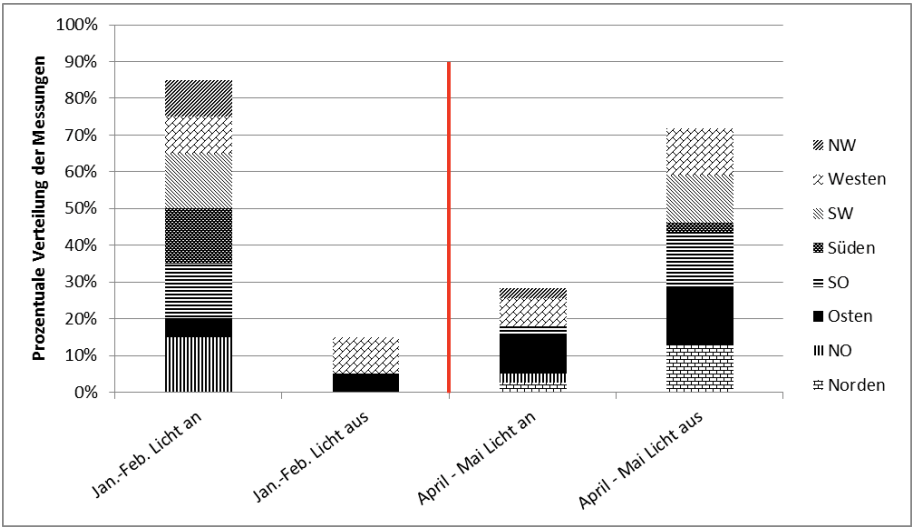


Abbildung 5: Prozentuale Verteilung der aufgenommenen Beleuchtungssituationen

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

Farbtemperatur

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

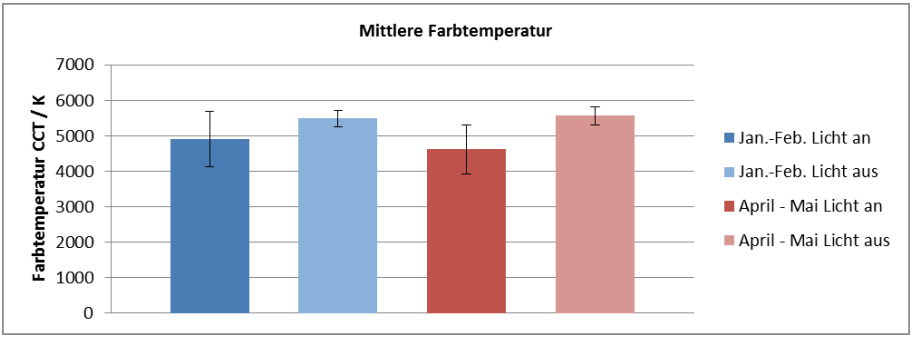


Abbildung 6: Farbtemperatur für die Monate Januar, Februar, April und Mai

Farbwiedergabe

In Abbildung 7 sind die gemittelten Farbwiedergabewerte Ra an den acht bekannten CIE-Farben mit moderater Sättigung sowie der gemittelte R9- Wert (gesättigtes Rot) für die Monate April und Mai dargestellt.

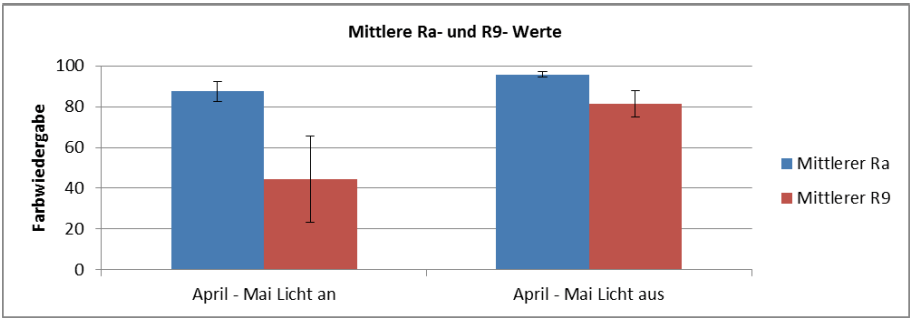


Abbildung 7: Farbwiedergabe für die Monate April und Mai

Der Abbildung ist zu entnehmen, dass die Farbwiedergabe mit eingeschaltetem Licht geringer ist als bei ausgeschaltetem Licht. Besonders groß sind die Unterschiede bei den R9-Werten. Generell sind die Farbwiedergabewerte an Büroarbeitsplätzen mit künstlicher Beleuchtung geringer als mit natürlichem Licht. Wie bei der Farbtemperatur kann man annehmen, dass die auftretenden Unregelmäßigkeiten durch die Fensterausrichtung sowie durch Oberflächenreflexionen und Anteil der Sonnenstrahlung zustande kommen.

Spektren

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

Tabelle 3: Messbedingung der ausgewählten Büroräumlichkeiten

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

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

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

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

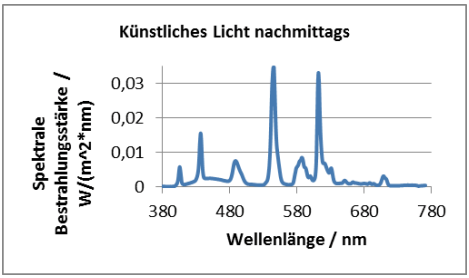


Abbildung 8: Spektrum Raum 19

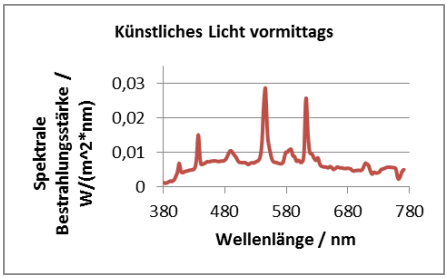


Abbildung 9: Spektrum Raum 38

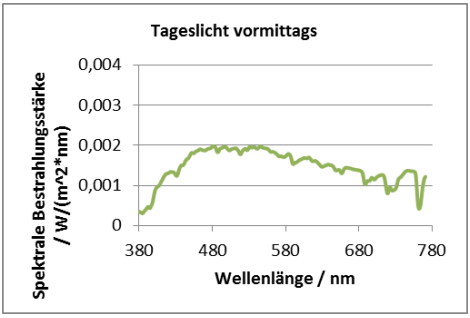


Abbildung 10: Spektrum Raum 24

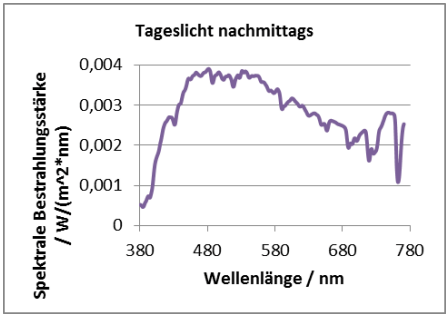


Abbildung 11: Spektrum Raum 22

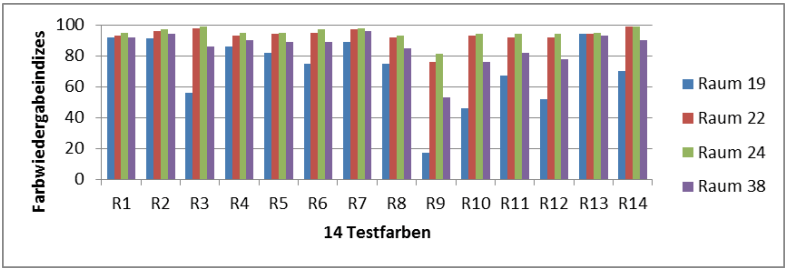


Abbildung 12: Farbwiedergabeindizes der vermessenen Räume

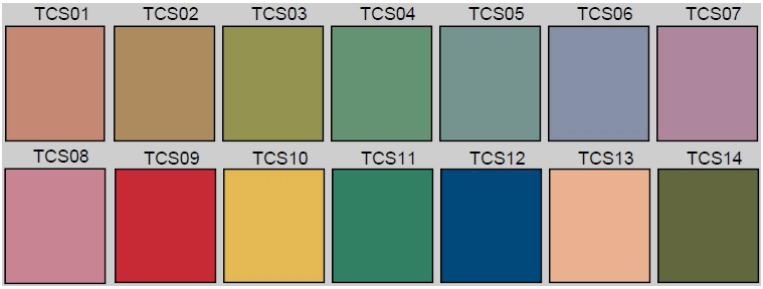


Abbildung 13: CIE-Testfarben TCS01-TCS14 zur Bestimmung der Farbwiedergabeindizes [6]

3. Zusammenfassung

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

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

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

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

4.Danksagung

Diese Forschungsarbeit wird mit der Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Forschungsprojekts UNILED (Förderkennzeichen: 13N10751) durchgeführt. Die Autoren bedanken sich herzlich beim BMBF für diese Finanzierungsmöglichkeit.

Literatur

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

Führt dynamisches Kurvenlicht zu einer Veränderung des Blickverhaltens?

Carmen Kettwich, Tuan Duy Nguyen, Cornelius Neumann
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Lichttechnisches Institut (LTI), Geb. 30.34
Engesserstrasse 13, 76131 Karlsruhe

1 Einleitung

Obwohl lediglich ein Viertel aller Unfälle nachts geschehen, ist unter Berücksichtigung des Verkehrsaufkommens das Risiko in einen Unfall verwickelt zu werden nachts zwischen zwei und dreimal höher als tagsüber [Sig98]. Eckert [Eck93] zufolge spielen bei der Hälfte aller Unfälle Wahrnehmungsprobleme eine Rolle. Meist sind sich die Fahrer über die visuellen Einschränkungen nachts nicht bewusst [Owe99], so dass sie ihre Geschwindigkeit den Sehbedingungen nicht entsprechend anpassen [Lei98], [Wör96].

Außerhalb von geschlossenen Ortschaften waren im Jahr 2010 Kurven mit einem Unfallanteil von 26 % die Unfallstellen mit dem größten Risiko. 36 % aller Verunglückten starben in Kurven [Des07]. Demzufolge sollten Kurvendurchfahrten sicherer gestaltet werden. Eine Möglichkeit ist der Einsatz von Fahrerassistenzsystemen, wie die des Kurvenlichtes.

Fahrerassistenzsysteme tragen einerseits dazu bei, das Unfallgeschehen positiv zu beeinflussen, andererseits unterstützen sie den Fahrer bei seiner Fahraufgabe und tragen damit zu einer Komforterhöhung bei. Bisherige Untersuchungen des Kurvenlichtes stellten einen signifikanten Anstieg der Erkennbarkeitsentfernungen bei Fahrt mit Kurvenlicht im Vergleich zur Fahrt ohne Kurvenlicht fest. Dieser Effekt wird, aufgrund der Asymmetrie der Abblendlichtverteilung, in Rechtskurven besonders deutlich [Ewe01].

Ziel dieser dynamischen Felduntersuchung ist es, das Blickverhalten in Kurven mit und ohne Kurvenlicht zu ermitteln und miteinander zu vergleichen.

2 Versuchsdesign

2.1 Versuchsaufbau

Als Versuchsfahrzeug kommt ein A6 Avant, ausgestattet mit einem remote Eye-Tracking-System der Firma Smart-Eye, zum Einsatz. Letzteres besteht unter anderem aus drei auf dem Armaturenbrett montierten, auf den Fahrer gerichteten Trackingkameras aus denen ein Blickvektor generiert wird und einer Szenenkamera neben dem Innenspiegel, welche die Straßenszene vor dem Fahrzeug aufnimmt. Neben jeder Trackingkamera befindet sich eine infrarote Strahlungsquelle, die die Erkennbarkeit des Fahrzeugführers auch bei Nacht gewährleistet. Mittels PC wird der Blickvektor mit den Bildern der Szenenkamera synchronisiert, zusammengefasst und mit einer eineindeutigen Zeitmarke (Framenumber) versehen, so dass daraus die exakte Blickrichtung ermittelt werden kann.

2.2 Versuchsstrecke

Der ca. 25 km lange Rundkurs umfasst hauptsächlich unbeleuchtete Landstraßen. Um eventuelle Störeinflüsse durch Fremdlicht zu minimieren, verläuft die Teststrecke größtenteils durch Wälder und unbebautes Gebiet. Die Durchfahrzeit einer Runde beträgt ungefähr 20-25 min.

2.3 Probandenkollektiv

20 Probanden im Alter zwischen 18 und 60 Jahren nehmen an der dynamischen Felduntersuchung teil, wovon die Hälfte weiblichen Geschlechts ist. Zehn Testpersonen sind älter als 40 Jahre. Die Geschlechter sind gleichmäßig in den Altersgruppen „unter 40 Jahre“ und „mindestens 40 Jahre“ verteilt. Voraussetzungen, wie Fahrroutine und ein binokularer Fernvisus größer als 0,8, werden definiert um an der Untersuchung teilnehmen zu können. Aufgrund unzureichender Genauigkeit des Eye-Tracking-Systems bei Brillenträgern werden diese Personen bereits im Voraus ausgeschlossen. Um eine Beeinflussung der Testpersonen zu vermeiden und somit deren Erwartungshaltung zu beeinflussen, werden diese über den eigentlichen Versuchsgegenstand erst nach Beendigung der Versuchsfahrt und dem Ausfüllen des Fragebogens aufgeklärt.

2.4 Versuchsdurchführung

Nach einer Beschreibung des Versuchsablaufes und Erläuterung der grundlegenden Bedienelemente des Fahrzeuges beginnt die Einfahrzeit, damit sich der Proband an das Fahrzeug gewöhnen kann. Die Einfahrzeit beträgt ca. 20 min. Der sich daran anschließende Rundkurs wird sowohl mit, als auch ohne Kurvenlicht durchfahren. Die Runde ohne Kurvenlicht dient als Referenzfahrt. Um die beiden Runden besser miteinander vergleichen zu können und weitere Einflüsse auszuschließen, darf ausschließlich mit Abblendlicht gefahren werden. Während der Fahrt ist jegliche Konversation mit dem Versuchsleiter untersagt. Nach Beendigung der Testfahrt wird dem Probanden ein Fragebogen ausgehändigt, der neben allgemeinen Fragen zur Person und zur Fahrerfahrung, spezifische Fragen zu den beiden Runden enthält. Die Versuche finden ausschließlich nachts unter trockenen Witterungsbedingungen statt.

2.5 Methodik

Um den Unterschied im Blickverhalten bei Fahrt mit und ohne Kurvenlicht zu vergleichen, wird ein einfaktorielles ausbalanciertes Within-Design gewählt.

Die Kurven werden in Links- sowie Rechtskurven unterteilt und den folgenden Radiengruppen zugeordnet:

- Kleiner Kurvenradius: $50\ \text{m} \leq r < 300\ \text{m}$
- Mittlerer Kurvenradius: $300\ \text{m} \leq r < 500\ \text{m}$
- Großer Kurvenradius: $500\ \text{m} \leq r < 750\ \text{m}$

Die Auswertung des Blickverhaltens beschränkt sich auf Kurvenabschnitte mit konstantem Radius. Kurven, die diese Voraussetzung nicht erfüllen, werden von der Auswertung ausgeschlossen. Die entsprechenden Radien werden der Datenbank des Institutes für Straßen- und Eisenbahnwesens entnommen.

Abhängig davon, ob eine Fahrbahnmarkierung vorhanden ist, werden die Kurvendurchfahrten in sechs respektive acht Zonen unterteilt (siehe Abbildung 1). Die oberen und unteren Zonen werden durch die Vorfeldgrenze (20 m vor dem Fahrzeug) voneinander getrennt. Für jede Zone wird die relative kumulierte Blickzuwendung berechnet.

Außerdem werden aus der Blickdichte Isolinien, die 10 % beziehungsweise 50 % aller Blicke enthalten, ermittelt. Ein Vergleich der Bereiche gleicher Häufigkeiten ermöglicht

Aussagen über Blickverhaltensveränderungen in Abhängigkeit von den Untersuchungsparametern.

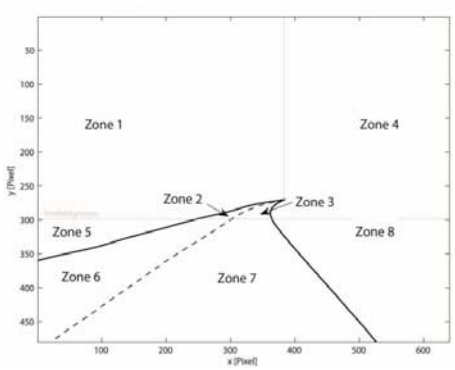


Abb. 1: Zoneneinteilung am Beispiel einer Rechtskurve mit acht Zonen

3 Ergebnisse und Diskussion

Nach Beendigung der Testfahrt werden die Versuchspersonen zu den beiden Runden befragt. Vier Testpersonen fallen Unterschiede in der Lichtverteilung auf. Weitere vier verweisen auf Veränderungen im Verkehrsaufkommen oder auf die Bekanntheit der Strecke beim zweiten Durchfahren hin. 45 % der Probanden können das Kurvenlicht sicher der entsprechenden Testrunde zuordnen, nachdem sie direkt danach befragt worden sind.

In Kurvendurchfahrten orientieren sich die Versuchspersonen hauptsächlich am Scheitelpunkt der Kurve und/ oder den Seitenmarkierungen. Inwieweit Kurvenlicht das Blickverhalten beeinflusst, wird im Folgenden näher beschrieben.

Bei Fahrt mit Kurvenlicht verschieben sich die Blicke in Linkskurven mit großen und mittleren Radien nach links und in das Fernfeld (siehe Abbildung 2). Der prozentuale Anstieg der Blicke in Zone 1 bekräftigt die Blickverschiebung. Verschiedener Untersuchungen zufolge werden höhere Erkennbarkeitsentfernungen bei Fahrt mit Kurvenlicht erreicht [Ewe01], [Neu03]. Durch die Verschiebung des Blickschwerpunktes nach links ist der Fahrer in der Lage, Gefahren und Ereignisse in der Kurve eher zu erkennen und wahrzunehmen und damit schneller zu reagieren. Die verbesserte Ausleuchtung des Straßenverlaufes bei Kurvendurchfahrten führt außerdem zu einer Reduktion der Streuung der Blicke über die Fahrbahnbreite und im Fernfeld. Es wird vermutet, dass der Fahrer bei Fahrt mit Kurvenlicht weniger nach für die Fahraufgabe relevanten Informationen suchen muss, um das Fahrzeug sicher zu navigieren, welches sich durch eine geringere Streuung der Blicke bemerkbar macht.

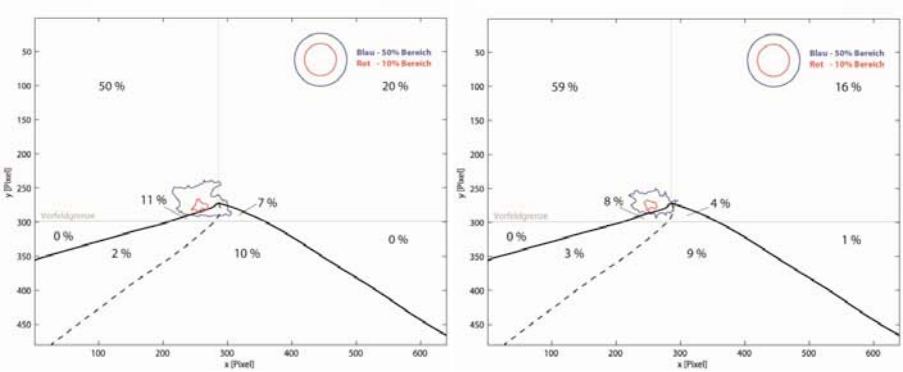


Abb. 2: Prozentuale und grafische Darstellung des Blickverhaltens in einer Linkskurve mit mittlerem Radius ohne Kurvenlicht (linkes Bild) und mit Kurvenlicht (rechtes Bild)

In Linkskurven mit einem kleinen Radius sind kaum Unterschiede im Blickverhalten zwischen der Fahrt ohne und der Fahrt mit Kurvenlicht erkennbar.

Bei der Betrachtung der Isolinien in Rechtskurven mit großen Radien treten ähnliche Effekte wie bei den Linkskurven auf. Bei Fahrt mit Kurvenlicht kommt es zu einer Verlagerung des Häufigkeitsbereiches der Blicke nach rechts sowie in das Fernfeld. Außerdem reduziert sich die Streuung der Blicke über die Fahrbahnbreite. In Rechtskurven mit mittlerem Radius kann lediglich eine Blickverschiebung bei der Kurvenlichtfahrt in das Fernfeld festgestellt werden. Werden Rechtskurven mit kleinem Radius ohne Kurvenlicht durchfahren, dann orientieren sich die Fahrer am rechten Fahrbahnrand (siehe Abbildung 3). Bei eingeschaltetem Kurvenlicht verschiebt sich der Blickschwerpunkt nach links in Richtung des Kurvenscheitelpunktes.

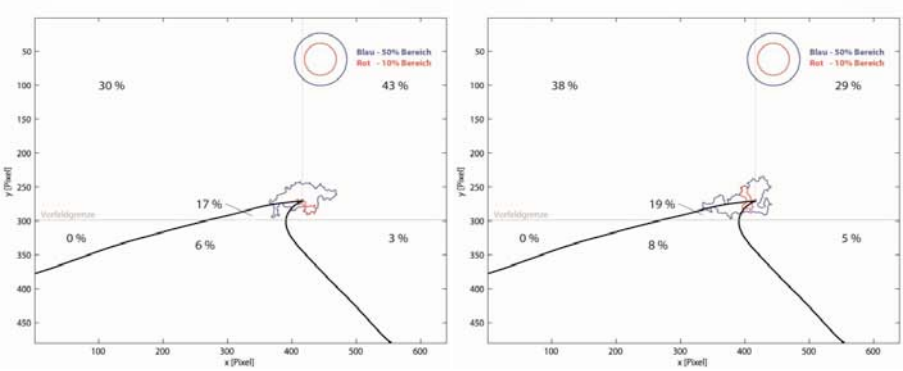


Abb. 3: Prozentuale und grafische Darstellung des Blickverhaltens in einer Rechtskurve mit kleinem Radius ohne Kurvenlicht (linkes Bild) und mit Kurvenlicht (rechtes Bild)

4 Fazit

In Kurven großer sowie mittlerer Radien mit Fahrbahnmarkierungen verschieben sich die Blicke in das Fernfeld sowie in Richtung des Kurvenscheitelpunktes. Dadurch sind die

Fahrer in der Lage, potentielle Gefahrensituationen eher zu erkennen und somit schneller zu reagieren.

Damit werden ältere Studien von Diem [Die99] und Schwab [Sch03] gestützt. Diem zufolge tragen Fahrbahnmarkierungen zur Orientierung des Kraftfahrers im nächtlichen Straßenverkehr bei [Die99]. Diese dienen zur Stabilisierung des Fahrzeuges, zur Entlastung des Fahrers bei Kurvendurchfahrten und zur Erhöhung des Fahrkomforts [Sch03]. Bei der Gestaltung von Kurven ist es deshalb wichtig, klare perspektivische Straßenverläufe zu entwerfen.

Aufgrund der fehlenden Fahrbahnmarkierung bei der Kurvengruppe mit den geringsten Radien muss der Fahrer versuchen, die für den Straßenverlauf notwendigen Informationen durch foveale Fixation abzuscannen. Dies könnte ein möglicher Grund dafür sein, dass sich das Blickverhalten in Kurven mit kleinen Radien bei Fahrt mit Kurvenlicht kaum verändert.

Ein prädiktives Kurvenlicht, welches die Lichtverteilung bei Kurvendurchfahrten in Abhängigkeit von der Fahrumgebung bereits vor dem Einlenken in die Kurve reguliert, kann zu einer weiteren Erhöhung der Erkennbarkeitsentfernung beitragen [Ibr05] und somit die Verkehrssicherheit steigern.

Die Felduntersuchung hat gezeigt, dass Kurvenlicht den Fahrer bei seiner Fahraufgabe im nächtlichen Straßenverkehr unterstützt. Deshalb sollte der derzeitige Anteil von derzeit 12 % aller mit Kurvenlicht ausgestatteten Fahrzeuge [Dat12] weiterhin erhöht werden.

5 Literaturverzeichnis

Eckert, M. [Eck93]: Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr. Verlag Technik Berlin. 1993.

Ewerhart, F.; Wolf, St; Gall, D. [Ewe01]: Videobased Curve Light System-Sensor, System and Results. PAL 2001 Symposium. TU Darmstadt. 252-265. 2001.

Dat-Report [Dat12]: Dat-Report 2012 KFZ-Betrieb. Markt- und Konsumforschung für die Automobilwirtschaft. 2012.

Destatis [Des07]: Unfallgeschehen im Straßenverkehr 2006. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden. 2007.

Diem, C. [Die99]: Blickverhalten von Kraftfahrern im nächtlichen Straßenverkehr. Dissertation. Technische Universität Darmstadt. 2004.

Ibrahim, F.; Schmidt, C.; Klein, M. [Ibr05]: Predictive Advanced Front Lighting System. ISAL. 290-296. 2005.

Leibowitz, H.; Ownes, D.;Tyrell, R. [Lei98]: The assured clear distance ahead rule - Implications for nighttime traffic safety and the law. Accident Analysis and Prevention. 30(1). 93-99. 1998.

Neumann, R. [Neu03]: Advanced Front Lighting System with Halogen Bulb Concept – safety Improvements for Everybody. Darmstadt, PAL. 715-722. 2003.

Owens, D.; Tyrell, R. [Owe99]: Effects of luminance, blur, age on nighttime visual guidance: A test of selective degradation hypothesis. Journal of Experimental Psychology: Applied. 5(2). 115-128. 1999.

Schwab, G. [Sch03]: Untersuchungen zur Ansteuerung adaptiver Kraftfahrzeugscheinwerfer. Dissertation. Technische Universität. Ilmenau. 2003.

Sigthorsson, H. [Sig96]: Unfallgeschehen bei Helligkeit, Dämmerung und Dunkelheit. Zeitung für Verkehrssicherheit. 42(4). 149-155. 1996.

Wördenweber, B.; Lachmayer, R.; Witt, U.; Krems, J. F. [Wör96]: Intelligente Frontbeleuchtung. Automobiltechnische Zeitschrift. 98(10). 546-551. 1996.

Flickerempfindung bei Veränderung der Lichtverteilungen von Kfz-Scheinwerfern

Johannes L. Foltin, Robert Bosch GmbH, Postfach 1661, D-71226 Leonberg, GERMANY, E-Mail: johannes.foltin@de.bosch.com;

Christoph Schierz, Technische Universität Ilmenau, Postfach 100565, D-98684 Ilmenau, GERMANY, E-Mail: christoph.schierz@tu-ilmenau.de

1 Einleitung

Adaptive Fernlichtassistenten im Kraftfahrzeug können die Lichtverteilung des Scheinwerfers anpassen und so für den Fahrer eine an die Fahrzeugumgebung optimierte Lichtverteilung einstellen (Abb. 1). Wenn jedoch ein Fernlichtassistent zu schnell zwischen verschiedenen Lichtverteilungen wechselt, stört es den Fahrer, der anschließend das Assistenzsystem – und damit die verbesserte Sicht – deaktiviert.

Abb. 1: Darstellungen von Abblendlicht (links), adaptivem System mit verbesserter Reichweite im Vergleich zu Abblendlicht (Mitte) und Fernlicht (rechts)

Es stellt sich bei der Entwicklung moderner Fernlichtassistenten die Frage, wie dynamisch diese ausgelegt werden dürfen, ohne den Fahrer durch die Veränderungen der Lichtverteilung zu belasten. Ziel ist die Erstellung eines Modells zur objektiven Bewertung der Flickerempfindung bei Änderung der Lichtverteilung durch Fernlichtassistenten. Der Schwerpunkt liegt hier auf klassischen Fernlichtassistenten, die automatisch zwischen Abblendlicht und Fernlicht umschalten.

2 Stand der Technik

Flackernde Beleuchtung ruft visuellen Diskomfort in Form von Flicker hervor. Es gibt bereits Modelle und Messgeräte zur Bewertung von Flicker bei flackernder Innenraumbeleuchtung, die beispielsweise durch Schwankungen in der elektrischen Spannungsversorgung hervorgerufen werden /Norm10/, /Momb00/. Die Stärke der Flickerempfindung hängt dabei von der Intensität der Helligkeitsänderung (Spannungsschwankung), der Flickerfrequenz und der Form des Störsignals (z.B. Sinus, Rechteck) ab. Die Grundlage dieser Flickermeter bildet unter anderem /Rash70/.

Die Eingangsgröße des Flickermodells aus /Norm10/ (im Folgenden „Flickermeter“ genannt) ist die elektrische Spannungsversorgung einer 60 Watt Glühlampe. Über verschiedene Filterstufen wird aus der Spannung am Eingang die Reaktion der Glühlampe auf Spannungsschwankungen nachgebildet, sowie die menschliche Wahrnehmung auf die daraus resultierenden Helligkeitsschwankungen. Die Ausgangsgrößen des Flickermeters sind unter anderen die „Kurzzeit-Flickerstärke“ P_{st} und die „Langzeit-Flickerstärke“ P_{lt}. Die Kurzzeit-Flickerstärke wird über einen Zeitraum von einer bis zehn Minuten ermittelt, die Langzeit-Flickerstärke über einen Zeitraum von beispielsweise zwei Stunden.

Die klassischen Flickermodelle können nicht unverändert für die Abschätzung des Flickerempfindens bei Veränderung der Lichtverteilungen von Kraftfahrzeugscheinwerfern genutzt werden: An Stelle einer Änderung der gesamten homogenen Umgebungshelligkeit wird bei Fernlichtassistenten vorwiegend die Beleuchtung der Straße und ihrer inhomogenen unmittelbaren Umgebung verändert.

3 Forschungshypothesen

Das Flickermeter /Norm10/ kann für die Bewertung von Flicker bei inhomogener Beleuchtung, wie sie im nächtlichen Straßenverkehr vorkommt, angepasst werden. Weiterhin ist die Stärke des empfundenen Diskomforts beim Wechsel von Lichtverteilungen durch einen Fernlichtassistenten von der Umschaltfrequenz, sowie der Stärke der Lichtverteilungsänderung, abhängig.

4 Untersuchungsmethode

Zur Prüfung der Hypothesen wird eine Flickeruntersuchung in Form einer Probandenstudie durchgeführt. Der Einfluss anderer Faktoren auf den Diskomfort der Versuchspersonen wird konstant gehalten, indem die Untersuchung im Labor stattfindet. Die Bewertung der Probanden wird analysiert, um den Zusammenhang von Flickerempfindung, Frequenz und Stärke der Lichtverteilungsänderung bei adaptiven Fernlichtassistenten zu ermitteln. Die Bewertung der Versuchspersonen wird mit den simulierten Messdaten des Flickermeters /Norm10/ verglichen, um das Flickermodell für klassische Fernlichtassistenten anzupassen.

Die Versuchsperson sitzt vor einer Projektionsleinwand auf der durch eine periodisch wechselnde Darstellung von Lichtverteilungen im Frequenzbereich zwischen 1/16 Hz und 1 Hz eine Flickerempfindung hervorgerufen wird.
Es werden drei verschiedene Flickerszenen bewertet: „homogene Beleuchtung“, „schematische Straßendarstellung“ und „Fotografie“ (siehe Abb. 2). Die „homogene Beleuchtung“ ist eine graue Fläche, deren Helligkeit periodisch um ca. 10% geändert wird (Auflösungsgenauigkeit des vorhandenen Leuchtdichte-Messgeräts). Die „schematische Straßendarstellung“ stellt eine acht Meter breite homogen ausgeleuchtete Straße aus Fahrerperspektive dar, deren scharfe Hell-Dunkel-Grenze kontinuierlich verändert werden kann. Zwischen den Darstellungen von Abblendlicht und Fernlicht ändert sich ausschließlich die Helligkeit eines kleinen Dreiecks. Die Flickerszene „Fotografie“ ist die reale Darstellung von Abblendlicht und Fernlicht aus Fahrerperspektive. Die Vorfeld-Helligkeit entspricht der Vorfeldhelligkeit beim Autofahren bei Nacht und ist bei allen drei Szenen gleich eingestellt.

Abb. 2: verwendete Szenen: homogene Beleuchtung (links), schematische Straßendarstellung (Mitte) Fotografie (rechts)

Die homogene Ausleuchtung wird benötigt, um die Bewertungen der Probanden mit den Ergebnissen des Flickermeters vergleichen zu können. Mittels der schematischen

Darstellung einer beleuchteten Straße kann die Abhängigkeit der Bewertung von sowohl der Frequenz, als auch der Stärke der Lichtverteilungsänderung, ermittelt werden. Fotografien werden eingesetzt, um eine realistische Straßendarstellung mit natürlichen Inhomogenitäten zu erhalten, woraus das Flickermodell für Fernlichtassistenten abgeleitet werden kann.
Eine Ablenkung ähnlich zum Autofahren wird erreicht, indem die Versuchsperson über ein Lenkrad mit einer (Seh-)Aufgabe interagiert, die ebenfalls auf der Leinwand dargestellt wird. Die Aufgabe besteht aus drei senkrechten Linien, die sich horizontal über die Leinwand bewegen, wobei eine Linie von der Versuchsperson gesteuert wird (Abb. 3). Diese Sehzeichen wurden so auf die Leinwand positioniert, dass die Blickrichtung der Probanden ungefähr dem Fixationsbereich beim Autofahren aus /Diem04/ entsprach.

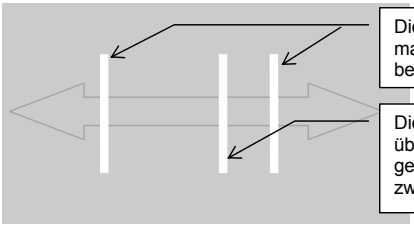


Abb. 3: Schematische Darstellung der Aufgabe während der Untersuchung

Jede Teiluntersuchung dauert eine Minute, was der minimalen Messdauer der Kurzzeit-Flickerstärke P_{st} des Flickermeters entspricht. Im Anschluss bewertet die Versuchsperson die Flickerempfindung auf einer kontinuierlichen Skala zwischen „kaum wahrnehmbar“ und „sehr störend“. Die Mitte der Skala ist mit „gerade noch nicht störend“ gekennzeichnet.
Eine ausführliche Darstellung einer ähnlichen Versuchsanordnung kann man /FoES11/ entnehmen.

5 Ergebnisse der Untersuchung

Die Untersuchung wurde mit 29 Versuchspersonen durchgeführt. Im Folgenden werden die Ergebnisse bei adaptiven Fernlichtassistenten vorgestellt und anschließend ein Flickermodell für die Bewertung klassischer Fernlichtassistenten entwickelt.

5.1 Flickerempfindung bei adaptiven Fernlichtassistenten

Abb. 4 zeigt die mittlere Probandenbewertung (Median) der Flickerszene „schematische Straßendarstellung“ in Abhängigkeit von Frequenz und Stärke der Lichtverteilungsänderung als Kreise. Hilfskreise teilen die einzelnen Bewertungen in positive (außen: „kaum wahrnehmbar“) und negative Bewertung (innen: „sehr störend“) auf. Ein Kreis in der Mitte kennzeichnet die Störschwelle. Die Anstiegszeit der Hell-Dunkel-Grenze ist die Stärke der Lichtverteilungsänderung. Die Bewertung der Anstiegszeit von null Sekunden entspricht der Bewertung des klassischen Fernlichtassistenten bei der Flickerszene „schematische Straßendarstellung“ (vgl. Abb. 5 Mitte).
Schnelle Wechsel zwischen Lichtverteilungen (z.B. 1 Hz) wurden negativ bewertet, langsame Wechsel dagegen durchweg positiv (z.B. 1/16 Hz). An der Flickerfrequenz von 1/4 Hz liegt die Störschwelle der Teiluntersuchung.
Betrachtet man einzelne Frequenzen kann man eine geringe Abhängigkeit der Bewertung von der Stärke der Lichtverteilungsänderung erkennen. Die Bewertung der Frequenz 1/8 Hz steigt monoton von 0,4 beim klassischen Fernlichtassistenten (Anstiegszeit Null Sekunden) auf 1,0 bei einer Anstiegszeit von zwei Sekunden (Bewertung Null entspricht

der Störschwelle). Die Form des Flicker-Stimulus scheint einen geringeren Einfluss auf die Bewertung zu haben als beim Flickermeter. Mehrere Versuchspersonen äußerten, dass der fließende Übergang zwischen Abblendlicht und Fernlicht anfangs ungewohnt gewesen ist, im Verlauf der Untersuchung jedoch als angenehm empfunden wurde.

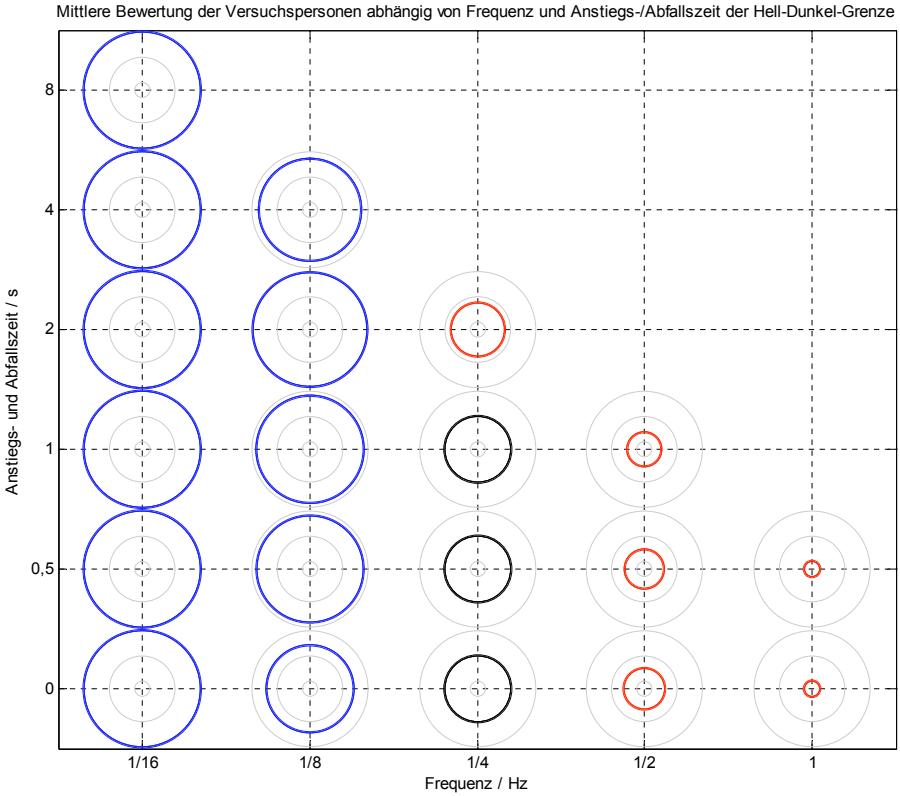


Abb. 4: mittlere Bewertung (Median) abhängig von Frequenz und Anstiegszeit der Hell-Dunkel-Grenze (HDG): positivste Bewertung am äußeren Kreis (blau), negativste Bewertung am inneren Kreis (rot), die Störschwelle liegt am mittleren Kreis (schwarz)

Die Flickersignale der Diagonalen in Abb. 4 (z.B. 1/4 Hz Flickerfrequenz, Anstiegszeit 2s), bei denen eine kontinuierliche langsame Änderung der Lichtverteilung stattfinden, werden schlechter bewertet als eine schnellere Änderung bei gleicher Frequenz. Wie groß dabei der Einfluss der Wechselwirkung der linearen Strukturen von sich horizontal bewegender Sehaufgabe (Abb. 3) und vertikal bewegender Hell-Dunkel-Grenze ist, muss noch geklärt werden: Die sich überlagernden Bewegungen wurden nach Aussage einzelner Versuchspersonen unangenehm empfunden. Die Pausen zwischen dem Wechsel der Lichtverteilungen haben sich daher positiv auf die Bewertung ausgewirkt.
Die Ergebnisse der Teiluntersuchung „schematische Straßendarstellung“ zeigen eine Abhängigkeit der Flickerempfindung von der Wechselfrequenz, sowie eine Abhängigkeit von der Stärke der Lichtverteilungsänderung.

5.2 Flickermodell für klassische Fernlichtassistenten

Die Bewertung der Flickerempfindung für klassische Fernlichtassistenten ist in Abb. 5 zu sehen. Negative Zahlenwerte entsprechen einem störenden Sinneseindruck, positive auf einen nicht störenden. Der Wert Null bedeutet "gerade noch nicht störend", der Zahlenwert +1 wurde „kaum wahrnehmbar“, der Zahlenwert -1 der Bewertung „sehr störend“ zugeordnet. Abb. 5 zeigt, dass die Flickerempfindung bei klassischen Fernlichtassistenten mit steigender Frequenz, d.h. einem zunehmend dynamischen Verhalten, größer wird.

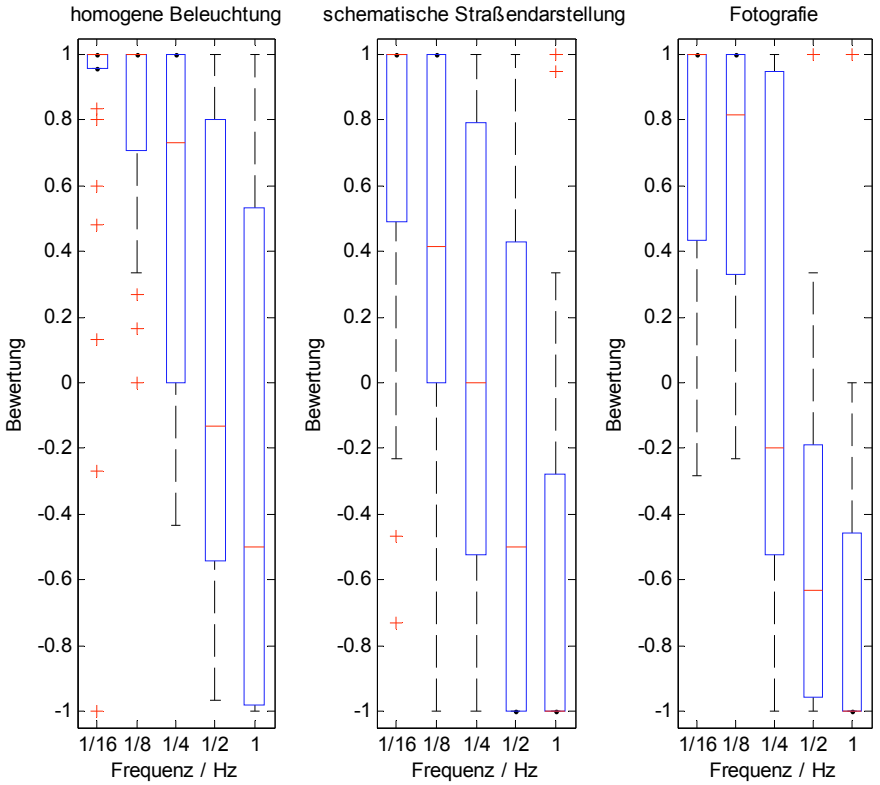


Abb. 5: Boxplot der Bewertungen der Flickerempfindung unterschiedlicher Szenen: homogene Beleuchtung (links), schematische Straßendarstellung (Mitte) und Fotografien (rechts).

In /Cai09/ werden die Spannungsänderung und die daraus resultierende Änderung des Lichtstroms einer 60 Watt Glühlampe gegenübergestellt. Damit kann man aus der prozentualen Änderung der Leuchtdichte der Leinwand bei homogener Ausleuchtung die äquivalente Spannungsänderung der Szene für das Flickermeter /Norm10/ ermitteln. Die Änderung der Leuchtdichte der Leinwand von 10% entspricht in /Cai09/ der Reaktion einer 60 Watt Glühlampe, wenn die Versorgungsspannung um 6,3% geändert wird.
Die Flickerbewertung der Versuchspersonen wird mit den Ergebnissen des Flickermeters bei einer rechteckförmigen Spannungsschwankung von 6,3% verglichen. Eine Kurzzeit-Flickerempfindung von P_{st} = 1 gibt normalerweise die Störschwelle an, an der die Hälfte der Personen eine Störung durch die flackernde Beleuchtung empfinden. Diese Schwelle ist im Versuch deutlich höher und liegt zwischen $P_{st,1min}$ = 6,7 und 7,6. Die größere Flickertoleranz kann unter anderem mit der Ablenkung durch die (Seh-) Aufgabe zusammenhängen.
Die Bewertung durch das Flickermeter hängt nichtlinear mit der Bewertung der Versuchspersonen zusammen. Durch lineare Interpolation zwischen den Messpunkten wird der Zusammenhang zwischen Kurzzeit-Flickerstärke P_{st} und der mittleren Bewertung der Probanden hergestellt. Messwerte außerhalb der Bewertungsspanne von homogener Beleuchtung werden extrapoliert. Das Flickermeter /Norm10/ wird um eine Anpassung an die Bewertungsskala der Untersuchung erweitert (siehe Abb. 6). Mit der Erweiterung können Spannungsschwankungen am Eingang des Flickermeters mit der Bewertungsskala des Versuchs bewertet werden.

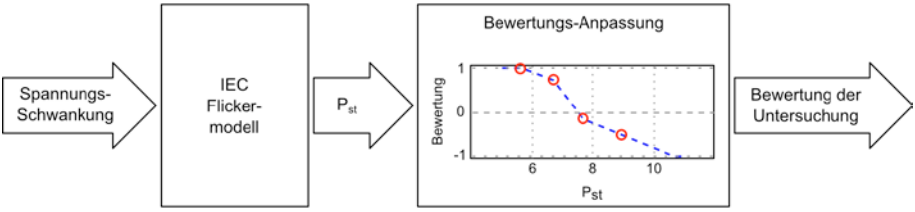


Abb. 6: Erweiterung des IEC Flickermodells um eine Bewertungs-Anpassung

Die Probandenbewertung der Flickerszene „Fotografie“ wird mit der Bewertungsanpassung in die dazugehörige Kurzzeit-Flickerempfindung P_{st} umgerechnet. Durch Simulation wurde daraus ein äquivalenter Spannungshub von 7,52% ermittelt. Die Übertragungsfunktion des neuen Flickermodells für die Bewertung von Fernlichtassistenten ist in Abb. 7 zu sehen.

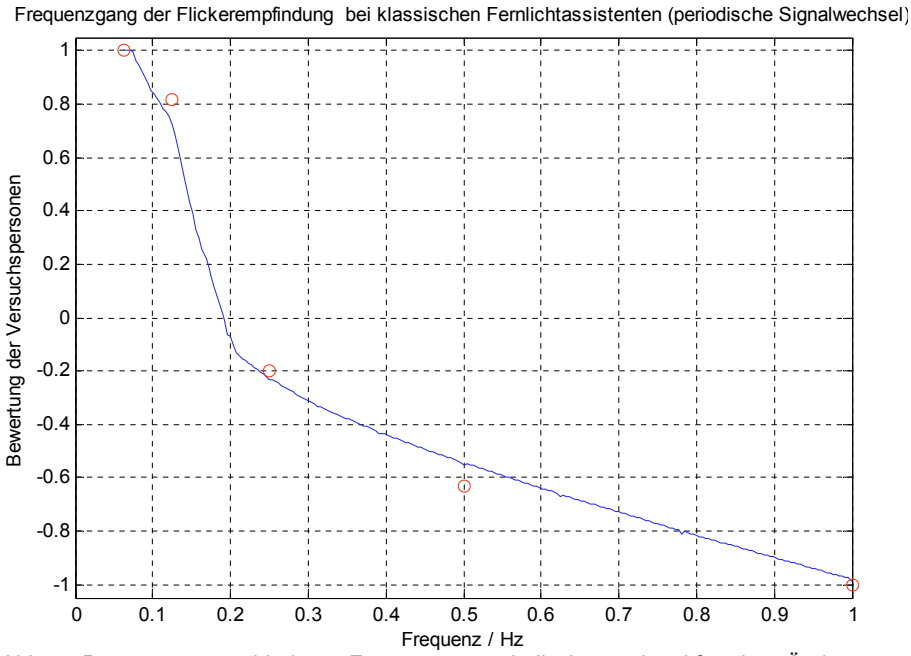


Abb. 7: Bewertung verschiedener Frequenzen periodischer rechteckförmiger Änderungen mit dem Flickermodell für Fernlichtassistenten (blau), sowie der mittleren Bewertung bei der Untersuchung (rot)

6 Diskussion und Ausblick

Es wurde die Abhängigkeit der Flickerempfindung von der Frequenz, sowie eine (geringere) Abhängigkeit der Stärke der Lichtverteilungsänderung gezeigt. Es bietet sich eine vergleichende Untersuchung mit anderer Sehaufgabe an, um den Einfluss der sich überlagernden linearen Strukturen bei der Flickerszene „schematische Straßendarstellung“ zu identifizieren. Die Durchführung einer Untersuchung in realer Umgebung kann zusätzlich den Einfluss der inhomogenen Umgebung ähnlich der Flickerszene „Fotografie“ in die Bewertung mit einfließen lassen, woraus ein realitätsnahes Modell entwickelt werden kann.

Es wurde unter Laborbedingungen ein Modell für die Bewertung der Kurzzeit-Flickerstärke P_{st} bei Fernlichtassistenten entwickelt. Das Fernlichtflickermodell wurde mit Daten periodischer Signale erstellt. Es kann durch die Verwendung des IEC-Flickermeters /Norm10/ auch für die Verwendung nicht-periodische Signale eingesetzt werden. Die Gültigkeit des neuen Fernlichtflickermodells im Feld muss durch weitere Untersuchungen verifiziert werden.
Die aus der Kurzzeit-Flickerstärke P_{st} berechnete Langzeit-Flickerstärke P_{lt} könnte als Charakterisierung eines Fernlichtassistenten und damit auch als Vergleichszahl zwischen verschiedenen Fernlichtassistenten genutzt werden.

Beim Flickermodell gibt es meist nur eine Wahrnehmungsgrenze und eine Störkurve. Durch Anpassung des Flickermeters an die Bewertung der Untersuchung kann die Bewertung über die kontinuierliche Skala zwischen „kaum wahrnehmbar“ und „sehr störend“ erfolgen. Wenn man ein Flickermodell für adaptive Fernlichtassistenten erstellt, können Kurven für verschiedene Flickerempfindungen erstellt werden, die für die Auslegung eines Fernlichtassistenten genutzt werden können.

Die Flickerbewertung der Flickerszene „schematische Straßendarstellung“ kann durch einen äquivalenten Spannungshub nicht zufriedenstellend beschrieben werden. Erklären kann man die Unterschiede der Bewertung zwischen den Szenen durch die Größe des Änderungsbereichs, der bei der „schematischen Straßendarstellung“ deutlich kleiner ist als bei der „Fotografie“ oder gar der „homogenen Beleuchtung“. Ein zusätzlicher frequenzabhängiger Gewichtungsfilter im Flickermeter könnte die Wahrnehmungskurve an die Szene der schematischen Straßendarstellung anpassen.
Das erstellte Flickermetermodell für die Bewertung klassischer Fernlichtassistenten könnte durch den vergleichsweise geringen Einfluss der Stärke der Lichtverteilungsänderung genutzt werden, um einen Orientierungswert für die Bewertung adaptiver Systeme zu erhalten. Offen ist noch, wie die Anpassung der Signale des adaptiven Fernlicht-assistenten an die Schnittstelle zur Bewertung klassischer Fernlichtassistenten erfolgen kann.

7 Literaturverzeichnis

/Cai09/ R. Cai, „Flicker Interaction Studies and Flickermeter Improvement“, Dissertation Technische Universiteit Eindhoven, 2009

/Diem04/ C. Diem, „Blickverhalten von Kraftfahrern im dynamischen Straßenverkehr“, Dissertation Technische Universität Darmstadt, Herbert Utz Verlag, 2004

/FoES11/ J.L. Foltin, T. Ehlgen, Ch. Schierz, „Untersuchungsmethode zur Bewertung von Flicker bei geteiltem Beleuchtungsfeld (Method for Flicker Evaluation under Divided Illumination Condition)“, Lux junior 2011, Dörnfeld/Ilm, 2011

/Momb00/ W. Mombauer, „EMV: Messung von Spannungsschwankungen und Flickern mit dem IEC-Flickermeter“, VDE Verlag, 2000

/Norm10/ „Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 4-15: Prüf- und Messverfahren – Flickermeter – Funktionsbeschreibung und Auslegungsspezifikation (IEC 77A/722/FDIS:2012“, Deutsche Fassung FprEN 61000-4-15:2010, 2010

/Rash70/ C. Rashbass, „The Visibility of Transient Changes of Luminance”, Journal of Physiology, 210, S. 165-186, 1970

Anpassung der adaptiven Hell-Dunkel-Grenze an die Straßenqualität

Johannes L. Foltin, Robert Bosch GmbH, Postfach 1661, D-71226 Leonberg, GERMANY, johannes.foltin@de.bosch.com

C. Venkatraman, Robert Bosch Engineering and Business Solutions Ltd., CHIL SEZ Unit, Keeranatham Village, Coimbatore - 641 035 Tamil Nadu, INDIA, venkatraman.chandramowleeswaran@in.bosch.com

Christoph Schierz, Technische Universität Ilmenau, Postfach 100565, D-98684 Ilmenau, GERMANY, christoph.schierz@tu-ilmenau.de

1 Problemstellung

Moderne Fernlichtassistenten im Kraftfahrzeug wie beispielsweise AHC (Adaptive High Beam Control, auch bekannt als „adaptive Hell-Dunkel-Grenze“ aHDG oder aCOL /KaSc07/) heben die Hell-Dunkel-Grenze so weit an, dass die Sichtweite für den Fahrer erhöht wird, die anderen Verkehrsteilnehmer aber nicht geblendet werden (Abb. 1).

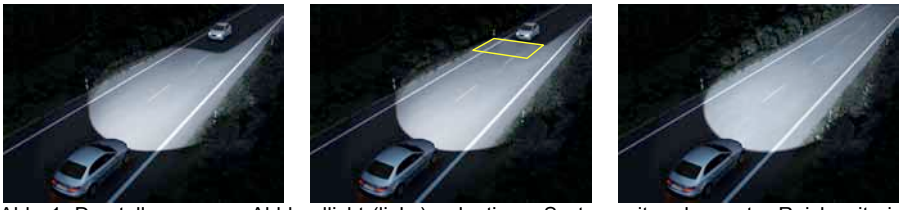


Abb. 1: Darstellungen von Abblendlicht (links), adaptivem System mit verbesserter Reichweite im Vergleich zu Abblendlicht (Mitte) und Fernlicht (rechts)

Eine in Fahrtrichtung gerichtete Kamera erkennt die anderen Verkehrsteilnehmer und schätzt deren Entfernung. Der Abstrahlwinkel der Hell-Dunkel-Grenze des Scheinwerfers wird aus der Position des anderen Verkehrsteilnehmers und einem zusätzlichen Winkelversatz (Winkel-Offset) berechnet (Abb. 3).
Der Winkel-Offset wird benötigt, um die Blendungsgefahr bei Bodenunebenheiten zu verringern. Die Nickbewegung des Fahrzeugs hat einen großen Einfluss auf die Hell-Dunkel-Grenze und dadurch auf die Sichtweite des Fahrers, sowie die Blendung anderer Verkehrsteilnehmer /Lehn01/. Wenn der Offset zu klein gewählt wird, kommt es bei Unebenheiten auf der Fahrbahn zur Blendung (Abb. 2). Die anderen Verkehrsteilnehmer können die Blendung als störendes „Aufblitzen“ der Scheinwerfer wahrnehmen. Wird der Winkel-Offset zu groß gewählt, hat der Fahrer nur einen geringen Sichtweitengewinn durch das AHC-System. Bisher wurde ein fester, statischer Winkel-Offset eingesetzt, weshalb bei der Entwicklung ein Kompromiss zwischen Sichtweitenerhöhung und Blendungsvermeidung für alle Situationen gemeinsam gefunden werden musste.

2 Verbesserung der Sichtweite durch Straßenanalyse

Die durchschnittliche Sichtweite des Fahrers kann erhöht werden, ohne die Blendung anderer Verkehrsteilnehmer zu vergrößern, indem der Winkel-Offset dynamisch an die Straßenqualität bzw. die Fahrzeugdynamik angepasst wird. Die prototypische Umsetzung des verbesserten Fernlichtassistenten ist bereits in einem Versuchsträger umgesetzt, wobei durch die Nutzung der kamera-basierten Fahrdynamikmessung auf zusätzliche Sensoren verzichtet werden kann.

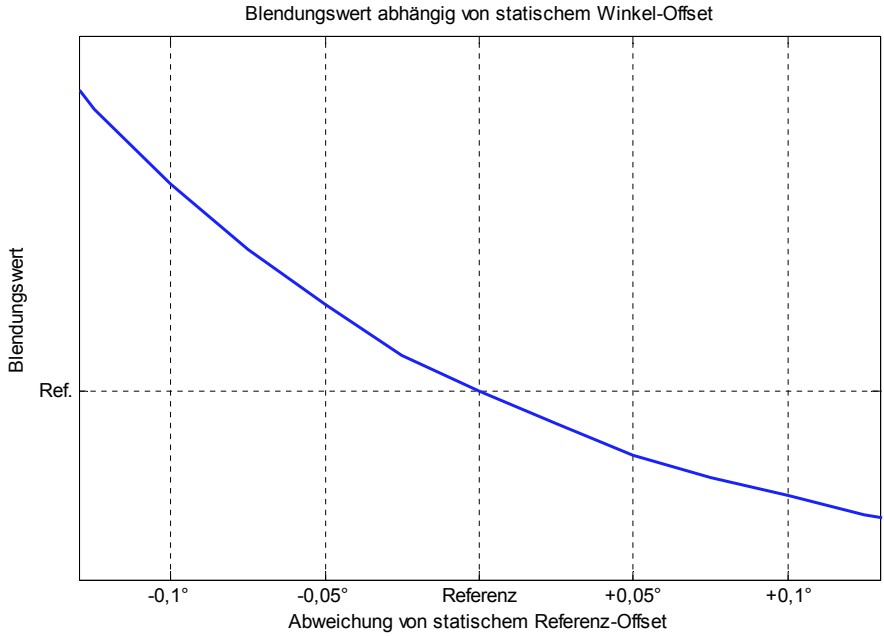


Abb. 2 : Blendungswerte abhängig von statischem Winkel-Offset

3 Systemaufbau

Im Versuchsfahrzeug ist eine serienreife Frontkamera verbaut, die ein Bild des Fahrzeug-Umfelds aufnimmt (Abb. 3). Dieses Bild wird analysiert, um beispielsweise andere Verkehrsteilnehmer bereits aus großer Entfernung zu erkennen.

Die Kamera ist fest an der Windschutzscheibe befestigt und führt daher bei Unebenheiten der Fahrbahn die gleiche Nickbewegung wie das Fahrzeug, sowie Scheinwerfer und Hell-Dunkel-Grenze durch. Neigt sich das Fahrzeug in Richtung der Fahrbahn („nach unten"), scheint sich die Umgebung in aufeinanderfolgenden Kamera-Bildern nach oben zu schieben und umgekehrt. Die Verschiebung des Fahrzeug-Umfelds im Bild kann ausgewertet werden, um die Nickrate des Fahrzeugs zu ermitteln.

Die Nickratenmessung und Berechnung des dynamischen Winkel-Offsets werden auf der Kamera durchgeführt. Zusätzliche Recheneinheiten und Sensoren werden nicht benötigt. Im Versuchsträger wurde ausschließlich für die Bewertung des verbesserten

AHC-Systems ein Inertialsensor eingebaut, der die physikalische Nickrate des Fahrzeugs für Referenzberechnungen misst (Abb. 3).

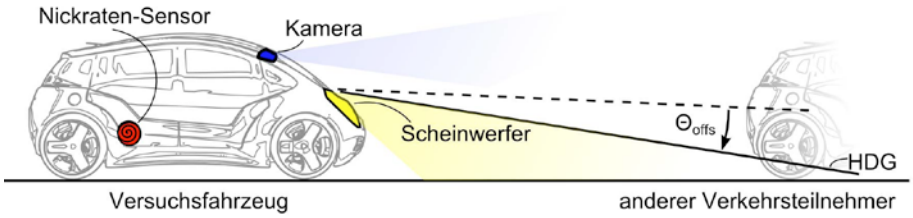


Abb. 3 : Versuchsfahrzeugs mit Kamera, Nickratensensor, Scheinwerfer mit Hell-Dunkel-Grenze (HDG) und Winkel-Offset Θ_{offs}

Das Versuchsfahrzeug ist mit Projektionsscheinwerfern ausgerüstet, die mit Hilfe einer Walze subtraktiv einen fließenden Übergang zwischen Abblendlicht und Fernlicht erzeugen können (vgl. /KaSc07/). Das elektro-mechanischen Systems besitzt eine spezifische Latenzzeit, die für eine optimale Anpassung des AHC-Systems bekannt sein muss. Die Latenzzeit der Scheinwerfer hat einen Einfluss auf die Systemauslegung und kann bei Serienscheinwerfern vom hier genutzten Wert abweichen.
Eine dynamische Leuchtweitenregulierung passt die Hell-Dunkel-Grenze selbstständig an die Fahrzeugdynamik an und hat daher, ebenso wie die Latenzzeit, einen Einfluss auf den benötigten Winkel-Offset. Im weiteren Verlauf wird davon ausgegangen, dass die Leuchtweitenregulierung des Fahrzeugs ausschließlich einen Ausgleich der Fahrzeugbeladung vornimmt.

4 Analyse der Fahrzeugdynamik für ein verbessertes AHC-System

Die relative Winkelposition des anderen Verkehrsteilnehmers ändert sich mit der Nickbewegung des Versuchsfahrzeugs. Die Kamera kann sich unmittelbar auf die sich ändernden geometrischen Verhältnisse einstellen und den neuen Winkel für die Hell-Dunkel-Grenze berechnen. Durch die Latenz des Scheinwerfers reagiert dieser immer mit einem gewissen zeitlichen Versatz. Bei kontinuierlicher Nickbewegung des Fahrzeugs entgegen der Fahrbahnoberfläche („nach oben“), sind längere Blendungsdauern als die Scheinwerfer-Latenzzeit möglich.
Der Winkel-Offset dient als Puffer, mit dem die Blendung des anderen Verkehrsteilnehmers vermieden werden soll. Bei einer ruhigen Nickbewegung des Fahrzeugs „nach oben“, reicht im Allgemeinen ein kleiner Winkel-Offset: Innerhalb der Reaktionszeit der Scheinwerfer legt das Fahrzeug nur eine kleine Winkeldifferenz zurück. Wenn hingegen das Fahrzeug eine schnelle Nickbewegung „nach oben“ durchführt, wird ein großer Winkel-Offset benötigt, um die Blendung zu vermeiden: Es wird innerhalb der Scheinwerfer-Latenzzeit ein großer Winkelunterschied zurückgelegt.
Das AHC-System kann verbessert werden, indem der Winkel-Offset an die Fahrzeugdynamik angepasst wird. Unter der Fahrzeugdynamik ist im Folgenden ausschließlich die Nickbewegung des Fahrzeugs gemeint, die beispielsweise aus der Historie der Nickraten oder Nickwinkel ermittelt werden kann. Bei einer hohen Fahrzeugdynamik wird ein großer Winkel-Offset gewählt, bei einer geringen Fahrzeugdynamik ein kleiner.
Die Fahrzeugdynamik des Fahrzeugs hängt mit der Straßenqualität (Güte der Straßenoberfläche) zusammen. Unter der Annahme, dass die Güte über einen gewissen Zeitraum konstant ist, kann der Winkel-Offset für diese Dauer konstant gehalten werden.

Aus der Historie der Nickraten (Fahrzeugdynamik) wird der in der Vergangenheit benötigte Winkel-Offset berechnet bzw. die Güte der Straßenoberfläche geschätzt und daraus der benötigte dynamische Winkel-Offset Θ_{dyn} berechnet (1). Eine Vorarbeit zur Anpassung des Winkel-Offsets an die Straßenqualität wurde in /Muel11/ bearbeitet.
Die Dauer t_{hist} der auszuwertenden Historie muss so groß gewählt werden, dass mindestens zwei für die jeweilige Fahrbahnbeschaffenheit charakteristische Ereignisse vorkommen. Wird die Dauer der ausgewerteten Historie zu groß gewählt, ist die Reaktion von einem großen Winkel-Offset zu einem aktuell benötigten kleinen Offset träge, wodurch die Sichtweite geringer als nötig ist. Eine zu klein gewählte Dauer führt zu mehr Blendung anderer Verkehrsteilnehmer.
Die Dynamik des Scheinwerfers wird in der Auslegung des adaptiven Systems mit einbezogen (1), da für einen Scheinwerfer mit einer kurzen Latenzzeit t_{latenz} im Allgemeinen ein kleinerer Winkel-Offset nötig ist als für einen Scheinwerfer mit einer langen Latenzzeit.

$$\Theta_{dyn}(t) = \int_{t}^{t+t_{latenz}} \dot{\Theta}(\tau) d\tau \approx \int_{t-t_{latenz}}^{t} \dot{\Theta}(\tau) d\tau \approx \Theta_{dyn}(t - t_{hist}) \quad (1)$$

Der dynamische Winkel-Offset Θ_{dyn} wird immer nur dann vergrößert, wenn der Offset kleiner als benötigt war. Das dadurch entstehende Blendungsrisiko kann reduziert werden, wenn ein kleiner statischer Winkel-Offset Θ_0 zusätzlich zum dynamischen Offset Θ_{dyn} addiert wird (2). Die Blendungen, die für die Aufrechterhaltung und Vergrößerung des Winkel-Offsets nötig wären, können dadurch häufig vermieden werden. Abb. 4 zeigt die Abhängigkeit des Blendungswertes vom diesem zusätzlichen Offset als Kurvenschar. Je größer der Offset Θ_0 ist, desto weniger Blendung tritt auf.

$$\Theta_{offs}(t) = \Theta_{dyn}(t) + \Theta_0 \quad (2)$$

5 Bewertung des Systems mit dynamischem Winkel-Offset

Die Verbesserung des AHC-Systems kann gemessen werden, indem ein Vergleich des dynamischen Winkel-Offsets mit dem ursprünglichen System (statischer Winkel-Offset) durchgeführt wird. Es wurde auf unterschiedlichen Streckentypen und Fahrbahnbeschaffenheiten Messungen der bildbasierten und der physikalischen Nickrate aufgezeichnet. Aus der Nickrate des Inertialsensors und der bekannten Latenz des Scheinwerfers t_{latenz} wird für jeden Zeitpunkt der optimale Winkel-Offset Θ_{opt} berechnet. Der optimale Winkel-Offset ist der minimale Offset, der für die Vermeidung von Blendung nötig ist. Aufbauend auf den Kamera-Daten wird der dynamische Winkel-Offset Θ_{offs} berechnet und mit dem tatsächlich benötigten optimalen Winkel-Offset Θ_{opt} verglichen. Wenn der berechnete (statische oder dynamische) Winkel-Offset kleiner als der optimale Winkel-Offset ist, kommt es zu Blendung. Ein ideales System würde jegliche Blendung anderer Verkehrsteilnehmer vermeiden. Bei einem realen System, wie dem Vergleichssystem mit statischem Winkel-Offset, kann die Blendung je nach Fahrzeugdynamik nicht vollständig vermieden werden.
Aus Blendungs-Ereignissen („Aufblitzen“ der Scheinwerfer) und der Dauer der Blendung wird ein Blendungswert berechnet. Der Blendungswert dient dem Vergleich der Systeme.
Es wird die Blendung für unterschiedliche Kombinationen aus Historien-Dauer und zusätzlichem Offset für die aufgezeichneten Daten berechnet. Die Blendungswerte werden mit dem Blendungswert des statischen Systems verglichen. Die Kombinationen, die zu dem gleichen Blendungs-Wert führt (z.B. Abb. 4 System ohne Offset, Offset α und β), und

6 Diskussion

Es wird eine vereinfachte Berechnung durchgeführt, um nur wenige Ressourcen des Steuergerätes zu verbrauchen. Durch komplexere Berechnungen kann das System noch besser an die Straßenverhältnisse angepasst werden. Die hier vorgeschlagene Basis-Lösung bietet insbesondere bei großen statischen Winkel-Offsets Vorteile (Abb. 5). Durch Erweiterung der Auswertung der Straßenbeschaffenheit können noch weitere Verbesserungen erzielt werden. Damit könnten die Vorteile des adaptiven Systems auch für sehr kleine statische Winkel-Offsets für den Fahrer nutzbar gemacht werden.
Bei einem System, das keine Nickratenmessung vornehmen kann, könnte prinzipiell aus der Positionsänderung des anderen Fahrzeugs im Bild auf den benötigten Winkel-Offset geschlossen werden. Dabei würde es jedoch verstärkt zu Blendung kommen, bis ein passender Winkel-Offset eingestellt ist. Durch die hier vorgestellte Auswertung der Nickrate über einen längeren Zeitraum kann im Begegnungsfall mit einem anderen Fahrzeug unmittelbar ohne Blendung ein optimaler Winkel-Offset eingestellt werden. Auf die Nutzung von zusätzlichen Inertialsensoren kann bei Verwendung der Kamera-Messdaten verzichtet werden.

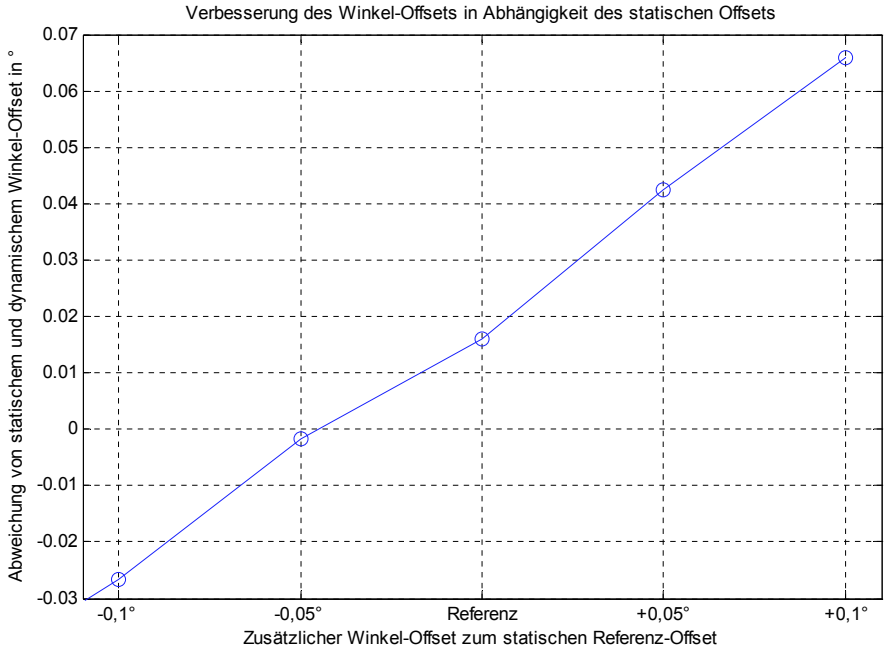


Abb. 5: Änderung des durchschnittlichen dynamischen Winkel-Offsets im Vergleich zum statischen Referenz-Offset

Die Sichtweite für den Fahrer kann, durch Nutzung der Fahrzeugdynamik in der Ansteuerung von AHC (Adaptive High Beam Control), bei gut ausgebauten Straßen im Vergleich zu einer festen Einstellung des Winkel-Offsets erhöht werden, wobei die Blendung anderer Verkehrsteilnehmer bei schlechter Straßenqualität reduziert wird.

7 Literaturverzeichnis

/KaSc07/ F.-J. Kalze, Ch. Schmidt, „Dynamic Cut-Off-Line geometry as the next Step in forward lighting beyond AFS“, 7th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), S.346-354, Darmstadt, 2007

/Muel11/ C. Müller, „Erweiterung des Ansteueralgorithmus für den Fernlichtassistenten der adaptiven Hell-Dunkel-Grenze zur Optimierung von Sichtweite und Blendung“, Bachelorarbeit, Duale Hochschule Baden-Württemberg, 2011

/Lehn01/ P. Lehnert, „Auswirkungen der Fahrzeugdynamik auf die Lichtverteilung von Scheinwerfern“, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Herbert Utz Verlag, 2001

Entwicklung eines Projektor-basierten Forschungsscheinwerfers zur Erprobung neuartiger Lichtverteilungen

Dipl.-Ing. **Steffen Michenfelder**, Prof. Dr. rer.nat. **Cornelius Neumann**,
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)/ Lichttechnisches Institut (LTI)

1. Einleitung

Die primären Aufgaben von Automobilscheinwerfern bestehen darin, dem Fahrer möglichst gute Sichtbedingungen zu schaffen und dafür zu sorgen, dass das Fahrzeug von anderen Verkehrsteilnehmern gesehen wird. In den Anfängen der automobilen Lichttechnik wurden zu diesem Zweck Scheinwerfer eingesetzt, die den Verkehrsraum großflächig ausleuchteten. Eine mögliche Beeinträchtigung der Sehleistung anderer Verkehrsteilnehmer, speziell entgegenkommender Fahrzeuge, spielte aufgrund der geringen Verkehrsdichte noch keine Rolle. Der Gesetzgeber gab sich bereits damit zufrieden, wenn überhaupt eine Leuchte am Automobil angebracht war. So heißt es in einer Polizeiverordnung aus dem Jahr 1901 nur, dass „während der Dunkelheit und bei starkem Nebel die Laternen brennen müssen“ /1/.

Mit der zunehmenden Zahl an Fahrzeugen kam der Zielkonflikt auf, einerseits die Sichtweite des Fahrers ausreichend groß zu halten, andererseits aber eine Blendung der anderen Verkehrsteilnehmer zu verhindern. Mit der Einführung eines Abblendlichts (auch unter dem Namen Begegnungslicht zu finden) im Jahr 1915 wurde diesem Zielkonflikt Rechnung getragen. Das Abblendlicht erzeugte dabei eine im Vergleich zum Fernlicht in der Reichweite reduzierte symmetrische Lichtverteilung. Die Blendung des Gegenverkehrs konnte dadurch wirkungsvoll verringert werden, aber die Ausleuchtung von Fußgängern oder Radfahrern auf der eigenen Spur wurde durch das Umschalten von Fernlicht auf das symmetrische Abblendlicht verschlechtert.

Die Anzahl der Fahrzeuge nahm nach Ende des zweiten Weltkriegs auf den deutschen Straßen stark zu und die Forderung wurde laut, das Abblendlicht hin zu einer größeren Reichweite im Bereich der eigenen Fahrspur zu entwickeln. Im Jahr 1957 bekam die Lichtverteilung des Abblendlichtes daher einen Knick, einen vertikalen Anstieg der Hell-Dunkel Grenze auf der eigenen Spur, um die Erkennbarkeit von Fußgängern und Radfahrern zu erhöhen.

Die nächsten Entwicklungsschritte beinhalteten eine Anpassung des Scheinwerferlichts an den Ladezustand des Fahrzeugs und an geometrische Bedingungen der Straße.
Aus diesem Grund wurde 1974 eine Leuchtweitenregulierung (LWR) eingeführt, um die Schwankungen des Fahrzeugnickwinkels auszugleichen. Seit 1990 ist eine manuelle LWR gesetzlich vorgeschrieben, ab einem Lichtstrom von 2000 lm muss sie sogar automatisiert mithilfe von Sensoren erfolgen.
Mit der Einführung eines Kurvenlichts (erstmals serienmäßig im Jahr 1968) wurden die Scheinwerferlichtverteilungen an veränderte Eigenschaften der Straßengeometrie angepasst. Beim Kurvenlicht wird zwischen einem statischen und einem dynamischen unterschieden. Das statische Kurvenlicht nutzt meistens einen zusätzlichen Scheinwerfer, der beim Abbiegen in die Kurve hinein leuchtet, um die Sichtweite zu erhöhen. Es wird hauptsächlich im Stadtverkehr für Kurven mit kleinem Radius eingesetzt. Das dynamische Kurvenlicht ist für Kurven mit größerem Radius hauptsächlich auf Landstraßen vorgesehen.
Der Adaptionsgrad automobiler Frontscheinwerfer wurde in den letzten Jahren durch sogenannte AFS/AFL Funktionen erweitert (Adaptive Frontlighting System / Adaptive Forward Lighting). So existieren separate Lichtverteilungen für die Stadt, die Landstraße oder die Autobahn, um die Ausleuchtung noch stärker den Straßenbedingungen anzupassen.
Die Fahrt mit Fernlicht kommt aus Sicht des Fahrzeugführers der optimalen Lösung ziemlich nahe. Es ist jedoch klar ersichtlich, dass bei der heutigen Verkehrsdichte niemand dauerhaft mit Fernlicht fahren kann. Der Sinn und Nutzen eines Abblendlichtes ist daher augenscheinlich, schützt es doch andere Verkehrsteilnehmer vor einer Verminderung ihrer Sehleistung. Auf der anderen Seite ist bei Fahrten mit Abblendlicht ein beträchtlicher Teil des Verkehrsraums nicht oder nur kaum ausgeleuchtet. Neuere Entwicklungen zielen daher darauf ab, den Schritt hin zu einem dauerhaft eingeschalteten Fernlicht zu machen.
Die Anpassung der Lichtverteilung an vorausfahrende Fahrzeuge beispielsweise wird mittels einer adaptiven Hell-Dunkel Grenze umgesetzt. Hierbei wird mithilfe von Kameratechnik ein vorausfahrendes Fahrzeug erkannt und die Reichweite der Hell-Dunkel Grenze durch mechanisches Verfahren der Scheinwerfer oder geeignete Blenden im Strahlengang entsprechend angepasst, um einerseits den Fahrer nicht über die

Rückspiegel zu blenden und andererseits die Reichweite des Abblendlichts möglichst groß zu gestalten.

Die Anpassung an entgegenkommende Fahrzeuge wird beispielsweise mithilfe einer vertikalen Hell-Dunkel Grenze realisiert. Bei dieser Technik wird der Bereich um ein entgegenkommendes Fahrzeug ausgespart, um die Blendung dessen Fahrers zu verringern. Bei (Xenon-) Projektionssystemen wird dies über eine variable Blende in Walzen- oder Kulissentechnik technisch umgesetzt.

Die angesprochenen Methoden zur Erhöhung der Effizienz und Leistungsfähigkeit von automobilen Scheinwerfersystemen sind aus technischen und physiologischen Gesichtspunkten noch nicht ausgereift und bedürfen umfassender wissenschaftlicher Validierung. Aus diesem Grund wird am Lichttechnischen Institut in Karlsruhe (LTI) ein Forschungsscheinwerfer aufgebaut, der Gegenstand dieses Artikels ist. Es wird hierbei einerseits beschrieben, wie der Forschungsscheinwerfer konzipiert und ausgelegt ist. Insbesondere wird auf die mathematische Modellierung, die Kalibrierung und Justierung eingegangen. Andererseits wird das Wirkpotential des Forschungsschweinwerfers hinsichtlich der Validierung von bestehenden Scheinwerfersystemen und der Entwicklung neuartiger Lichtverteilungen erläutert. Hierbei wird auch auf die potentielle Beschleunigung von Entwicklungsschritten im Scheinwerferdesign eingegangen.

2. Materialien und Methoden

Kernstück des Forschungsscheinwerfers sind sechs handelsübliche Projektoren, die auf einer entsprechenden Halterung im Bereich der vorderen Stoßstange angebracht werden. Das Licht wird in den Projektoren mithilfe von Höchstdruckgasentladungslampen erzeugt und mittels eines Mikrospiegelarrays (DMD) auf eine Ausgangsoptik gelenkt. Das Prinzip der Mikrospiegel sieht es vor, das Licht der Lampe entweder auf den Ausgang oder einen Absorber zu lenken, was die beiden binären Zustände 1 und 0 repräsentiert. Das Mikrospiegelarray besteht aus im 16:9-Format angeordneten Spiegeln, die wenige Millimeter Kantenlänge aufweisen. Bewegt werden die Spiegel über Änderungen eines magnetischen Feldes. Die in diesem Forschungsscheinwerfer eingesetzten Mikrospiegelarrays setzen sich aus 1920 * 1080 Spiegeln zusammen, was in der Videotechnik als Full HD Auflösung bezeichnet wird. Die Projektoren verfügen jeweils über

ein DMD-Array (1-Chip DMD) und erzeugen Farben über ein im Strahlengang rotierendes Farbrad, welches nach dem Prinzip der subtraktiven Farbmischung arbeitet.
Die Auswahl des geeigneten Projektortyps erfolgte nach der Höhe des Lichtstroms, den geometrischen Abmessungen incl. Gewicht, der Leistungsaufnahme, dem Bilderzeugungsprinzip und den wirtschaftlichen Vorgaben.
Der Lichtstrom muss ausreichend groß sein, um mit dem Forschungsscheinwerfer alle gängigen Lichtverteilungen realisieren zu können und gleichzeitig noch Potential nach oben zu haben. Der ausgewählte Projektortyp hat laut Herstellerangaben einen Lichtstrom von 4000 ANSI Lumen, mithilfe von Goniometer Messungen im Labor wurde der absolute Lichtstrom zu 3300 lm bestimmt.
Die Energieversorgung von handelsüblichen Projektoren erfolgt über die herkömmliche 230 V Netzspannung. Für die Versorgung der sechs Projektoren und des dazugehörigen Rechners zur Ansteuerung ist die Leistungsbereitstellung des Versuchsfahrzeuges, eines Audi A6 Avant, nicht ausreichend. Das Fahrzeug verfügt serienmäßig über eine 180 A / 13,8 V Lichtmaschine, welche Leistungen bis zu 2,5 kW bereitstellen kann. Die Leistungsaufnahme der eingesetzten Projektoren beträgt laut Herstellerangaben maximal 430 W je Gerät, im laufenden Betrieb wurden im Labor Leistungen von durchschnittlich 370 W gemessen. Um die benötigte Leistung bereitzustellen, wurde im Motorraum des Fahrzeuges eine zusätzliche, zweite Lichtmaschine mit einer Leistung von bis zu 2,8 kW installiert. Ein Wechselrichter wandelt die Generatorspannung der Lichtmaschine in die benötigte sinusförmige 230 V Wechselspannung um.
Bei der Auswahl des bilderzeugenden Prinzips kamen für die hier vorliegende Anwendung zwei Techniken in Frage. Zum einen der LCD-Projektor, der sich Flüssigkristalle als lichtschaltende Elemente bedient und zum anderen der bereits erwähnte DMD-Projektor (auch unter dem Namen DLP bekannt). Die Vorteile der LCD-Technik liegen in einer guten Farbdarstellung, einem kleinen Bauraum und einem relativ geringen Preis. Ausschlusskriterien sind jedoch die Anfälligkeit für Staub und Schmutz, die geringen Kontrastwerte und der Memory Effekt. Gerade der Memory Effekt, womit das Einbrennen der Flüssigkristalle bei statischen Bildern bezeichnet wird, ist für die hier vorliegenden, quasistatischen Lichtverteilungen gänzlich ungeeignet. DMD-Projektoren haben eine mangelnde Farbdarstellung, welche sich aber bei den hier eingesetzten Graustufenbildern nicht negativ auswirkt. Der Regenbogeneffekt, der durch das Farbrad entsteht, darf jedoch

nicht außer Acht gelassen werden, da er die Wahrnehmung der Verkehrsteilnehmer beeinflussen kann. Aus diesem Grund werden zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Artikels Versuche durchgeführt, die Projektoren ohne Farbrad zu betreiben.

Die Ansteuerung der Projektoren erfolgt über eine eigens hierfür entwickelte Software. Der für den Betrieb der Software notwendige Rechner ist im rückwärtigen Bereich des Fahrzeuges installiert. Er verfügt u.a. über eine spezielle Grafikkarte, die eine separate Bildausgabe auf sechs Projektoren ermöglicht. Weiterhin ist eine CAN-Schnittstelle integriert, die eine Kommunikation zwischen Steuersoftware und dem CAN-Bus des Fahrzeuges zu ermöglichen. Über die Schnittstelle lassen sich Sensorwerte wie Lenkwinkel, Geschwindigkeit, Neigungswinkel, Umgebungshelligkeit, etc. auslesen und für die Anpassung der Scheinwerferlichtverteilung nutzen. Die Software verwendet die Sensordaten, um die Bilder jedes Projektors entsprechend anzupassen. In Abb.1 ist die prinzipielle Struktur der Software dargestellt. Der Nutzer hat u.a. die Möglichkeit, über Look-Up Tables einen funktionalen Zusammenhang zwischen Eingangsgrößen (Sensorwerten) und Ausgangsgrößen (Bilddaten) festzulegen. Beispielsweise ist hierdurch die Realisierung von Kurvenlicht oder einer dynamische Leuchtweitenregulierung möglich.

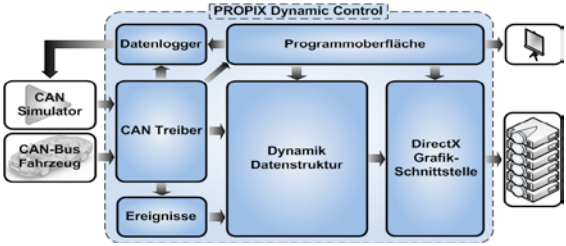


Abb. 1: Struktur der Software zur Ansteuerung der Projektoren; die Sensordaten des Fahrzeuges werden über die CAN Schnittstelle ausgelesen und mittels vorgebbarer funktionaler Zusammenhänge in die Bildausgabe integriert /3/

Die Projektoren sind in einer 3x2 Anordnung auf einer Halterung vor dem Fahrzeug angebracht, wie es Abb. 2: 3x2 Anbringung der Projektoren vor dem Versuchsfahrzeug zeigt. Der Rechner mit der Steuersoftware befindet sich ebenso wie der zugehörige Monitor im Heck des Fahrzeuges.

Abb. 2: 3x2 Anbringung der Projektoren vor dem Versuchsfahrzeug

Um die Auswirkungen neuartiger Lichtverteilungen und AFS-Funktionen genau bestimmen zu können, sieht der Forschungsscheinwerfer eine matrixförmige Unterteilung des Straßenraumes vor. Dadurch kann im Rahmen der Auflösungsbegrenzung der Projektoren in jedem Teil der Straße ein exakt bestimmter Ausleuchtungsgrad realisiert werden, wodurch sich die Freiheiten in der Versuchsdurchführung. Zu diesem Zweck werden DMD-Projektoren verwendet, mit deren Hilfe die Lichtstärkeverteilung pixelgenau auf der Straße eingestellt werden kann.

Zur Auslegung von Lichtverteilungen muss man die Lichtstärkeverteilungskurve (LVK) der Projektoren kennen. Abb.3 zeigt exemplarisch die Verteilung eines Projektors, die mithilfe eines Goniometers aufgenommen wurde. Aus den hieraus gewonnenen Strahldaten werden Rayfiles erzeugt, welche zur Weiterverarbeitung in einer CAL-Software (zur Lichtsimulation) genutzt werden.

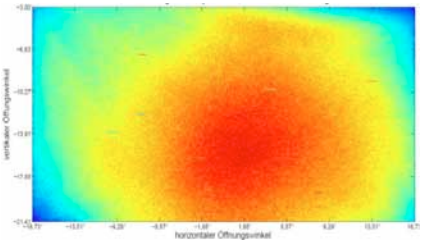


Abb. 3: Exemplarische Lichtverteilung eines Projektors; die Lichtstärke ist in Falschfarben codiert und hat ein Maximum von I = 21355 cd, die mittlere Lichtstärke liegt bei I = 18129 cd /2/

Eine große Herausforderung beim Aufbau eines projektorgestützten Scheinwerfersystems ist die mechanische Justierung und die Kalibrierung der Projektoren. Für die Modellierung

von Lichtverteilungen ist es unablässig, dass ein Lichtstrahl so verläuft wie es die Simulation vorsieht. Hierzu muss die Lage der Projektoren relativ zueinander und zum Fahrzeug genau bekannt sein. Kleinste Abweichungen der räumlichen Position oder Schwankungen der Abstrahlwinkel führen aufgrund der scharfen Abbildungen des Projektionssystems zu einer deutlich wahrnehmbaren Verschiebung der einzelnen Projektorbilder. Es hat sich während den Kalibrierungsarbeiten gezeigt, dass selbst minimale Abweichungen große Auswirkungen haben.

Die Lösung des Problems liegt in einer exakten mechanischen Halterung der Projektoren und einer softwareseitigen Kalibrierung des gesamten Systems.

Die Projektoren müssen so weit wie möglich in einer konstanten räumlichen Lage und Orientierung relativ zum Fahrzeug angebracht sein. In diesem Rahmen wird nicht näher auf technische Details eingegangen, es soll nur gesagt werden, dass derart geringe Bauteiltoleranzen, wie sie in diesem Fall benötigt werden, im Einsatzbereich eines Fahrzeuges technisch anspruchsvoll sind.

Zusätzlich zur mechanischen Justierung werden mithilfe einer softwareseitigen Kalibrierung Abweichungen der Projektoren korrigiert. Hierzu werden Bilder von Punkten und Linien auf einer weißen Wand erzeugt, deren Lage zuvor mit dem Simulationsprogramm berechnet wurde. In einer beispielhaften Kalibrierung, wie sie in Abb.4 zu erkennen ist, müssen drei vertikale Linien auf der Wand zu sehen sein. Damit lassen sich beispielsweise die horizontale Lage und der Neigungswinkel der Projektoren exakt bestimmen. Abweichungen in den drei Linien werden quantifiziert und ein entsprechender Korrekturwert in die Berechnungsalgorithmen der Bilder aufgenommen.

Abb.4: Horizontale Kalibrierung der Projektoren mithilfe von vertikalen Linien; auch eine mögliche ungewollte Neigung der Projektoren kann hierdurch bis zu einem gewissen Maß kompensiert werden

3. Ergebnisse und Ausblick

Der Forschungsscheinwerfer befand sich zum Zeitpunkt, an dem dieser Artikel verfasst wurde, noch im Aufbau, weshalb auf die Präsentation konkreter Ergebnisse auf nachfolgende Artikel und Publikationen verwiesen werden muss. Einen kleinen Ausblick auf kommende Arbeiten gibt Abb. 5, auf der das gezielte Abdunkeln bzw. Erhellen eines rechteckigen Feldes im Straßenraum zu sehen ist. Mithilfe der Integration von Sensor- und Kameradaten des Fahrzeuges wird auf diese Art und Weise möglich sein, die Auswirkungen von neuartigen Lichtassistenzfunktionen auf die Verkehrsteilnehmer zu erforschen. Das Prinzip, einen Forschungsscheinwerfer mithilfe von Projektoren aufzubauen, zeigt vielversprechende Ansätze, bringt jedoch auch technische Herausforderungen mit sich, die es zu meistern gilt.

Abb. 5: Gezieltes Aufhellen eines Rechteckes im linken Bild und gezieltes Abdunkeln im rechten Bereich

5. Literatur

[1] Daimler Firmengeschichte: „Die Geschichte der Autoscheinwerfer: Von der Kerzenlampe zum Autobahnlicht“; verfügbar am 04.01.12 auf www.daimler.com

[2] Schöne, Michael : „Optische Simulation der Grundlichtverteilungen eines projektorbasierten Scheinwerfersystems“; Studienarbeit KIT; Karlsruhe 2012

[3] Reusch, Hannes: „Entwicklung einer Steuerungssoftware für projektorbasierte Kfz-Scheinwerfer“; Studienarbeit KIT; Karlsruhe 2012

Bewertung der Abblendlicht-Fernfeldverteilung in einem geschlossenen Raum durch geometrische Verkürzung

Bogdanow, S.; Kleinert, B.; Marutzky, M. (Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr, Gifhorn)

1 Motivation

Aufgrund der hohen Sicherheitsrelevanz der Fahrzeugbeleuchtung – in diesem Beitrag wird speziell das Scheinwerferlicht betrachtet – ist der Wunsch nach Bewertungssystemen entstanden, welche über die gesetzlichen Vorgaben, wie etwa die ECE Regularien, hinausgehen. Neben den eigenen Bewertungssystemen der Automobil- und Leuchtenhersteller wurde von der CIE TC 4-45 ein standardisiertes Verfahren entwickelt.
Die für die unterschiedlichen Bewertungsverfahren erforderlichen Daten werden in der Regel mit Hilfe von Photogoniometern aufgenommen. Die Auswertung wird unter anderem mit Ray-Tracing Lichtsimulationsprogrammen durchgeführt.
Im Folgenden wird eine Methode vorgestellt, die eine gesteigerte Effizienz bei der Erfassung von Daten, speziell von dynamisch relevanten Lichtverteilungen, im Vergleich zu konventionellen Messmethoden darstellt. Diese Effizienz zeigt sich auch an der Bewertung im Gesamtfahrzeug, da hierbei auch die Einflüsse der umliegenden Geometrien und unterschiedliche Designkonzepte, Baustände oder Komponenten bewertet werden können.

2 Problemstellung

Die statische Bewertung der Lichtverteilung von Kfz-Hauptscheinwerfern geschieht in der Regel über die simulierte Beleuchtungsstärkeverteilung auf einer virtuellen Straße. Dabei werden die Bewertungskriterien zum Beispiel über Isoluxlinien oder den Lichtstrom in bestimmten Zonen auf der Straße definiert. Die Messung des dazu benötigten Lichtstärkeverteilungskörpers erfolgt mit hoher Genauigkeit mit einem Photogoniometer. Damit erhält man idealisierte, wiederholbare Ergebnisse. Effekte von Toleranzen der Karosserie, Scheinwerfer und Leuchtmittel oder von Abschattungen im verbauten Zustand sind nur bedingt berücksichtigbar. Eine Untersuchung des Gesamtsystems „Fahrzeug“ mit der Interaktion von Sensoren, Assistenzsystemen usw. kann nicht erfolgen. In Abhängigkeit der gewünschten räumlichen Auflösung benötigt eine Photogoniometermessung eine Zeit, in der Größenordnung von Stunden. Moderne, dynamische Scheinwerfer verfügen nicht nur über die „klassische“ Abblend- und Fernlichtverteilung, sondern über eine Vielzahl von Lichtverteilungen. Diese Lichtverteilungen hängen von der Umgebung, etwa Ortschaft oder Autobahn, detektierten anderen Verkehrsteilnehmern (z.B. blendfreies Fernlicht) oder dem Fahrzeugzustand (z.B. Kurvenlicht) ab. Sollen die diversen Lichtverteilungen umfassend bewertet werden, entsteht mit der geschilderten Methode ein erheblicher Zeit- und damit Kostenaufwand.
Alternativ können im Freifeld, etwa auf Teststrecken, Messungen unter realen Bedingungen unternommen werden. Abb. 1 zeigt ortsaufgelöste Leuchtdichtemessungen eines Szenarios zur Bewertung eines statischen Abbiegelichtes. Die Aussagekraft dieser Messung ist hoch. Zum einen bekommt der Prüfer einen sofortigen visuellen Eindruck von der Leistungsfähigkeit des Abbiegelichts und kann zum anderen nach seinen Kriterien eine quantitative Analyse über Leuchtdichtewerte und Kontraste durchführen. Nachteilig ist, dass die Umfeldbedingungen niemals wiederholt werden können. Sie sind sowohl von der Tages- und Jahreszeit, als auch von der Umgebung abhängig. Niederschlag, wie Regen oder Tau verändern Reflexionseigenschaften der Umgebung und des Objektes

innerhalb von Minuten drastisch. Auch die zwangsläufige Veränderung der Vegetation innerhalb des Jahres lässt das gezeigte Szenario zu einem anderen Zeitpunkt anders erscheinen. Somit ist ein systematisches, quantitatives Benchmarking verschiedener Systeme oder ein Vergleich der unterschiedlichen Baustufen im Entwicklungsprozess unmöglich.
Eine naheliegende Alternative ist es, die Bewertung und Referenzierung in einem geschlossenen Raum mit definierten wiederholbaren Umfeldbedingungen durchzuführen. Die räumliche Ausdehnung der Abblendlichtverteilung ist theoretisch unendlich. Aus diesem Grund gibt es Lichttunnel mit über hundert Metern Länge. Das Abblendlicht ist jedoch auch in der Breite ausgedehnt. Berücksichtigt man außerdem noch dynamische Lichtverteilungen, wie beispielsweise Kurvenlicht, müsste auch die Breite dieses Raums in der Größenordnung von hundert Metern mit ausreichender Höhe liegen, so dass es keine Störreflexionen von der Decke gibt. Eine freitragende Halle mit solchen Ausmaßen und einem notwendigen ebenen, sauberen, optisch wohldefinierten Boden erfordert hohe Investitions- und Betriebskosten.

3 Zielsetzung

Wir verfolgen ein Konzept, welches es ermöglicht, unter wiederholbaren Bedingungen in einem geschlossenen Raum bei technisch und wirtschaftlich vernünftigem Aufwand quantitative Scheinwerferbeurteilungen über die Beleuchtungsstärkeverteilung „auf der Straße“ durchzuführen. Das Konzept ist sowohl auf Komponenten, als auch auf im Fahrzeug verbaute Scheinwerfer anwendbar. Der Beitrag stellt dieses Konzept der geometrischen Verkürzung vor und diskutiert seine Genauigkeiten, Potentiale und Grenzen.

4 Was ist innovativ?

Die Licht- und Fahrerassistenzhalle der IAV
Die IAV hat eine besondere Messhalle zur Bewertung von Licht- und Fahrerassistenzsystemen am Gesamtfahrzeug aufgebaut /1, 2/. Sie hat eine Breite von 16m, eine Höhe von 8m und ein spezielles Messfeld mit 33m Länge. Die Breite und Höhe bewirken, dass sich Störlicht in der Weite verläuft. Die Wände wurden so verkleidet, dass das Störlicht außerdem sehr effektiv eliminiert wird. Damit sind Messungen von Lichtverteilungen auf dem Messfeld möglich, ohne dass die Lichtverteilungen von Wand- oder Deckenreflexionen gestört werden. Das Messfeld ist eben und homogen mit wohldefinierten, optischen Eigenschaften. In der Halle befinden sich eine Tageslicht- und eine Sonnenstandssimulation. Die Tageslichtsimulation erzeugt eine über das gesamte Messfeld homogene Beleuchtungsstärke bis 5000lux, wohingegen mit der Sonnenstandssimulation auf begrenzter Fläche Beleuchtungsstärken bis 50000lux möglich sind. Die Halle ist so konzipiert, dass sie flexibel für unterschiedlichste Versuche und Messungen nutzbar ist. Aktuelle lichttechnische Anwendungen sind neben der Beurteilung von Scheinwerfern z.B. die Bewertung von Signalleuchten, Blendung oder der Fahrzeuginnenbeleuchtung.

Das Konzept der geometrischen Verkürzung
Es soll die Beleuchtungsstärkeverteilung des Abblendlichts in Einbauposition auf dem Untergrund gemessen werden. Dazu wird die Leuchtdichteverteilung L(x,y) kamerabasiert erfasst und mit Hilfe des Leuchtdichtekoeffizienten $q(\alpha, \beta, \gamma)=L/E$ in eine Beleuchtungsstärkeverteilung E(x,y)umgerechnet.

Eine aktuelle Randbedingung ist nun, dass die Länge des Messfeldes auf 33m begrenzt ist und daher nur der Nahbereich, nicht aber das Fernfeld des Abblendlichts vermessen werden kann.
Eine weitere Schwierigkeit ist, dass der Leuchtdichtekoeffizient q(α, β, γ) stark von dem Beleuchtungswinkel α, dem Beobachtungswinkel β und dem Winkel zwischen Beleuchtungs- und Beobachtungsebene γ abhängt. Außerdem wird er bei flachen Beleuchtungswinkeln von ≤1°, wie sie beim Scheinwerferlicht auftreten, zunehmend undefiniert. Zur Veranschaulichung trifft bei einer typischen Anbauhöhe des Scheinwerfers von 0,65m und einer ordnungsgemäßen Absenkung der Hell-Dunkelgrenze um 1% diese bei ca. 65m auf die Straße. Das entspricht einem Einfallswinkel α der Lichtstrahlen von 0,57°. In einer Entfernung von 25m vor dem Fahrzeug treffen dagegen die Lichtstrahlen unter einem Winkel von 1,49° auf die Straße.
Das Problem, dass das Fahrzeug zwei Scheinwerfer hat und somit der Beleuchtungswinkel nicht eindeutig ist, wird trivial dadurch umgangen, dass die Scheinwerfer nacheinander eingeschaltet, vermessen und die Messungen anschließend addiert werden.
Um nun auch das Fernfeld beurteilen zu können, werden die Scheinwerfer bzw. das Fahrzeug nach unten verkippt und somit die Lichtverteilung geometrisch verkürzt. Im Detail wird die L(x,y) mit Kenntnis von q in E(x,y) überführt und die Lichtstärkeverteilung über das photometrische Entfernungsgesetz berechnet: $I(x,y)=E(x,y)\ r^2/\cos\alpha(x,y)$. Zur Transformation wird dann strahlweise zurückgeschwenkt: $E'(x',y')= I(x,y)\ \cos\alpha'(x',y')/(r')^2$. Eine Verkippung von nur 1° bewirkt, dass die senkrechten Strahlen, die eigentlich in 65m vor dem Scheinwerfer die Straße berühren, nun in 24m auftreffen. Neben der Verkürzung in Längsrichtung tritt dieser Effekt auch in Querrichtung auf, was geometrisch verdeutlichbar ist.
Die Strahlen aus dem Fernfeld werden folglich geometrisch in das Nahfeld gezogen. Dabei ist sehr vorteilhaft, dass die Beleuchtungswinkel um etwa 1° zunehmen und dabei aus dem in Hinsicht auf den Leuchtdichtekoeffizienten schwierigen Bereich unterhalb 1° in den besser bestimmbaren Bereich oberhalb 1° gebracht werden. Somit wird eine genauere Berechnung der Beleuchtungsstärke ermöglicht. Aufgrund des verkürzten Abstands des beleuchteten Punkts zur Lichtquelle nimmt die Beleuchtungsstärke quadratisch zu und ist damit in der Regel genauer zu messen. Konkurrierend wirkt hier, dass der Fehler durch Anwendung des Photometrischen Entfernungsgesetzes, welches sich auf Punktlichtquellen bezieht, größer wird.
Die Leuchtdichteaufnahme wird aus erhabener Position durchgeführt. Damit erreicht man, dass überwiegend gestreute Anteile gemessen werden. Der Leuchtdichtekoeffizient für den gestreuten Anteil ist einfacher zu handhaben, als der für den gerichtet reflektierten. Zusätzlich wird bei den dargestellten Messungen die Leuchtdichtekamera direkt über dem Scheinwerfer angeordnet. Dadurch wird der Winkel γ für alle Punkte auf dem Untergrund Null und α und β werden voneinander abhängig. Somit vereinfacht sich die Funktion des eigentlich von drei Parametern abhängigen Leuchtdichtekoeffizienten q zu einer von einem Parameter abhängigen Funktion. Dies reduziert wiederum den Aufwand zur Bestimmung von E erheblich.

5 Realisierungsgrad

Das oben beschriebene Konzept der geometrischen Verkürzung wurde in der Licht- und Fahrerassistenzhalle an einem Halogenscheinwerfer getestet. Abb. 2 zeigt die Leuchtdichtemessungen mit dem Scheinwerfer in Einbauposition und in um 1° verkippter Position. Da die Rückreflexion der dem Scheinwerfer gegenüberliegenden Wand nicht vollständig eliminiert wird, ist nur die Leuchtdichteverteilung bis zu einer Entfernung von ca. 29 m verwendbar.

In Abb. 3 oben ist die in Einbaulage rücktransformierte Beleuchtungsstärkeverteilung dargestellt, die von 4m bis 70m in der Länge reicht und eine Breite von 20m misst. Um dieses Ergebnis nun bewerten zu können, wurde es mit dem etablierten Verfahren verglichen. Im etablierten Verfahren wird die Beleuchtungsstärkeverteilung auf der Straße simuliert. Die dazu benötigte Lichtstärkeverteilung wird auf einem Photogoniometer gemessen. Das mit LucidShape simulierte Ergebnis ist der rücktransformierten Messung gegenübergestellt (Abb. 3 unten). Zwar zeigt die Messung mit unserem Konzept nicht so viele Strukturen auf wie die Simulation, doch stimmen Breite und Ausdehnung der Isoluxzonen, die oft als Bewertungskriterien herangezogen werden, aus beiden Verfahren gut überein (vgl. Tab. 1). Es wurde aber festgestellt, dass das hier dargestellte Messverfahren unterhalb von etwa 1lux unempfindlich wird.
In Abb. 4 ist die Beleuchtungsstärkeverteilung für das Scheinwerfer-paar auf einer gedachten Straße dargestellt und die Schnittpunkte der 3lux-Linie mit dem linken und dem rechten Straßenrand eingezeichnet. Die Schnittpunkte dienen oft als Maß für die Reichweite eines Scheinwerfers, vgl. CIE TC4-45.
Nachfolgend wird diskutiert, welche Auswirkungen die Positionierungsungenauigkeiten und die Ungenauigkeit bei Einstellung der Scheinwerferverkippung haben. Mit dem getroffenen Aufwand wurde eine Positionierungsgenauigkeit des Scheinwerfers von 0,02m in den Raumrichtungen erzielt. Eine Abweichung in Längs- und Querrichtung bewirken nur eine Translation der Verteilung. Relevanter sind die Abweichungen in der Höhe und aufgrund des Verkippungswinkels. Die Simulation zeigt, dass sich die Beleuchtungsstärkeverteilungen bei maximalen Abweichungen des Verkippungswinkels nicht wesentlich unterscheiden (siehe Abb. 5). Der Verkippungswinkel des Scheinwerfers kann unter Verwendung eines Laser-Entfernungsmessgerätes über die Länge der Halle sehr genau eingestellt werden. Die Ungenauigkeit beträgt ca. 0,03°. Zum Vergleich werden bei Goniometermessungen selten Messauflösungen besser als 0,05° gewählt. Somit sind die Ergebnisse stabil gegenüber den Fehlern bei Positionierung und Ausrichtung des Scheinwerfers.
Es folgt eine kurze Fehlerabschätzung:
Die theoretische Grundlage dieses Verfahrens wie auch des Fernfeldgoniometers bildet das Photometrische Entfernungsgesetz. Dieses geht von Punktlichtquellen aus. Zusätzlich hat eine Scheinwerferoptik in der Regel Fokusebenen. Jedoch sind die betrachteten beleuchteten Punkte 5-30 Meter vom Scheinwerfer in der Dimension 0,1m entfernt, so dass das Entfernungsgesetz anwendbar bleibt.
Die Bestimmung des Leuchtdichtekoeffizienten erfolgte mit einem Fehler von etwa 5%. Da die Einstellung des Verkippungswinkels mit einer Genauigkeit von 0,03° und die Positionierungsgenauigkeit in der Höhe mit 0,02m durchgeführt wurde, folgt für r^2 und damit für I auf 25m ein Fehler von 3%. Die Unsicherheit bei der Messung der Leuchtdichte wird ebenfalls auf 3% geschätzt. Aus der Fehlerfortpflanzung ergibt sich ein geschätzter Gesamtfehler von 7% für die Beleuchtungsstärke. Dieser Wert ist vergleichbar mit photogoniometrischen Messungen, bei welchen ein Fehler von 6% zu erwarten ist.

6 Bewertung der eigenen Lösung

Status quo
Das Verfahren der messtechnischen Erfassung durch geometrische Verkürzungen wurde für einen Verkippungswinkel von 1°, was in der vorgestellten Halle einer Messlänge von ca. 70m entspricht, getestet und durch eine Referenzmessung abgesichert. Die absolute Genauigkeit des Verfahrens ist dabei zur Auffindung der Isoluxzonen, über die in der Regel Scheinwerfer beurteilt werden, ausreichend. Jedoch wird das Verfahren unempfindlich für Beleuchtungsstärken unterhalb von etwa 1lux. Grund hierfür ist das einfache Reinigungskonzept des Hallenbodens. Möchte man diese Empfindlichkeitsgrenze

signifikant verbessern, müsste unter Reinraum-ähnlichen Bedingungen gearbeitet und ein Betreten oder Befahren des Messuntergrundes untersagen werden. Angesichts der Größe der Messfläche würden Aufwand und die dadurch entstehenden Betriebskosten entscheidend ansteigen.
Zusammenfassend wurde hier ein Verfahren vorgestellt, dass mit überschaubarem Aufwand ein Benchmarking von Scheinwerfern zulässt. Hierbei kann z.B. die Bewertung der Reichweite des Abblendlichts über die 3lux-Isolinie definiert werden. Vorteilhaft gegenüber einer photogoniometrischen Messung ist ebenfalls, dass der Prüfer sich sofort im wahrsten Sinne des Wortes „ein Bild“ von der Lichtverteilung machen kann. Besonders geeignet ist das Verfahren zur Bewertung dynamischer Scheinwerfer, da die Messung einer Lichtverteilung nach einigen zehn Sekunden abgeschlossen ist und so eine große Schar unterschiedlicher Lichtverteilungen in sehr kurzer Zeit vermessen werden kann. Von großem Nutzen ist das Verfahren außerdem zur Funktionsüberprüfung z.B. von blendfreien Scheinwerfern.

Ausblick
Um eine vollständige Bewertung gemäß TC4-45 durchzuführen, welche auch das Fernlicht beinhaltet, muss die Messlänge von 70m auf 200m bis 300m erweitert werden. Wenn der Verkippungswinkel auf 1,5° erhöht wird, ist es möglich die Beleuchtungsstärkeverteilung bis 200m zu bestimmen. Dabei ist vorteilhaft, dass die sehr flachen Winkel von 0,2°, unter denen bei 200m das Licht auf die Straße trifft, auf 1,7° erhöht werden und damit der Leuchtdichtekoeffizient messbar wird. Nützlich ist ebenfalls, dass die gemessenen Leuchtdichten bzw. Beleuchtungsstärken, die eigentlich im Fernfeld sehr gering sind, aufgrund des Entfernungsgesetzes erheblich ansteigen und dass das Fernfeld aufgrund der Auflösung des Kamerasensors von etwa 1000x1000 Bildpunkten hochaufgelöst erfasst wird. Da das Nahfeld allerdings gestaucht wird und an Messauflösung verliert, kann die Messung unter mehreren Verkippungswinkeln sinnvoll sein. Zurzeit wird untersucht, wo die Grenze der Anwendbarkeit dieser Methode liegt.
Neben der Erhöhung der Messlänge fordert die TC4-45 die Beleuchtungsstärkeverteilung in 0,25m Höhe (als Maß für die Fußgängererkennbarkeit) und in 0,94m Höhe (als Maß für die Blendung). Die Beleuchtungsstärkeverteilung in 0,25m ist einfach zu ermitteln, da hier bei der Rücktransformation einfach eine um 0,25m reduzierte Anbauhöhe angenommen werden kann. Wird die Einzelkomponente vermessen, kann auch im Experiment die Anbauhöhe reduziert werden. Schwieriger ist die Darstellung der Beleuchtungsstärkeverteilung in 0,94m Höhe. Diese liegt in der Regel über der Anbauhöhe des Scheinwerfers. Bei Messungen an Einzelkomponenten können diese um 180° um die Referenzachse gedreht und die Beleuchtungsstärkeverteilung in 0,94m Höhe vermessen werden. Dabei wird der Einfluss der nun entgegengesetzt wirkenden Schwerkraft (z.B. Verformung des Reflektors, Veränderung der Wendellage) auf einem Messschirm überwacht. Bei der Messung am Fahrzeug wird dieses ohne erheblichen Aufwand nicht möglich sein, so dass hier andere Methoden zur Bewertung der Blendung angewandt werden müssen.

[1] S. Bogdanow, M. Marutzky, R. Zschoppe, U. Voigt, ATZ 10/2011
[2] M. Marutzky, B. Kleinert, S. Bogdanow, Proceedings 10th ISAL (2011)

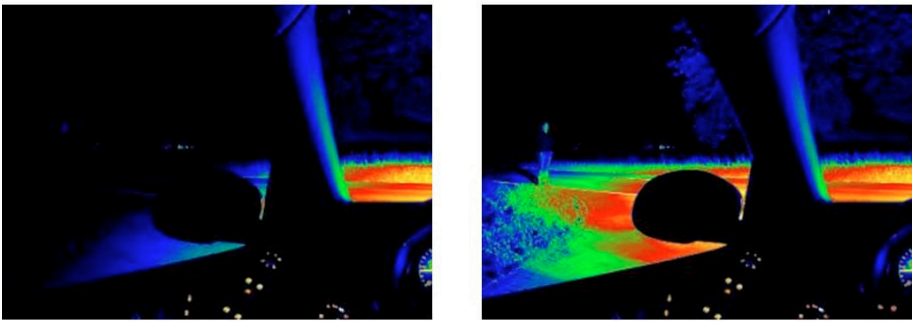


Abb. 1: Szenerie im Freifeld zur Bewertung eines statischen Abbiegelichts aus Fahrerperspektive (links: statisches Abbiegelicht ausgeschaltet, rechts: eingeschaltet, Person durch geänderte Kontrastverhältnisse erkennbar)

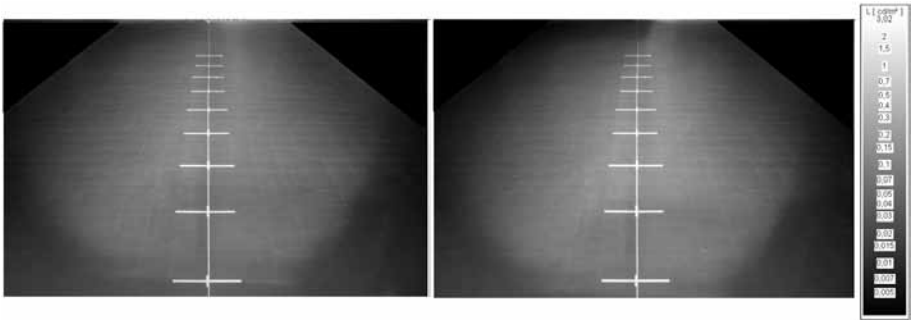


Abb. 2: Leuchtdichtebilder des Halogenscheinwerfers (links in Einbauposition; rechts um 1° nach unten verkippt)

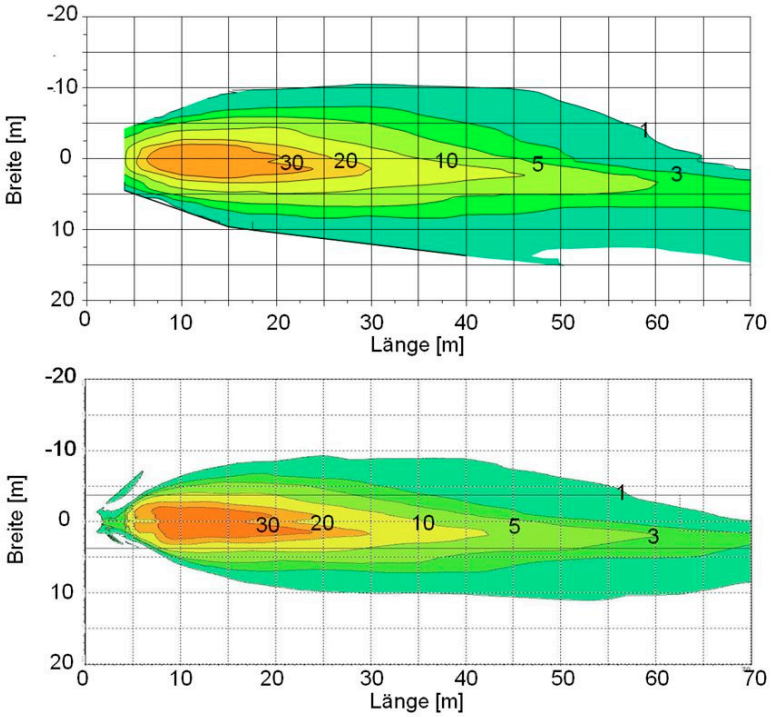


Abb. 3: Die durch geometrische Verkürzung bestimmte Beleuchtungsstärkeverteilung ist oben, die simulierte zum Vergleich unten dargestellt. Als Vergleichskriterium sind mehrere Isoluxlinien/(lx) erstellt worden.

Bereich	3lux	5lux		10lux		20lux		30lux	
	Breite bei 20m [m]	Breite bei 20m [m]	max. Reich-weite [m]	Breite bei 20m [m]	max. Reich-weite [m]	Breite bei 20m [m]	max. Reich-weite [m]	Breite bei 20m [m]	max. Reich-weite [m]
Simulation	13,5	10,6	60,1	8	42,2	5	30	1,5	23,8
Messung	14,3	11,9	60,1	9,1	46	5,2	30	1,3	23,8

Tab. 1: Vergleich von Messung und Simulation anhand der Isoluxlinien, vgl. Abb.3.

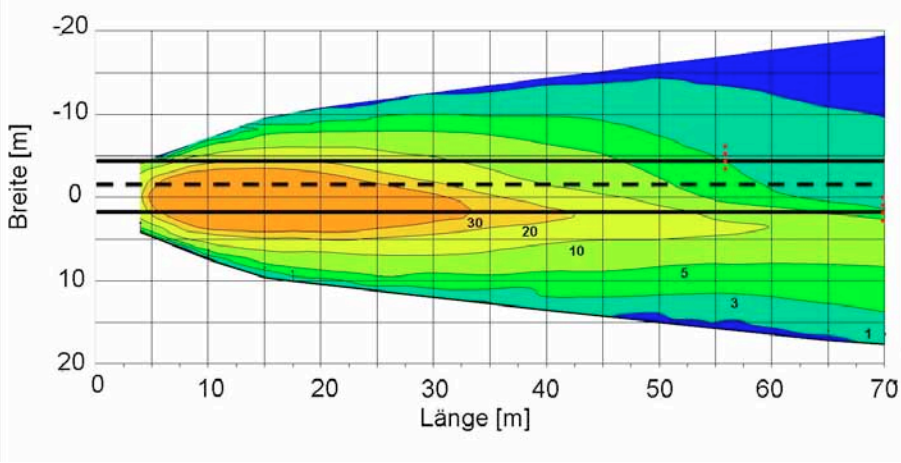


Abb. 4: Beleuchtungsstärkeverteilung mit Isoluxlinien/(lx) für das Scheinwerfer-paar auf einer gedachten Straße und den Schnittpunkten der 3lux-Linie mit den Fahrbahnrändern (gestrichelte Linien)

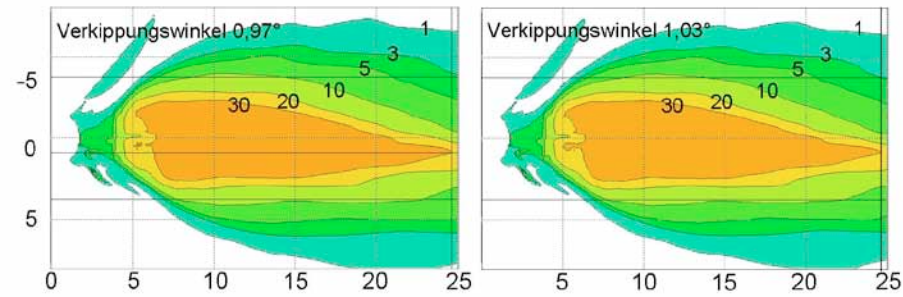


Abb. 5: Gegenüberstellung des Einflusses verschiedener Verkippungswinkel zur Veranschaulichung der Auswirkungen auf die Beleuchtungsstärkeverteilung und auf die Isoluxlinien/(lx) aus Birdeyeview (links: zu geringer Verkippungswinkel; rechts: zu großer Verkippungswinkel)

Bewertung von Nahfeldgoniophotometern

Knut Bredemeier, Frank Gassmann, Udo Krüger, Franz Schmidt

TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, W.-v.-Siemens-Str. 5, 98693 Ilmenau
eMail: knut.bredemeier@technoteam.de

1 Einleitung

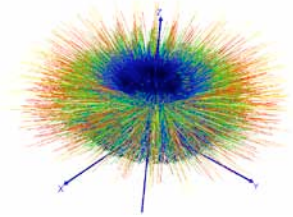
Messverfahren mit klassischen Goniophotometern behandeln die leuchtenden 3D-Oberflächen von Lichtquellen wie Punktlichtquellen d.h. sie geben die Wirkung der Lichtausstrahlung nur für große Abstände als Lichtstärkeverteilungskörper an /4/.

Ein Nahfeldgoniophotometer ist ein Goniophotometer mit dem Messungen im Nahfeld der Lichtquelle ausgeführt werden und dessen Photometerkopf durch eine Leuchtdichtemesskamera ersetzt wurde /7/. Damit wird die Wirkung der Ausstrahlungscharakteristik für einzelne Elemente der realen oder einer virtuellen Oberfläche der Lichtquelle als Verteilung von Leuchtdichten erfasst und als Strahlenfeld gemessen.

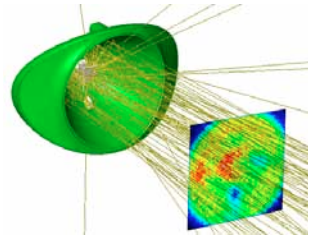
Die Werte des Strahlenfeldes werden als Strahlen bezeichnet /1, 6, 5, 9/. Sie erlauben es, den Lichtstärkeverteilungskörper und den Lichtstrom der Lichtquelle zu berechnen. Die Bereitstellung des Strahlenfeldes ist Voraussetzung, um die Entwicklung von Leuchten und leuchtenden Baugruppen mit modernen Simulationswerkzeugen[*)] zu ermöglichen (z.B. Reflektorberechnung, Entwicklung von lichtleitenden Elementen). Diese Vorgehensweise ist bei der Entwicklung neuer Halbleiterlichtquellen und Lampen für bestimmte Applikationen ebenso unverzichtbar, wie bei der Entwicklung, Konstruktion und Optimierung von Leuchten /3/.

Zur Verdeutlichung zeigt Abb. 1 von links nach rechts eine LED, die graphische Darstellung der Ausstrahlcharakteristik durch das zugehörende Strahlenfeld und die Simulation eines Scheinwerferreflektors für eine vorgegebene Richtungsverteilung des emittierten Lichtstroms unter Verwendung des Strahlenfeldes.

LED-Modul



Ausstrahlcharakteristik als Strahlenfeld



Entwicklung eines LED-Scheinwerfers, Simulation mit Strahlendaten

Abb. 1: von links nach rechts: LED-Modul, Darstellung der Ausstrahlcharakteristik durch das Strahlenfeld und Simulation eines Scheinwerferreflektors für eine vorgegebene Richtungsverteilung des emittierten Lichtstroms

*) z.B. Speos, Asap, Light Tools, Zemax

2 Nahfeldgoniophotometer – Aufbau und Funktion

Zur Messung der Strahlen des Strahlenfeldes wird bei den Nahfeldgoniophotometern eine Leuchtdichtemesskamera auf einer Hüllfläche (bevorzugt Kugelfläche, z.B. unter Nutzung eines Goniophotometers) um das Messobjekt herumgeführt und in einem diskreten Winkelraster werden Leuchtdichtebilder aufgenommen. (/2/, siehe Abb. 2).

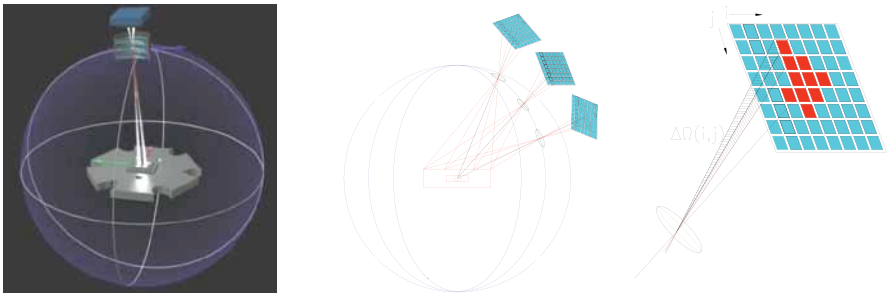


Abb. 2: Prinzip der Leuchtdichtebilderfassung in einem Nahfeldgoniophotometer

Das Goniophotometer übergibt die Leuchtdichtebilder mit den Positionen (Winkel $\vartheta_{Dk}, \varphi_{Dl}$) an eine Recheneinheit (z.B. PC), die aus der Gesamtheit der Leuchtdichtebilder unter Kenntnis der geometrischen Verhältnisse im Moment der Bildaufnahme das Strahlenfeld berechnet.

Strahlenberechnung

Ein Strahl $\Delta\Phi(x, y, z, \vartheta, \varphi)$ wird ermittelt, indem die gemessene Leuchtdichte $L(x, y, z, \vartheta, \varphi)$ auf dem Flächenanteil $\Delta A(x, y, z)$ am Ort (x, y, z) für die Richtung (ϑ, φ) über $\Delta A(x, y, z)$ in dem Raumwinkelanteil $\Delta\Omega(\vartheta, \varphi)$ nach folgender Gleichung berechnet wird:

$$\begin{aligned} \Delta\Phi(x, y, z, \vartheta, \varphi) &= L(x, y, z, \vartheta, \varphi) \cdot \Delta A(x, y, z) \cdot \cos\vartheta \cdot \Delta\Omega(\vartheta, \varphi) \\ &\quad für \forall \Delta A \; und \; \forall \Delta\Omega \\ &\quad mit \quad \Delta A_p(x, y, z) = \Delta A(x, y, z) \cdot \cos\vartheta \\ &\quad mit \quad \sum dA(x, y, z) = Hüllfläche \; und \; \sum d\Omega(\vartheta, \varphi) = 2\pi(Halbraum) \end{aligned} \qquad (1)$$

Das Strahlenfeld ergibt sich, wenn alle Strahlen für alle Flächenanteile und dort für alle Raumwinkelanteile berechnet werden.

Mit der Kenntnis des Strahlenfeldes sind auch weitere lichttechnische Größen bestimmbar. Die Summe aller Teillichtströme der einzelnen Strahlen ergibt den **Gesamtlichtstrom.**

$$\Phi_{mess} = \sum \Delta\Phi(x, y, z, \vartheta, \varphi) \quad für alle \; Strahlen \qquad (2)$$

Werden die Lichtstromanteile aller Strahlen, die in ein Raumwinkelsegment $\Delta\Omega(\vartheta_k, \varphi_l)$ zeigen, unabhängig von ihrer Herkunft (x, y, z) addiert und auf das Raumwinkelsegment bezogen, erhält man die **Lichtstärke**.

$$I(\vartheta_k, \varphi_l) = \frac{\sum_{x,y,z} \Delta\Phi(x_S, y_S, z_S, \vartheta_S, \varphi_S)}{\Delta\Omega(\vartheta_k, \varphi_l)} \quad \forall \vartheta_S, \varphi_S \in \Delta\Omega(\vartheta_k, \varphi_l) \qquad (3)$$

3 Abgleichen, Justieren

Die Justierung (VIM 3.11) eines Nahfeldgoniophotometers erfolgt durch den Hersteller. Unter Justieren wird die Menge aller Operationen an einem Messgerät verstanden, die dazu führen, dass das Gerät Anzeigewerte entsprechend einer gegebenen Referenzgröße liefert.

Nahfeldgoniophotometer messen das Strahlenfeld $\Delta\Phi_i(x, y, z, \vartheta, \varphi)$. Dieses Strahlenfeld wird in Form von Strahlendaten (ray file) kodiert. Das Strahlenfeld ist ein sehr großes Datenfeld (10^5…. 10^9 Strahlen).

Zur Justierung werden sinnvolle integrale Messgrößen und dazugehörige Normale verwendet. Die Integration über die komplette Hüllfläche und alle Ausstrahlrichtungen liefert den Gesamtlichtstrom.

Die Kalibrierung des Nahfeldgoniophotometers auf Lichtstrom erfolgt mit einer kalibrierten Lichtstromnormallampe.

Der Lichtstrom der Normallampe wird gemessen, d.h. die Summe aller Lichtstromanteile der gemessenen Strahlen entsprechend Gleichung (2) gebildet und mit dem Lichtstrom der Normallampe verglichen. Daraus kann ein Kalibrierfaktor ermittelt und damit das Nahfeldgoniophotometer justiert werden.

4 Messunsicherheit der Strahlendaten

Die Strahlen $\Delta\Phi(x_D, y_D, z_D, \vartheta_D, \varphi_D)$ stellen Lichtstromanteile dar, die ausgehend von den Orten (x_D, y_D, z_D) in die Richtungen (ϑ_D, φ_D) weisen. Allen Werten dieser Strahlenvektoren (Lichtstromanteil $\Delta\Phi$, Fußpunkt (x_D, y_D, z_D) und Richtungen (ϑ_D, φ_D)) sind Messunsicherheiten (MU) beigeordnet.

Beim Nahfeldgoniophotometer werden Messwerte als Leuchtdichtebilder mit der Leuchtdichtemesskamera ermittelt und zusammen mit Werten für Orte und Richtungen vom Goniophotometer zu Strahlendaten umgeformt. Für diese Messwerte bewirken viele unterschiedliche Ursachen jeweils Beiträge zu den genannten Messunsicherheiten.

Bei der Bestimmung von Messunsicherheiten für die Strahlendaten sind folgende MU der verwendeten Daten zu berücksichtigen. Dabei sind auch die Korrelationen zwischen den Messwerten der Koeffizienten zu berücksichtigen:

4.1 MU der Leuchtdichtebilder

Daten	**MU**
$L_{i,j}(\vartheta_C, \varphi_C)$	MU der Messwerte der Leuchtdichten in den Leuchtdichtebildern
$\vartheta_{Cj} = f_{\vartheta_C}(j), \varphi_{Cj} = f_{\varphi_C}(j)$	MU der Verzeichnungsdaten des Objektivs der Leuchtdichtemesskamera, Restabweichungen nach der geometrischen Kalibrierung der Leuchtdichtemesskamera
$\Delta\Omega_j = f_\Omega(j)$	Wird aus $f_{\vartheta_C}(j)$, $f_{\varphi_C}(j)$ errechnet, MU-Fortpflanzung

4.2 MU der Positionen und Richtungen

Daten	**MU**
Kameraposition bei Bilderfassung $(R_D, \vartheta_{Di}, \varphi_{Di})$	hier geht ein: Unsicherheit der Winkelpositionen im Goniophotometerkoordinatensystem, Windschiefe der Achsen; Verwindung

	des Gestells
	Unsicherheit des Radius der Kamerakugel (Lage der Eintrittspupille)
Blickrichtung der Kamera zum Schnittpunkt der Achsen	hier geht ein:
	Blickrichtung der Kamera, welche Bildkoordinate entspricht dem Ursprung des Gerätekoordinatensystems (Windschiefe der Achsen; Verwindung des Gestells)
	Verdrehung der Kamera

Bei ähnlichen mechanischen Bewegungseinheiten sind diese Unsicherheitsparameter als „Taumelkugel“ zusammengefasst.

Objektoberfläche (Art und Lage in (x_D, y_D, z_D))	MU der Beschreibung der Lage des Messobjektes im Gerätekoordinatensystem

5 Kenngrößen für die Charakterisierung von Nahfeldgoniophotometern

Zur Charakterisierung von Nahfeldgoniophotometern werden die Kenngrößen nach Tabelle 1 herangezogen. Für ein ideal messendes Nahfeldgoniophotometer werden die Kenngrößen $f_x = 0$.

Symbol	***Beschreibung***	***Ermittlungsart***
f_Φ	Abweichung des Lichtstromes	orts- und winkelunabhängig
f_l	Abweichungen in der LVK	winkelabhängig
f_M	Abweichungen in der spez. Ausstrahlung	ortsabhängig

Tabelle 1: Kenngrößen von Nahfeldgoniophotometern

5.1 Abweichung des Lichtstroms

Zur Bewertung der Lichtstrommessung eines Nahfeldgoniophotometers wird das Strahlenfeld einer rückgeführten Normallampe gemessen und entsprechend Gleichung (2) daraus der Lichtstrom Φ_{mess} bestimmt und mit dem Lichtstrom der Normallampe Φ_N verglichen. Die Differenz der Lichtströme sowie die erweitere Messunsicherheit der Lichtstrommessung sind anzugeben.

Als Normallampen werden kalibrierte Glühlampen eingesetzt. Diese liefern näherungsweise Normlichtart A.

Als Kenngröße der Abweichung der Lichtstrommessung wird f_Φ verwendet:

$$f_\Phi = \frac{\left|\Phi_{mess} - \Phi_N\right|}{\Phi_N} \qquad (4)$$

Weichen die Messobjekte in ihrer spektralen Ausstrahlcharakteristik stark von Normlichtart A ab, z.B. bei Messung von Objekten mit LED oder mit Entladungslampen, kann eine zusätzliche Kalibrierung (und danach gegebenenfalls eine Justierung) mit einer Normallampe auf der Basis einer ähnlichen spektralen Ausstrahlcharakteristik wie die des Messobjektes sinnvoll sein. Alternativ müssen entsprechende Korrekturen verwendet werden.

5.2 Abweichung der Lichtstärkeverteilung

Bei der Messung im Nahfeld entsteht eine Lichtstärke erst aus der Zusammenfassung aller Strahlen, die in dieselbe Richtung weisen (Gleichung (3)). Für die Bewertung der Lichtstärkemessung durch ein Nahfeldgoniophotometer sind die Strahlendaten eines rückgeführten „Lichtstärkeverteilungs-Normal“ zu messen und daraus die Lichtstärkeverteilung $I_{k,l}(\vartheta_k,\varphi_k)$ zu bestimmen. Diese ist mit der Lichtstärkeverteilung des Normals $I_N(\vartheta_k,\varphi_l)$ zu vergleichen. Die Lichtstärkeverteilung wird in diskreten Schritten

($k = 0...N-1,\ \Delta\vartheta_k = \vartheta_k - \vartheta_{k-1} = 180/N$ und $l = 0...M-1,\ \Delta\varphi_l = \varphi_l - \varphi_{l-1} = 360/M$) angegeben.

Für jedes rückgeführte Lichtstärkenormal stehen Norm-Lichtstärkeverteilungen in den Auflösung 0.5°, 1°, 2,5° und 5° zur Verfügung. Die Auflösung der gemessenen Lichtstärkeverteilung muss einer Auflösung der Norm-Lichtstärkeverteilung entsprechen.

Die Kalibrierung erfolgt durch Vergleich der durch Vermessung eines rückführbaren Lichtstärkenormals ermittelten Lichtstärkeverteilung $I_{k,l}(\vartheta_k,\varphi_k)$ mit einer dem Lichtstärkenormal zugeordneten Norm-Lichtstärkeverteilung $I_N(\vartheta_k,\varphi_l)$ an den jeweils gleichen Winkelpositionen.

Als Normale für Lichtstärkeverteilungen wurden Normale mit charakteristischer Lichtstärkeverteilung (siehe Abb. 4) entwickelt.

Die Abweichungen der gemessenen Lichtstärkeverteilung von der Normlichtstärkeverteilung wird durch die Kenngröße f_l (die mittlere quadratische Abweichung der Lichtstärken- root mean square error) entsprechend Gleichung (5) beschrieben (hier als Lichtstromabweichung bezogen auf den Norm-Lichtstrom formuliert):

$$f_l = \sqrt{\frac{1}{\sum_{k,l}\Omega_{k,l}} \sum_{k=0}^{N}\sum_{l=0}^{M} \left(I(\vartheta_k,\varphi_l) - I_N(\vartheta_k,\varphi_l)\right)^2 \cdot \Delta\Omega_{k,l}} \cdot \frac{\sum_{k,l}\Omega_{k,l}}{\Phi_N} \qquad (5)$$

Extreme Abweichungen werden durch den Kennwert $f_{I\max}$ entsprechend Gleichung (6) beschrieben:

$$f_{I\max} = \max_{k,l}\left|I(\vartheta_k,\varphi_l) - I_N(\vartheta_k,\varphi_l)\right| \qquad (6)$$

Da sich eine Verdrehung des Lichtstärkenormals im Goniophotometer in einer äquivalenten Verdrehung der Lichtstärkeverteilung manifestiert, ist vor der Messung eine präzise mechanische Justierung der Richtung des Normals vorzunehmen. Dem Lichtstärkenormal ist ein Koordinatensystem (x_S, y_S, z_S) „mitzugeben“ (z.B. durch einen am Lichtstärkenormal montierten Tripelspiegel oder einen Laser).

Die Ausrichtung der Normale im Goniophotometer erfolgt durch den Nutzer anhand der mechanischen und/oder optischen Positions- und Richtungsreferenzen des Normals.

Alternativ können die LVKs aneinander gefittet werden, d.h. eine LVK wird durch eine Koordinatentransformation so verdreht, dass sie „bestmöglich auf die andere passt“. Hier ist aber zu beachten, dass gegebenenfalls auch Messabweichungen durch die Anpassung ausgeglichen werden und an anderer Stelle neue Messabweichungen entstehen können.

Demgegenüber äußert sich eine Verschiebung des Normals weder in der Form noch in der Lage der Lichtstärkeverteilung.

Der Kalibriervorgang ist deshalb für eine zentrale Position sowie für drei weitere Positionen des Lichtstärkenormals (jeweils um 0,75*Radius des möglichen Messfeldes entlang einer Koordinatenachse verschoben (z.B. wie in Abb. 3), durchzuführen. Als Kennwert f_l wird der maximale Wert der an den vier Positionen bestimmten $f_{l\,i}$ genommen.

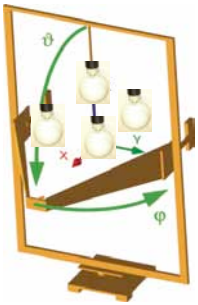


Abb. 3: Messpositionen zur Kalibrierung der Lichtstärkeverteilung

5.3 L^3-Normale

Da Nahfeldgoniophotometer Strahlendaten messen und daraus die lichttechnischen Größen Lichtstärkeverteilung und Lichtstrom ermitteln können, sind Normale sinnvoll, die diese lichttechnischen Größen kalibrierfähig zur Verfügung stellen.

Auf der Basis von Leistungs-LED wurden Normale für die Größen Lichtstrom, Lichtstärke, Leuchtdichte – L^3 entwickelt.

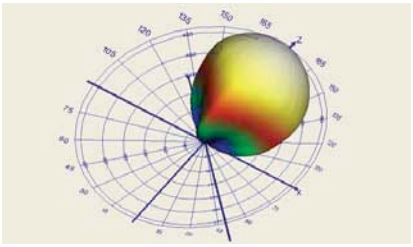


Abb. 4: L³-Normal (Lichtstrom, Leuchtdichte, Lichtstärke) mit Lichtstärkegradienten

Die Stabilität der lichttechnischen Größen wird über eine Temperaturregelung mit einem Peltier-Element und eine Intensitätsregelung mit einer spektral angepassten Fotodiode realisiert. In dem geschlossenen Gehäuse mit wechselbarem Abschlussdeckel wird je L³-Normal eine vorgealterte und selektierte HighPower-LED verwendet, die bei etwa 2/3 ihres Nennstromes betrieben wird. Die Eigenschaften sind im Folgenden aufgeführt:

- Hohe Stabilität der realisierten Werte (bezogen auf Leuchtdichte):
- Umgebungstemperatur 25±10°C (Temperaturkoeffizient < 0,1%/K)
- Alterung: < 1%/100h
- Verschiebung der dominanten Wellenlänge: < 1nm/100h
- Kurze Einschaltzeiten: < 5min (dann Abweichung vom Endwert < 0,1%)
- Sehr gute Homogenität der Leuchtdichte, in vielen Farben lieferbar
- Annähernd lambertförmige Ausstrahlcharakteristik (ohne Kronenaufsatz)
- Exakte Lichtaustrittsfläche: Durchmesser 20mm Passung: H7
- Kompaktes Gehäuse (Durchmesser: 50 mm, Länge: 80 mm)
- Internes Datenlogging (Betriebsstunden, Betriebsparameter,…), USB-Interface

Zum Betrieb des L3-Normals wird weitere Unterstützung bereitgestellt:

- ActiveX-Control zum Auslesen der Daten durch Fremdsoftware
- Windowsapplikation zur Konfiguration, Anzeige und Protokollierung der Daten über MS Excel

5.4 Abweichung der Geometrie

Zur Kalibrierung der Geometrie wird eine Anordnung aus zwei oder mehr Lichtquellen (z.B. Kugellampen oder Lambertstrahler) mit bekanntem Abstand im Nahfeldgoniophotometer vermessen. Aus den Strahlendaten (Abb. 7) wird die spezifische Ausstrahlung berechnet. Dies kann erfolgen, in dem alle Lichtstrahlen auf eine Ebene, in der die Lichtschwerpunkte der beiden Quellen liegen, zurückverfolgt werden. In dieser Ebene muss die Verteilung der Strahlen zwei deutliche Häufungen ergeben (Abb. 6). Von diesen Häufungen wird der Schwerpunkt bestimmt. Der Abstand der beiden Schwerpunkte wird mit dem tatsächlichen Abstand der beiden Quellen verglichen.

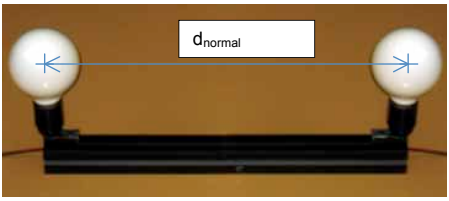


Abb. 5: Anordnung zweier Lichtquellen zur Geometriekalibrierung

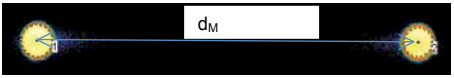


Abb. 6: Projektion aller Strahlen auf eine Ebene durch die Lichtschwerpunkte

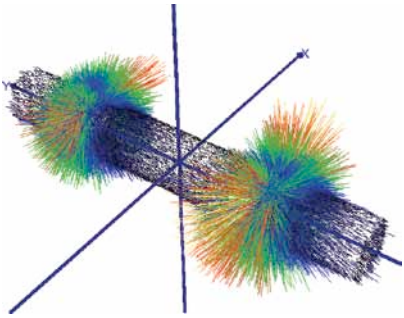


Abb. 7: Strahlenverteilung von zwei Kugellampen mit Abstand a (auf eine Hüllfläche Zylinder bezogen)

Die Abweichung des aus dem Strahlenfeld ermittelten Abstandes der beiden Lichtquellen von deren tatsächlichem Abstand wird durch die Kenngröße f_M beschrieben:

$$f_M = \frac{d_M - d_{normal}}{d_{normal}} \qquad (7)$$

Zur Charakterisierung von Goniophotometern, die bevorzugt für die Vermessung von LED bzw. LED-Baugruppen eingesetzt werden, wurden Normale entwickelt, die neben Lambertcharakteristik (eine diffus strahlende hinterleuchtete Streuscheibe) Spotcharakteristik (engstrahlende LED mit definierten Abständen) enthalten. Durch getrennte Helligkeitsregelungen können unterschiedliche Lichtstärkeverteilungen realisiert werden. Da die Anordnung der Spot-LED bekannt ist, steht damit auch ein Geometrienormal zur Verfügung.

6 Ergebnisse beim Vergleich

Die nachfolgenden Abbildungen demonstrieren exemplarisch die Bewertung eines Nahfeldgoniophotometers durch die Berechnung der Abweichungen einer gemessenen Lichtstärkeverteilung von der Verteilung eines L³-Normals. In der oberen Reihe sind die Rohdaten, links die Referenz-Lvk des Normals und in der Mitte die gemessene Lvk, dargestellt (Lichtstärken farbkodiert). Das rechte Bild zeigt das Ergebnis der Koordinatenanbindung der Ist-Lvk durch ein automatisches Fittingverfahren. In der unteren Reihe sind links die Absolutbeträge der Differenzen der Referenz- und der rotierten Ist-Lvk abgebildet. Die Differenzen betragen nach Gleichung (5) ca. 5% des Gesamtlichtstroms und treten vorwiegend im Bereich der Schattenkanten auf. Negative Differenzen konzentrieren sich auf den abgeschatteten Halbraum und positive Differenzen auf die ‚Lichtseite' der Kanten. Da in vielen Fällen eine visuelle Zuordnung lokaler Differenzen zu den korrespondierenden Richtungen der Referenz-Lvk problematisch ist, empfehlen sich für die Visualisierung Dar-

stellungen wie im mittleren und im rechten Bild, bei denen die Differenzen auf die Referenz-Lvk gemappt wurden. Welche Rückschlüsse sich aus den Positionen und Größen der Lvk-Differenzen auf die Eigenschaften und die Parametrierung von Nahfeldgoniometern ziehen lassen, wird im Rahmen eines BMWi – Verbundprojekts in Zusammenarbeit mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Berlin untersucht /8/.

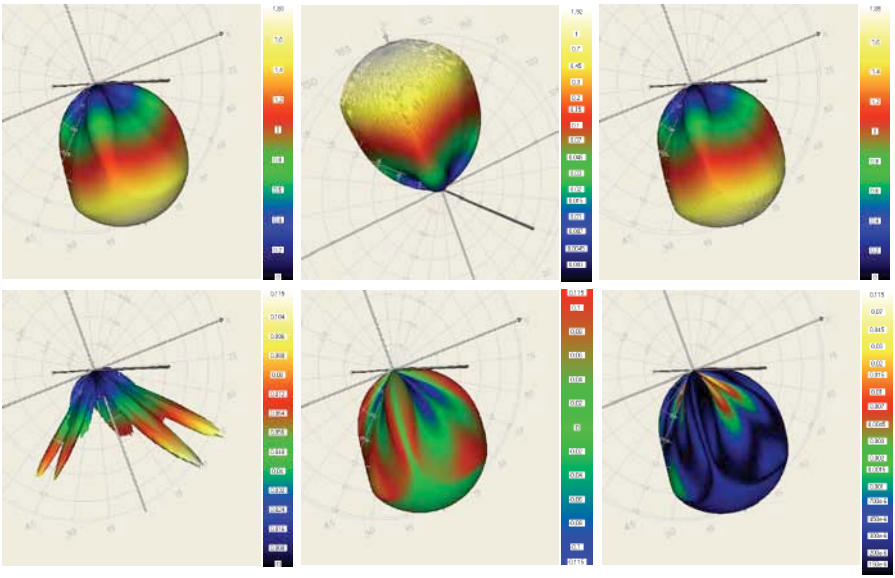


Abb. 8: Reihe oben: links: Referenz-Lvk, Mitte: Ist-Lvk, rechts: Ist-Lvk nach Fitting
Reihe unten: links: Differenz-Lvk (Absolutwerte), Mitte: Differenzen, gemappt auf Referenz-Lvk (blau: positive Differenzen, rot: negative Differenzen), rechts: Differenzen (Absolutwerte, logarithmische Darstellung)

7 Literatur

/1/ Adelson, E. H.; Bergen, J. R.: The plenoptic function and the elements of early vision. In: Computational Models of Visual Processing, Landy, M.; Movshon, J. A., MIT Press, MA (1991), 3–20.

/2/ Bredemeier, K.; Poschmann, R. ;Schmidt, F.: Nahfeldgoniophotometer – Systeme zur Messung der Lichtverteilungen an Leuchten, Lampen und LED. Licht 2006, 11.09.2006, Bern.

/3/ Bredemeier, K.; Poschmann, R.; Schmidt, F.: Development of luminous objects with measured ray data. Laser+Photonik, May 2007.

/4/ Hentschel, H.-J.: Licht und Beleuchtung: Grundlagen und Anwendung- 5. Aufl. - Heidelberg : Hüthig, 2002. Kap. 4.4.2 Messung der Lichtstärke.

/5/ Levoy; M.; Hanrahan, P.: Light Field Rendering. Proc. ACM Siggraph, ACM Press, 1996, pp. 31-42.

/6/ Moon, P.; Spencer, D.E.: The Photic Field, MIT Press, 1981.

/7/ Poschmann, R.; Riemann, M.; Schmidt, F.: Verfahren und Anordnung zur Messung der Lichtstärkeverteilung von Leuchten und Lampen; Patent DE 41 10 574 v. 30.03.1991.

/8/ http://www.ptb.de/cms/en/fachabteilungen/abt8/fb-84/ag-842/goniophotometer-840.html. Webseite zum BMWi - Verbundprojekt , Kamerabasiertes Nahfeld-Goniophotometer‘.

/9/ Zhang, Cha: On sampling of image-based rendering data. Dept. of Electrical and Computer Engineering, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA 15213, 2004.

Einsatz von bildgebenden Leuchtdichtemesskameras bei der Bewertung von Blendungssituationen

Tobias Porsch; Udo Krüger; Franz Schmidt
TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, W.-v.-Siemens-Str. 5, 98693 Ilmenau
eMail: tobias.porsch@technoteam.de

1 Einleitung

Über die Möglichkeiten der Bestimmung von Blendungskennzahlen mit Hilfe von bildauflösenden Leuchtdichtemesskameras (LMK) wurde schon mehrfach berichtet / 7// 10// 11// 12// 13/.
Inzwischen sind LMK's weltweit Stand der Technik und werden von mehreren Herstellern in unterschiedlichen Konfigurationen angeboten. Aktuell auf dem Markt angebotene LMK's besitzen ähnliche Eigenschaften, wie punktweise messende Leuchtdichtemesser der Klasse B, nach DIN 5032 Teil 7.
Bei der Überarbeitung der LiTG Schrift 12.3 / 14/ im vorigen Jahr und bei der derzeitigen Überarbeitung der LAI / 1/ wurden Hinweise zur Nutzung von LMK's aufgenommen. Deshalb und auf Grund der in den letzten Jahren erfolgten Verbesserung der technischen Parameter von LMK's sollen hiermit erneut deren Einsatzmöglichkeiten zur Bestimmung von Blendungskennzahlen vorgestellt werden.

2 Blendungsbewertung

Zur Beurteilung der Blendwirkung von Beleuchtungssystemen, werden je nach Beleuchtungsaufgabe und technischer Umsetzung unterschiedliche Blendungskennzahlen und Messmethoden angewandt:

- Max. tolerierbare Leuchtdichten der Blendquelle (nach LAI)
- Vertikale Beleuchtungsstärke am Fenster zur Beurteilung der Raumaufhellung
- Äquivalente Schleierleuchtdichte
- Schwellwerterhöhung TI (Threshold Index)
- Unified Glare Rating (UGR)
- Daylight Glare Probality (DGP)
- u. v. m.

Sämtliche Messvorschriften erfassen Leuchtdichten $L(\varphi,\vartheta)$ im Sichtfeld, klassifizieren diese als leuchtendes (blendendes) Objekt und verknüpfen diese mit Ihrem Blickwinkel (φ,ϑ) im Messszenario sowie Ihrer flächigen Größe, dem Raumwinkel Ω und den Leuchtdichten im Umfeld $L_{Umfeld}(\varphi,\vartheta)$ / 2/ / 3// 4/.

$$Blendgröße\ X = f_{Bl}\left(L_{Blendquelle}(\varphi,\vartheta);\Omega;\varphi;\vartheta;L_{Umfeld}\right) \qquad (1)$$

$L_{Blendquelle}$ = Leuchtdichte der Blendquelle
L_{Umfeld} = Leuchtdichte des Umfeldes (mittlere Leuchtdichten oder geeignet gewichtete Leuchtdichten in einem definierten Umfeld)
$\Omega_{Blendquelle}$ = Raumwinkel unter dem die Blendquelle erscheint
ϑ,φ = Winkel unter dem die Blendquelle erscheint ($\vartheta=0$ entspricht i.d.R. der Blickrichtung)

Zur Bestimmung von Blendungskennzahlen werden heute noch vielfach die Leuchtdichten der Blendquellen mit Leuchtdichtemessern punktweise gemessen und ihre

Positionen mit einem Winkelmesser (z.B. Theodolit) erfasst. Zur Ermittlung der Größe der Blendquellen (Raumwinkel) sind verschiedene durchaus komplizierte Verfahren vorgesehen (Winkelmessung der Grenzen der Blendquelle mittels Theodoliten).
Auf Grund dieser aufwendigen Verfahren werden Blendungskennzahlen meist nicht nachgemessen, sondern oft aus den photometrischen Angaben der Leuchtenhersteller, beispielsweise der Lichtverteilungskurve (LVK) der verwendeten Leuchte und der Raumgeometrie berechnet.
Mit bildauflösenden Leuchtdichtemesssystemen (LMK, Videophotometer / 5// 6 // 8// 9/) können die zur Berechnung von Blendungskennzahlen notwendigen Messdaten mit einer oder wenigen Aufnahmen schnell und unkompliziert gemessen werden. Entsprechende Softwarelösungen zur Errechnung verschiedenster Blendungskennzahlen aus diesen Messdaten stehen ebenfalls zur Verfügung.

3 Eigenschaften von LMK‘s

LMK's sind Digitalkameras, die mit spektral angepassten Filtern im Strahlengang eine Empfindlichkeit entsprechend der Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges $V(\lambda)$ nachempfinden. Eine reale Messkamera besitzt Eigenschaften, die von einem idealen Messgerät mehr oder weniger abweichen (bspw. Nichtlinearitäten, Vignettierung, Dunkelsignal, Smearfehler u. v. m.). Diese Eigenschaften werden in einem Kalibrierdatensatz beschrieben und in der Bildauswertungssoftware hinterlegt.
Somit können nach der Bilderfassung diese Abweichungen korrigiert werden, und man erhält Signalwerte im Bild, die der Leuchtdichte in der Szene äquivalent sind. Selbstverständlich müssen diese Signalwerte mit unterschiedlich hohen Messunsicherheiten bewertet werden. Auf dem Markt existierende LMK's besitzen ähnliche Eigenschaften, wie punktweise messende Leuchtdichtemesser der Klasse B nach DIN 5032 Teil 7.

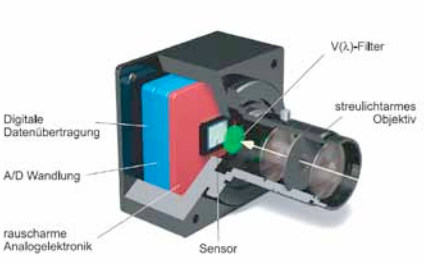


Abb. 1: Leuchtdichtemesskamera LMK98-4

Abb. 2: Leuchtdichtemesskamera LMK mobile mit Halbraumobjektiv

LMK's besitzen heute Bildpixelauflösungen von 1,5 - 16 Megapixel. Das bedeutet ungefähr 1380 x 1080 bis 4096 x 4096 Leuchtdichtemesswerte in einem Messbild.Viele LMK's können mit Wechselobjektiven eingesetzt werden. Dadurch wird das erfassbare Bildfeld und die Winkelauflösung beliebig gestaltbar. Je nach eingesetztem Objektiv (Weitwinkel- bzw. Teleobjektiv) ergeben sich entsprechende Winkelauflösung $\Delta\varphi, \Delta\vartheta$ pro Bildpixel, d.h. für jeden einzelnen Messwert.

Für einige Messaufgaben ist der gesamte Halbraum zu bewerten. Durch den Einsatz von speziellen Halbraumobjektiven (Abbildung 2) kann dies ebenfalls in nur einer Messbildaufnahme erfolgen.

3.1 Geometrische Abbildung, Raumwinkel

Im Sichtbereich des LMK werden Leuchtdichten $L_{i,j}$ in Abhängigkeit von ihren Positionen gemessen. Die Pixelkoordinaten (*i, j*) definieren eindeutig auch den Blickwinkel (φ, ϑ) in Bezug zur optischen Achse des Systems.

$$\vartheta = f_\vartheta(i,j) \qquad (2)$$
$$\varphi = f_\varphi(i,j)$$

Damit ist für jeden erfassten Pixel sein Leuchtdichtewert *L* an der Stelle *i, j* im Messbild sowie sein Beobachtungswinkel (φ, ϑ) und über die Winkelinkremente $\Delta\varphi, \Delta\vartheta$ auch sein Raumwinkelanteil $\Delta\Omega_{i,j}$ bekannt (Tabellen 1 & 2).

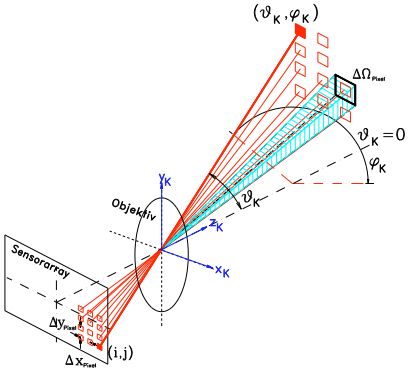


Abb 3: Zusammenhänge der geometrischen Abbildung

Somit ergeben sich für ein ideales Objektiv, die in Gleichung (3) aufgeführten Zusammenhänge:

$$\Delta\Omega_{Pixel\ i,j} = \frac{\Omega_0 \cdot A_{Pixel} \cdot \cos\vartheta}{r^2}; \quad r = \frac{f}{\cos\vartheta} \qquad (3)$$
$$\Delta\Omega_{Pixel\ i,j} = \Omega_0 \cdot k \cdot \cos^3\vartheta$$

Objektiv / Sensorauflösung	f´=100 mm	f´=25 mm	f´=8 mm	Halbraum-objektiv
1 MP	0,22	0,89	2,77	9,83
5 MP	0,12	0,45	1,48	5,26

Tab. 1: Winkel $\Delta\vartheta$ pro Pixel in Winkelminuten (in Bildmitte)

Objektiv / Sensorauflösung	f´=100 mm	f´=25 mm	f´=8 mm	Halbraum-objektiv
1 MP	1,4E-05	2,3E-04	2,2E-03	2,8E-02
5 MP	4,1E-06	6,5E-05	6,4E-04	8,0E-03

Tab. 2: Raumwinkel $\Delta\Omega$ pro Pixel in Steradiant (in Bildmitte)

Für viele Objektive sind die tatsächlichen Bildfeldwinkelverhältnisse komplizierter (optische Verzeichnung). Diese Zusammenhänge können aber gemessen und in Form von Softwaredatensätzen für $\vartheta = f_\vartheta(i,j)$, bzw. $\varphi = f_\varphi(i,j)$ und $\Delta\Omega = f_\Omega(i,j)$, bspw.

als Korrekturbild abgelegt und für die Bestimmung geometrischer Messdaten (Blickwinkel, Raumwinkel) verwendet werden.
LMK's liefern somit in einem Messbild für jedes Pixel (i, j) einen Messwert $L(\vartheta,\varphi)$ und den zugehörigen Raumwinkel $\Delta\Omega$.

4 Erfassung der Leuchtdichtebilder

Die zu erfassenden Leuchtdichten haben einen extremen Dynamikumfang. Die Leuchtdichten der Blendquellen können durchaus im Bereich von >> 10^4 cd/m² liegen (>> 10^6 cd/m² bei direkter Sicht ins Leuchtmittel). Die Umfeldleuchtdichten können im Gegensatz dazu im Messbereich von ungefähr 10^{-3} cd/m² liegen.
LMK's erlauben es über die Belichtungszeitsteuerung und durch den Einsatz von Graufiltern einen sehr großen Dynamikumfang abdecken.
Leuchtdichtemessgeräte arbeiten mit einem Abbildungssystem (Objektiv). Ein Objektiv erzeugt auf Grund seines Aufbaus mehr oder weniger Streu- bzw. Falschlicht. Wenn dieser Umstand die Erfassung der Umfeldleuchtdichte in nicht akzeptablen Umfang verfälschen sollte, muss dafür ersatzweise ein weiteres Leuchtdichtebild mit abgedeckter Blendquelle aufgenommen werden (Abbildung 5).

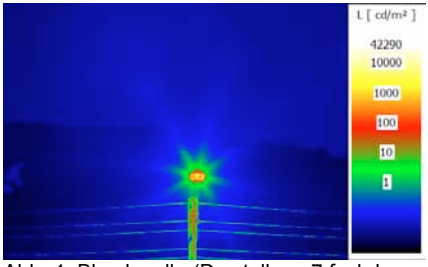


Abb. 4: Blendquelle (Darstellung 7 fach logarithmisch)

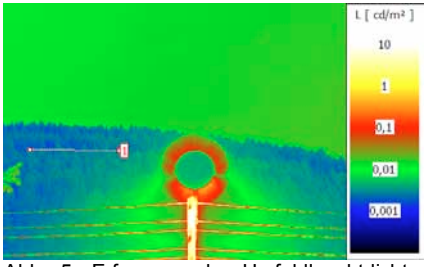


Abb. 5: Erfassung der Umfeldleuchtdichte, Blendquelle abgedeckt, mit Leuchtdichteschnitt zur Darstellung der Auflösung

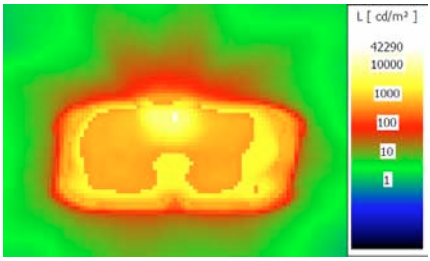


Abb. 6: Blendquelle gezoomte Darstellung

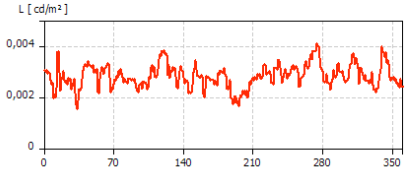


Abb. 7: Darstellung der Leuchtdichten entlang das Schnittes1 in Abb. 5

Bei der Aufnahme sind hinreichend lange Belichtungszeiten zu wählen, damit durch die Modulation der Lichtquellen (50 Hz Wechselstrom oder PWM bei LED-Leuchten) keine Messfehler entstehen (> 20 bis 100 ms sind sinnvoll, Anm. des Autors).
Die Leuchtdichtebilder zur Bestimmung der Leuchtdichten der Blendquellen selbst werden mit langen Brennweiten (50 bis 100mm) erfasst. Dabei muss darauf geachtet den Messbereich richtig einzustellen, damit keine Übersteuerung auftritt. Dazu werden u. a. kalibrierte Vorsatzgraufilter verwendet (bspw. Dichte 3,0 mit Transmissionen von ca. 0,1 %). Die Umfeldleuchtdichte bzw. Adaptationsleuchtdichte (bspw.

mittlere Fahrbahnleuchtdichte) werden zumeist mit einer kürzeren Brennweite erfasst (8 bis 18mm). Die Aussteuerung ist so zu wählen, dass die Umfeldleuchtdichten sicher detektierbar sind (Belichtungszeiten bis 1 s).

5 Ableiten von Blendungskennzahlen aus Leuchtdichtebildern

Die Leuchtdichten $L_{i,j}$ in den Messbildern können je nach Aufgabenstellung klassifiziert (zugeordnet) werden - **geometrisch** - (bspw. zur Umfeldleuchtdichte in einem Feld von 20° gehörend oder die mittlere Fahrbahnleuchtdichte auf einem abgegrenzten Straßenabschnitt) oder – **photometrisch** - (bspw. größer als eine Schwellenleuchtdichte oder größer als ein Mittelwert im Umfeld). Als Ergebnis sind dann Regionen vorhanden, deren Pixel unterschiedliche Bedeutung haben (zur Blendquelle, zum Umfeld, zum Hintergrund, u. v. m. gehörend). Durch die Aufsummierung aller zu den klassifizierten Pixeln gehörenden Raumwinkelelemente $\Delta\Omega_{i,j}$ (bspw. der Blendlichtquelle) ist auch der Raumwinkel der Blendquelle ($\Omega_{Lichtquelle}$) bekannt.

Die so zugeordneten Messdaten können ähnlich, wie bei der Arbeit mit einem Standardleuchtdichtemesser ausgewertet werden, indem man die mittleren Leuchtdichten L_{mittel} der Regionen mit ihren Raumwinkeln $\Omega_{Lichtquelle}$ und ihren Richtungen ϑ_s, φ_s (z.B. Schwerpunkt der Region) nach Gleichung 1 verknüpft.

Eleganter ist die direkte Berechnung für jeden vorhandenen Messwert (Pixel). Mit den Bildverarbeitungsfunktionen in der Auswertungssoftware des LMK's sind diese Verknüpfungen einfach realisierbar und sollen im Folgenden näher erläutert werden.

5.1 Beispiel TI-Wert

Am Folgenden Beispiel, der Bestimmung des TI-Werts (Threshold Increment) nach DIN EN13201-3:2003, soll die Messung von Blendungskennzahlens mit einem LMK näher erläutert werden. Der TI-Wert verknüpft die Schleierleuchtdichte am Auge mit der mittleren Fahrbahnleuchtdichte:

$$TI = \frac{65}{(L_{mittel,Fahrbahn})^{0,8}} \cdot L_S \qquad (4)$$

Die äquivalente Schleierleuchtdichte bewertet die, durch die von der Blendquelle am Auge erzeugten, Beleuchtungsstärken und mit ihrer Beobachtungsrichtung ϑ.

$$L_S = \frac{c \cdot E_{ver}}{\vartheta^n} \qquad (5)$$

Häufig wird n = 2 verwendet / 2// 3/ und die Ermittlung auf einen Bereich außerhalb der direkten Blickrichtung z.B. für $\vartheta > 3°$ beschränkt. Andere Bewertungsfunktionen sind gelegentlich im Einsatz. Prinzipiell ergibt sich die Schleierleuchtdichte aber in der Art:

$$L_S = c \cdot E_{ver} \cdot f(\vartheta) \qquad (6)$$

Die vertikale Beleuchtungsstärke E_{vert} als Messgröße (bspw. bei der Beurteilung der Raumaufhellung) errechnet sich bei horizontaler Ausrichtung des LMK aus der Leuchtdichte und dem Raumwinkel der Lichtquelle, verknüpft mit dem Lichteinfallswinkel. Nach dem photometrischen Grundgesetz gilt:

$$E_{vert} = \sum_{i,j} L(i,j) \cdot \Delta\Omega(i,j) \cdot \cos\vartheta \quad für\ \forall(i,j)\ \text{э}\ Lichtquelle \qquad (7)$$

Damit kann auch die äquivalente Schleierleuchtdichte L_s, in ähnlicher Vorgehensweise, allerdings mit einem anderen Wichtungsbild (Abbildung 8), bestimmt werden.

$$L_S = \sum_{i,j} L(i,j) \cdot \Delta\Omega(i,j) \cdot \frac{\cos\vartheta_{i,j}}{\vartheta_{i,j}^2} \quad für\ \forall(i,j)\ \text{э}\ Lichtquelle\ \ und\ \ \vartheta > 3° \qquad (8)$$

Das bedeutet jeder, einer Blendquelle zugeordneter Leuchtdichtewert, muss mit einem ortsabhängigen Faktor multipliziert werden. Die Ergebnisse sind zu addieren. Diese Faktoren können in einem Wichtungsbild zusammengefasst abgelegt werden. Das vereinfacht diese Multiplikation in nur einer Bildverarbeitungsoperation. Die Zuordnung der Pixel zur Blendquelle erfolgt mit einem Schwellwertstatistikobjekt, d. h. der Vorgabe eines Leuchtdichteschwellwertes, in der Auswertungssoftware (Abbildung 9).

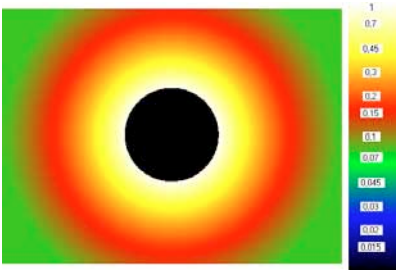


Abb 8: Wichtungsbild für die Schleierleuchtdichte mit Objektiv f= 25mm

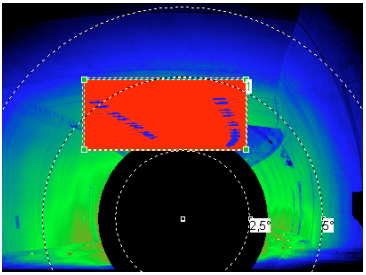


Abb 9: gewichtetes Leuchtdichtebild mit separierten Blendquellen – LS = 0,21 cd/m²

Aus der Schleierleuchtdichte und der mittleren Fahrbahnleuchtdichte kann dann sehr einfach die Schwellwerterhöhung nach EN13201-3:2003 bestimmt werden.

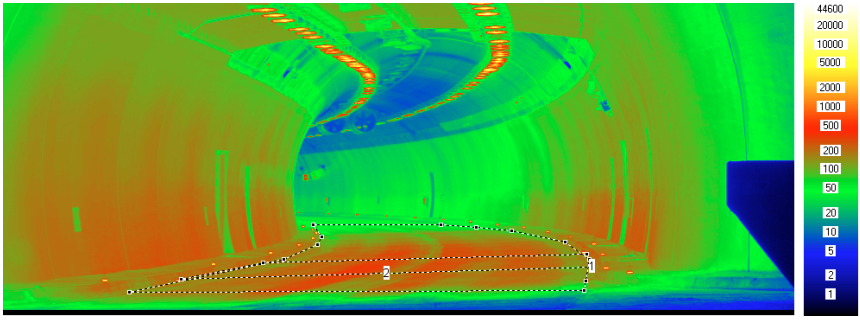


Abb 10: Leuchtdichtebild mit markierten Fahrbahnregionen – mittlere Fahrbahnleuchtdichte
Region 1: L = 188,1 cd/m²; Region 2: L = 226,9 cd/m²

Für die in Abbildung 10 gemessene Tunneleinfahrt ergibt sich:

$$L_S = 0{,}21$$
$$L_{mittel} = 226{,}9 \quad \Rightarrow \quad TI = 17{,}8\% \qquad (9)$$

5.2 Weitere Blendungskennzahlen

Durch die entsprechende Gestaltung der Wichtungsbilder (bspw. $\Delta\Omega(i,j)\cdot\cos\vartheta$ für die Beleuchtungsstärke bei der Raumaufhellung, oder die Verknüpfung mit dem Positionsindex nach IES) sowie weitere Bildverarbeitungsoperationen (bspw. die Multiplikation des Leuchtdichtebildes mit sich selbst ($L_{i;j}$ ²), angewandt bei der Bestimmung von UGR-Werten) lassen sich auch beliebig andere Blendungskennziffern ermitteln oder entwickeln.

6 Fazit

Bei Verwendung von LMK's werden die erforderlichen Informationen (photometrische und geometrische) in den Leuchtdichtebildern erfasst. Der Einsatz unterschiedlicher Sensoren und verschiedener Objektive erlaubt es unterschiedliche Auflösungen zu realisieren. Der Messbereich eines LMK reicht von 10^{-3} cd/m² bis zur Erfassung der Leuchtdichten des Leuchtmittels (bspw. dem sogenannten „Hotspot" in Bogenlampen >> 10^6 cd/m²).
Die Verknüpfung der photometrischen mit den geometrischen Messdaten entsprechend der jeweiligen „Blendungsformel" kann in der Auswertesoftware der LMK's implementiert werden. Der Aufwand für die Datenauswertung ist damit extrem reduziert. Bei geeigneter Gestaltung der Auswertesoftware stehen nach der Bildaufnahme die Blendungskennzahlen unmittelbar zur Verfügung.
Dadurch sind LMK's das geeignete Messsystem für Alle, die auf diesem Gebiet tätig sind (Lichtplaner, Gutachter, Behörden).
Vielfältige Ergebnisse und Erfahrungen aus den Bereichen künstliche Straßenbeleuchtung, Lichtimmissionsbewertung sowie der Anwendung des UGR & DGP Verfahrens liegen vor.

7 Literatur

/ 1/ Hinweise zur Messung und Beurteilung von Lichtimmissionen; Beschluss des Länderausschusses für Immissionsschutz (LAI) vom 10. Mai 2000

/ 2/ Schreuder, D. A.; Straßenbeleuchtung für Sicherheit und Verkehr; Shaker Verlag Aachen 2001

/ 3/ Hentschel, H.-J.: Licht und Beleuchtung, Theorie und Praxis der Lichttechnik; Hüthig Buch Verlag Heidelberg, 5. Auflage 2002

/ 4/ Guide on the Limitation of the Effects of Obtrusive Light from Outdoor Lighting Installations; Publication CIE 150:2003; ISBN 3 901 906 19 3

/ 5/ Schmidt, F.; Krüger, U.; Wolf, St. „Applikationen der ortsaufgelösten Licht- und Farbmessung" Licht 2004, Dortmund 19.9.-22.9.2004

/ 6 / Krüger, U. „Ausgewählte Aspekte der ortsaufgelösten Erfassung stationärer Licht- und Farbverteilungen" Dissertation TU Ilmenau, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2004

/ 7/ Wolf, S.: Entwicklung und Aufbau eines Leuchtdichte-Analysators zur Messung von Blendungskennzahlen Dissertation, Publikationsreihe des Fachgebietes Lichttechnik der TU Ilmenau Nr. 7, Der Andere Verlag Osnabrück 2004, ISBN 3-89959-280-8

/ 8/ Krüger, U.; Schmidt, F.; Wolf, St. „Applications of image resolved light and colour measurement“ Light & Engineering 3/2005, Znack Publishing House Moscow

/ 9/ Schmidt, F.; Krüger, U. „Ortsaufgelöste Licht- und Farbmessung – Technische Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten in der lichttechnischen Praxis“ Tagungsband LUX EUROPA 2005, 10. Europäischer Lichtkongress Berlin, 19.9.- 21.9.2005

/ 10/ Schmidt, F.; Krüger, U.; Porsch, T.; Erfassung von Blendwerten mittels bildauflösender Leuchtdichtemesstechnik¸ LICHT 2006, Bern 10.-13.09.2006, Tagungsband 8 S

/ 11/ Porsch, T.; Schmidt, F.: Blendungsbewertung mit bildauflösender Lichtmesstechnik in Theorie und Praxis, Lux-Junior 2007, Ilmenau

/ 12/ Nechwatal, J. ; Messtechnische Erfassung der lichttechnischen Bewertungsgröße UGR in realen Beleuchtungslösungen unter Feldbedingungen basierend auf der LMK-Mobile-Technologie; Dipl.-Arbeit, TU-Ilmenau, Fak. Maschinenbau 2008

/ 13/ Nechwatal, J. ; Porsch, T. : Messtechnische Erfassung der lichttechnischen Bewertungsgröße UGR in realen Beleuchtungslösungen unter Feldbedingungen basierend auf der LMK-Mobile-Technologie; LICHT 2008, Ilmenau 10.-13-09.2008, Tagungsband S144-149

/ 14/ Empfehlungen für die Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen künstlicher Lichtquellen LiTG-Publ. 12.3 (2011) (ISBN 978-3-927787-35-3)

Messungen von SSL-Lichtquellen in Ulbricht-Kugeln und mit Goniospektralradiometern

Dr. Đenan Konjhodžić
Instrument Systems GmbH, Neumarkter Str. 83, D-81673 München

1 Einleitung

Traditionelle Lichtmesstechnik stützt sich in der Regel auf eine getrennte Betrachtung von Lampe und Leuchte. Diese Trennbarkeit ist bei Solid State Lighting (SSL)-Lichtquellen in den meisten Fällen nicht gegeben, weil z.B. LEDs nicht von einer Leuchte entfernt werden können, ohne ihre Eigenschaften zu ändern. Der IESNA Standard LM-79 empfiehlt eine absolute Messung des Gesamtlichtstroms Φ_v von SSL-Lichtquellen, die entweder mit einer Ulbricht-Kugel oder einem Goniophotometer durchgeführt werden kann. Beide Methoden können in Kombination mit einem Spektralradiometer verwendet werden, was die Messung von allen anderen photometrischen Größen, wie der ähnlichsten Farbtemperatur (CCT) oder des Farbwiedergabeindex (CRI), zur gleichen Zeit erlaubt. Mit einem Goniospektralradiometer ist es also möglich, die räumliche Verteilung aller photometrischen und colorimetrischen Größen zu bestimmen.
Beide Methoden haben ihre Vor- und Nachteile und es gilt zu prüfen, ob es signifikante Unterschiede in den Messergebnissen gibt. Allerdings ist die korrekte photometrische Charakterisierung von SSL-Lichtquellen eine messtechnische Herausforderung, insbesondere, da die entsprechenden nationalen und internationalen Normen noch im Entstehen sind.
Dieses Paper soll die messtechnischen Anforderungen beschreiben, die für genaue photometrische Charakterisierung von SSL-Lichtquellen sowohl mit Ulbricht-Kugeln als auch mit Goniophotometern notwendig sind. Die möglichen Fehlerquellen bei beiden Methoden werden aufgezeigt. Der direkte Vergleich soll anhand von Messungen verschiedener SSL-Lichtquellen erfolgen. Besonderes Augenmerk richtet sich auf den eventuellen Einfluss der Brennlage der LED-Module auf die Messergebnisse.

2 Messungen in einer Ulbricht-Kugel

Für eine schnelle Lichtstrommessung von SSL-Lichtquellen sowie deren weitere optische Charakterisierung (z.B. CCT, CRI) ist eine Ulbricht-Kugel mit einem Spektralradiometer das Instrument der Wahl. Das Messsystem kann leicht für eine direkte Messung des Lichtstroms kalibriert werden. Eine ideale Ulbricht-Kugel enthält keine absorbierenden Oberflächen und eine perfekte Lambertsche Innenfläche, so dass das Licht räumlich und spektral gleichmäßig verteilt wird. Für eine echte Kugel gibt es einige technische Einschränkungen wie z. B. den Einfluss von Nahfeld-Reflexionen und Selbstabsorption, die Alterung der Beschichtung, die Geometrie der Blenden und Probenhalter.
Eine neue Beschichtungslösung für Ulbricht-Kugeln mit einem Reflexionskoeffizienten von ρ=0,94 wurde als optimaler Kompromiss zwischen der Empfindlichkeit der Kugel bezüglich Kontamination und Alterung auf der einen Seite und der Richtungsabhängigkeit auf der anderen Seite gefunden. Anhand von Messungen im Rahmen einer Studie mit einer 1 m Ulbricht-Kugel /1/ konnte gezeigt werden, dass mit diesem Reflexionskoeffizienten genau so präzise Ergebnisse wie mit einem höheren Reflexionsgrad möglich sind, wobei Alterung und Verschmutzungsproblematik jedoch reduziert sind.
In der vorliegenden Studie wurden verschiedene SSL-Lichtquellen mit einer 1,9 m Kugel in zwei verschiedenen Konfigurationen vermessen: hängend bis zur Kugelmitte und stehend auf einem Probentisch, ebenfalls zentriert (Abb. 1). Es handelt sich in beiden Fällen um

eine 4π-Konfiguration, wobei von LM-79 empfohlen wird, dass sich die Leuchte in der Betriebsorientierung befinden soll, wie es in der hängenden Konfiguration der Fall ist.

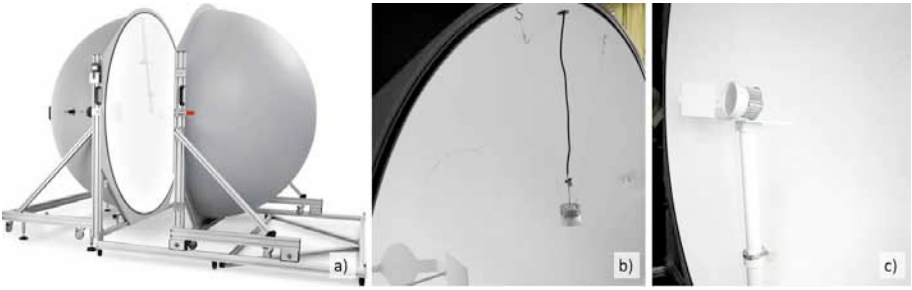


Abb. 1: Eine 1,9 m Ulbricht-Kugel (a) zur Vermessung von SSL-Lichtquellen in hängender Position (b) und auf einem Probentisch (c).

Verschiedene SSL-Lichtquellen zeigen in der Regel unterschiedliche Einbrennverhalten, die vor allem von der Art der Kühlung abhängen. Die Lichtstromänderung ab dem Einschalten der SSL-Lichtquelle bis zu deren stabilem Betrieb wurde für verschiedene SSL-Lichtquellen gemessen und ist in Abb. 2 dargestellt. Es wird deutlich, dass die SSL-Lichtquellen vor der eigentlichen Messung mindestens 30 Minuten stabilisiert werden sollten, wie von IES LM-79-08 empfohlen. In dieser Zeit nimmt der Lichtstrom aller nur durch Luftkonvektion gekühlten SSL-Lichtquellen je nach Typ bis zu fast 10% ab. Nur bei einem LED-Modul, das mit zwei Lüftern gekühlt wird, ist sogar eine leichte Zunahme des Lichtstroms zu verzeichnen.

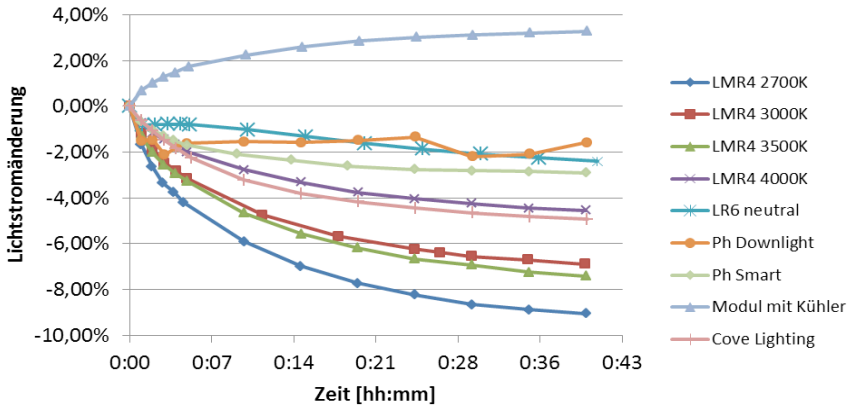


Abb. 2: Lichtstromänderung verschiedener SSL-Lichtquellen nach dem Einschalten gemessen in einer 1,9 m Ulbricht-Kugel.

Der richtige Zeitpunkt der Lichtstrommessung in Abhängigkeit von der Brenndauer ist also eine Fehlerquelle bei der Vermessung von SSL-Lichtquellen mit einer Ulbricht-Kugel. Eine noch größere Fehlerquelle ist die Selbstabsorption der Module, die unterschiedliche Größen und Oberflächenbeschaffenheiten wie auch Farben haben. Die Selbstabsorptions-

korrektur muss vor jeder Messung in genau gleicher Konfiguration wie bei der eigentlichen Messung durchgeführt werden. Beispielhaft sind die Korrekturspektren für drei verschiede SSL-Lichtquellen in beiden Konfigurationen in Abb. 3 dargestellt. Die Selbstabsorption kann für einzelne SSL-Lichtquellen sogar in einer relativ großen 1,9 m Kugel mit bis zu etwa 20% beträchtlich sein. Leichte Änderungen in der Positionierung der Lichtquelle und deren Orientierung können sich auf die Selbstabsorption und dadurch auf das Endergebnis der Messung auswirken.

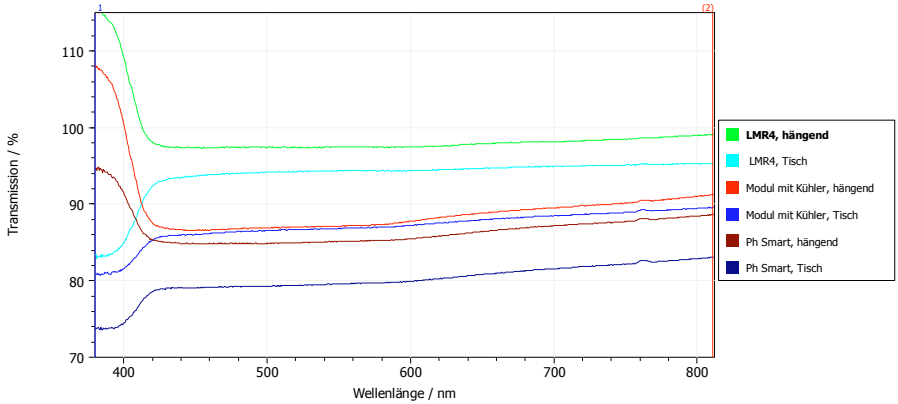


Abb. 3: Selbstabsorptionskurven einiger SSL-Lichtquellen gemessen in einer 1,9 m Ulbricht-Kugel in hängender Position und auf einem Probentisch.

Aus mit Ulbricht-Kugel und Spektralradiometer gemessenen Spektren können neben dem Lichtstrom auch die ähnlichste Farbtemperatur (CCT) und der Farbwidergabeindex (CRI) gleichzeitig bestimmt werden. In der Abb. 4 sind Spektren von vier SSL-Lichtquellen gleichen Typs aber mit verschiedenen Farbtemperaturen dargestellt: 2704K (CRI: 93,4), 3001K (CRI: 83,5), 3466K (CRI: 84,0) und 3966K (CRI: 84,7). Auffallend ist, dass nur das Modul mit CCT von etwa 2700K einen deutlich höheren CRI Index hat, da dieses Modul neben einer warmweißen LED auch eine rote LED beinhaltet, was im gemessenen Spektrum deutlich wird.

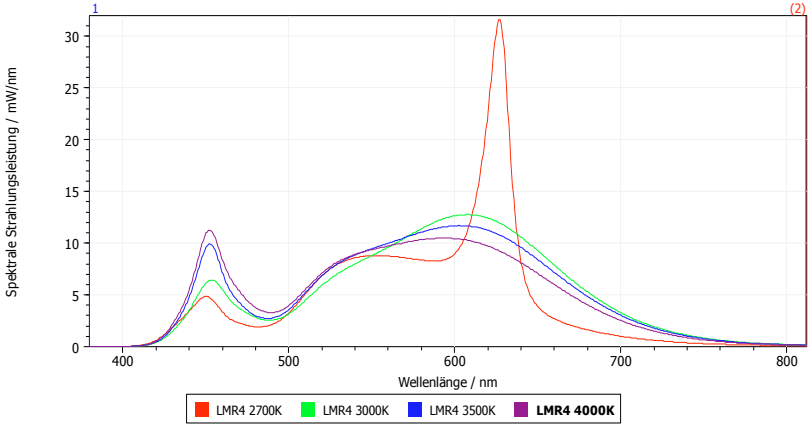


Abb. 4: Spektren von vier SSL-Lichtquellen gleichen Typs aber verschiedener Farbtemperaturen.

3 Messungen mit einem Goniospektralradiometer

Goniophotometer werden normalerweise für die Messung der Lichtstärkeverteilung und des gesamten Lichtstroms mittels Integration eingesetzt. Wenn ein Spektralradiometer anstelle von einem Photometer als Detektor verwendet wird, wird das System Goniospektralradiometer genannt und erlaubt die Bestimmung der räumlichen Verteilung aller relevanten photometrischen und colorimetrischen Größen. Abb. 5 zeigt ein Typ C Goniometersystem (Leuchtenwender), das entweder ein Photometer oder ein Spektralradiometer als Detektor verwendet. Diverse SSL-Lichtquellen wurden an das Goniometer montiert und die Verteilungen aller relevanten photometrischen Größen wurden in Kombination mit einem Spektralradiometer gemessen. Die Einkoppeloptik wurde mit einem Streulichttubus abgeschirmt. Der Abstand zwischen SSL-Lichtquelle und Einkoppeloptik betrug mindestens das 10-fache der längsten Dimension der Quelle. Auch hier wurden die Lichtquellen erst 30 Minuten nach deren Einschalten vermessen, nachdem das thermische Gleichgewicht erreicht wurde.

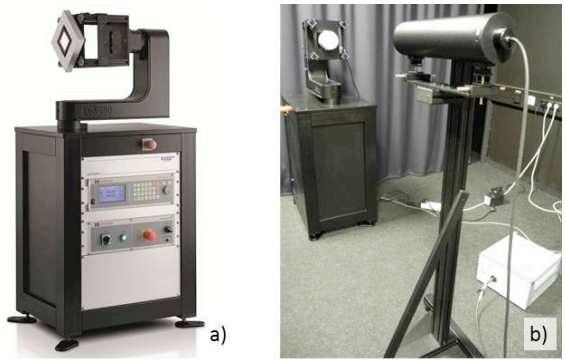


Abb. 5: Ein Leuchtenwender (a) mit dem die verschiedenen SSL-Lichtquellen vermessen wurden als Goniospektralradiometer (b) mit der Einkoppeloptik im Streulichttubus.

LED-Module können sehr verschiedene Abstrahlungscharakteristiken haben, wie in Abb. 6 beispielhaft anhand der Lichtstärkeverteilungen von zwei SSL-Lichtquellen mit verschiedenen Abstrahlwinkeln veranschaulicht. Der Abstrahlwinkel kann als Halbwertsbreite (FWHM) für jedes Profil berechnet werden. Diese Richtungsabhängigkeit kann durch die Verwendung von optischen Systemen wie Reflektoren in den LED-Modulen wesentlich beeinflusst werden.

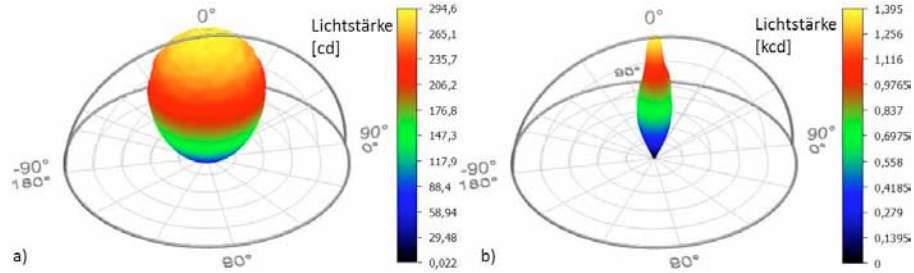


Abb. 6: 3-D Darstellung der Lichtstärkeverteilung einer SSL-Lichtquelle mit 93° (a) und einer mit 29° Abstrahlwinkel (b) gemessen mit einem Goniospektralradiometer.

Die räumliche Verteilung von CRI kann nur mit einem Goniospektralradiometer zusätzlich zu der CCT Verteilung gemessen werden. Abb. 7 zeigt ein Beispiel für die 3-D Darstellung der räumlichen Verteilung von CCT und CRI eines LED-Moduls. Eine leichte Richtungsinhomogenität in der CCT-Verteilung mit einer Variation von bis zu 200K kann festgestellt werden. Der Grund dafür ist vermutlich die Positionierung zusätzlicher roter LEDs neben den weißen LEDs im Modul, mit denen der Farbwidergabeindex auf bis zu 94 erhöht wird. Auch auf diesem hohen Niveau der Farbwiedergabe ist das Goniospektralradiometer in der Lage, feine Strukturen in der räumlichen Verteilung des CRI aufzulösen, wie in auf der rechten Seite der Abb. 7 dargestellt.

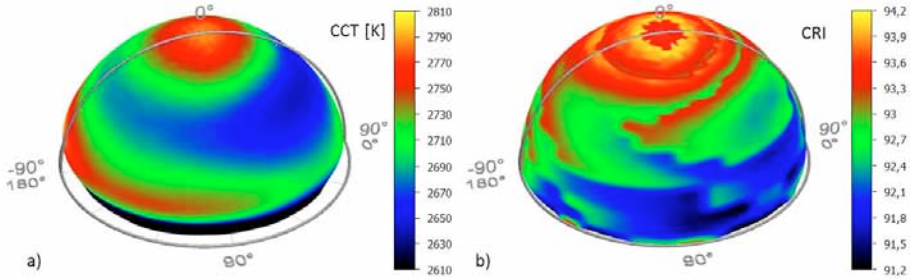


Abb. 7: 3-D Darstellung der CCT- (a) und CRI-Verteilung (b) einer SSL-Lichtquelle gemessen mit einem Goniospektralradiometer.

4 Vergleich der Ergebnisse mit den beiden Instrumenten

Die Ergebnisse der Lichtstrommessungen verschiedener SSL-Lichtquellen mit dem Goniospektralradiometer sind in der Tab. 1 zusammengefasst und werden dort den Ergebnissen gegenübergestellt, die mit Messungen in der Ulbricht-Kugel in hängender Position und auf dem Probentisch gewonnen wurden.

SSL-Lichtquelle	Abstrahl-winkel	Φ_v [lm] GON	Φ_v [lm] ISP hängend		Φ_v [lm] ISP Tisch		CCT [K] hängend	CCT [K] Tisch	CCT [K] Differenz
LMR4 2700K	93°	651,9	643,6	-1,3%	655,5	0,6%	2704	2707	3
LMR4 3000K	97°	672,1	659,0	-1,9%	670,7	-0,2%	3001	3004	3
LMR4 3500K	97°	678,4	667,1	-1,7%	680,9	0,4%	3466	3469	3
LMR4 4000K	97°	656,2	639,1	-2,6%	653,5	-0,4%	3966	3973	7
LR6 neutral	80°	686,5	674,1	-1,8%	682,6	-0,6%	3367	3365	-2
Ph Downlight	29°	424,7	416,2	-2,0%	428,3	0,8%	2730	2728	-2
Ph Smart	52°	1890,0	1854	-1,9%	1910	1,1%	3996	3978	-18
Modul mit Kühler	104°	1168,4	1173	0,4%	1190	1,8%	4015	4015	0
Cove Lighting	112°	268,7	266,2	-0,9%	275,0	2,3%	2712	2706	-6

Tab. 1: Messungen verschiedener SSL-Lichtquellen mit dem Goniospektralradiometer (GON) und in einer 1,9 m Ulbricht-Kugel (ISP) in hängender Position und auf einem Probentisch.

Die Konsistenz der Ergebnisse ist sehr gut, wenn man bedenkt, dass zwei verschiedene Systeme und Kalibrierungen verwendet wurden. Alle Messabweichungen liegen deutlich innerhalb typischer Messunsicherheiten. In der Ulbricht-Kugel in hängender Position

werden tendenziell leicht niedrigere Lichtströme gemessen, die jedoch vielmehr auf die relativ großen Unterschiede in den Selbstabsorptionskorrekturen zurückzuführen sind, als auf den Einfluss der Brennlage der LED-Module. Diese Tendenz gilt sogar für das LED-Modul mit Kühler, das eigentlich von der Brennlage am wenigsten abhängig sein sollte. Da die Module während der Messung im Leuchtenwender ständig ihre Brennlage ändern, die Lichtstromergebnisse jedoch sehr gut mit den Ergebnissen der statischen Messungen in der Ulbricht-Kugel übereinstimmen, kann man behaupten, dass die Vermessung von LED-Modulen lageunabhängig ist, wenn das thermische Gleichgewicht erreicht worden ist.

5 Zusammenfassung

Goniospektralradiometrie ist ein mächtiges Werkzeug, um SSL-Lichtquellen auf LED-Basis zu charakterisieren. Während das Goniophotometer auf schnellere Messungen abzielt, können nur mit einem Goniospektralradiometer alle photometrischen und colorimetrischen Größen wie CRI räumlich aufgelöst werden. Der Lichtstrom wird durch numerische Integration der goniometrischen Scan-Ergebnisse berechnet und ist in sehr guter Übereinstimmung mit Messungen in einer Ulbricht-Kugel. Daher wird, wenn dem Lichtstrom das Hauptinteresse gilt und die gemittelten colorimetrischen Größen ausreichen, die Verwendung einer Ulbricht-Kugel mit Spektralradiometer empfohlen. Vor der Messung sollte die SSL-Lichtquelle jedoch mindestens für 30 Minuten warmlaufen und auch eine Selbstabsorptionskorrektur sollte durchgeführt werden. Ein Goniospektralradiometer ist das Instrument der Wahl für die vollständige Charakterisierung der räumlichen Verteilung aller wichtigen colorimetrischen und photometrischen Eigenschaften.
Anhand von Vergleichsmessungen einiger SSL-Lichtquellen mit dem Goniospektralradiometer und in der Ulbricht-Kugel in hängender Position und auf einem Probentisch konnte gezeigt werden, dass die Brennlage der LED-Module während der Messung keinen wesentlichen Einfluss auf die Messergebisse hat.

/1/ D. Konjhodzic, Tagungsband zur 19. Gemeinschaftstagung Licht 2010, Wien, S330.

Analyse der goniophotometrischen LED - Leuchtenlichtmesstechnik-Verfahren, Vergleichsmessungen, Messunsicherheitsbestimmung

Dipl.-Ing. D. Gläser, M.Sc. S. Schaller (VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut GmbH/Offenbach), Dipl.-Ing. A. Groh, M.Sc. H. Ganev, Prof. Tran Quoc Khanh (TU Darmtadt)

1. Performance Quality Label für LED Leuchten

Das Ziel des PQL-Projektes besteht darin, normative Grundlagen für die Kriterien eines Performance Quality Labels (PQL) für LED-Leuchten zu erarbeiten. Unter dem PQL wird ein Qualitäts- und Energielabel verstanden, das für LED-Produkte auf Grundlage der aktuellen und sich entwickelnden Normensituation erarbeitet werden soll. Durch das Bestimmen der für eine in jeglicher Hinsicht gute Produktqualität erforderlichen Faktoren, soll ein Katalog von Mindestanforderungen für LED-Leuchten entwickelt werden. Auf Basis dieses Kataloges erhalten LED-Produkte je nach Erfüllen der Anforderungen ein Gütesiegel, das auf der einen Seite den privaten und industriellen Anwendern die Kaufentscheidung durch eine erhöhte und standardisierte Transparenz erleichtern soll. Auf der anderen Seite erhöht dies die Lichtqualität, steigert die Energieeffizienz und sichert die Kompetenz und Zukunftsfähigkeit der mittelständisch geprägten Leuchtenindustrie im internationalen Wettbewerb.

1.1 Durchführung und Organisation der Vergleichstests

Das VDE-Institut übernimmt die Organisation, Durchführung und Auswertung als neutrale und unabhängige Referenzstelle und wird durch die TU Darmstadt als koordinierende Instanz dabei unterstützt. Die Tests von den LED-Leuchten finden unter definierten Messbedingungen statt (siehe 2.2). Die Messunsicherheiten der Lichtlabore der TU Darmstadt, von VDE mit den Lichtlaboren der 13 beteiligten Firmen werden wissenschaftlich und technisch analysiert. Das VDE Lichtmesslabor wird als Referenzlabor arbeiten. Nach Durchführung der Vergleichsmessungen wird eine Empfehlung zur Verbesserung der Lichtmesstechnik ausgearbeitet und ein Workshop darüber mit den Firmen und interessierten Institutionen organisiert.

2. Vergleichstests

Jeder teilnehmende Leuchtenhersteller lieferte 3 LED-Leuchten aus eigener Produktion, die vor der Lieferung im eigenen Lichtlabor gemessen und dokumentiert wurden (Messgerät, wie Genauigkeit, Winkelauflösung, Versorgungsgerät für DC-und AC-Betrieb, elektrische Kenngrößen wie Leistung, Blindleistung oder COS (φ). Die Lieferung der Firmen an den VDE erfolgte durch besondere Postwege oder Handgepäck. Gemeinsam mit der TU Darmstadt wurden die Leuchten vor den Messungen untersucht. Im VDE werden die Leuchten mit einem Drehspiegel-Goniophotometer vermessen und danach werden die Testobjekte vorzugsweise mit eigenem Transportmittel nach Darmstadt zur TU gebracht. Die Vergleichsmessungen werden dann mit einem Leuchtenwender und, wenn es die Leuchtengröße erlaubt, mit einem neuartigen Nahfeldgoniophotmeter durchgeführt.

Die Messergebnisse werden zwischen der TU Darmstadt und dem VDE Institut Offenbach regelmäßig ausgetauscht, verglichen und neutral dokumentiert. Die Information aller involvierten Leuchtenfirmen erfolgt in einer Periode von 6 Monaten.

2.1. Leuchtenarten

Für den Vergleichstest wurden Leuchten für verschiedene Einsatzgebiete ausgewählt. Jede Leuchte wird dreimal gemessen. Es werden EULUMDAT-Dateien für jede Leuchte erzeugt.

Firma	Anbauleuchte	Einbauleuchte	Einbaudownlight	Pendelleuchte	Strahler	Mastansatzleuchte / Straßenleuchte	Pollerleuchte	Tischleuchte / AP-Leuchte	Stehleuchte
Summe	**3**	**2**	**2**	**0**	**2**	**8**	**1**	**2**	**2**
1	1								
2					1				
3						1			
						1			
							1		
						1			
						1			
4						1			
5						1			
6		1							
						1			
7			1						
	1								
8								1	
								1	
					1				
									1
9									
	1								
		1							
									1
10									
			1			1			
11						1			
12						1			

Tab. 1 Leuchtenübersicht

2.2 Rahmenbedingungen für das Vermessen der Leuchten im PQL-Projekt

Damit die Messdaten untereinander vergleichbar werden, mussten Messbedingungen festgelegt werden. Mit dem Ziel, Zeit und Kostenaufwand für die Messungen gering zu halten wurden folgende Kriterien definiert:

Begriff	Wert
Lichttechnische Messungen	
Einbrennzeit der Leuchte vor der Messung	250 Stunden vor der Messung die Leuchten einbrennen. Umgebungsbedingungen T=20°C-30°C, Raumfeuchtigkeit RH=20-85%.
Datenformat	Eulumdat
Messsystem	C-Ebene und γ-Winkel
C-Ebenen	72 (5° Schritt)
Höhenwinkel γ	72 (2,5° Schritt)
Lichtstärke	cd/klm
Lichtstrom	lumen
Stabilisierungszeit vor der Messung	1 Stunde (Falls die Leuchte längere Zeit braucht, bitte diese Zeit extra angeben)
LVK-Ausrichtung auf Maximum	keine
Glättung	keine
Symmetrierung der LVK	keine
Messunsicherheit	in %
Umgebungstemperatur während der Messung	25° ±1°C, falls abweichend, Wert angeben
Typ des Messgeräts nach DIN 5032	Nah- oder Fernfeldgonio, Leuchtenwender, Brennlage des Messobjekts im Raum
Photometer f1-Fehler	in %
Letzte Kalibrierung des Messgeräts	Datum
Zertifizierung des Messlabors	Ja/Nein, wenn Ja von wem und seit wann
Leuchtenlebensdauer	Herstellerangebe bis Erreichen des 70% vom Lichtstromneuwert in Stunden (rechnerisch ermittelt). Angewandtes Verfahren angeben.
Lichtstromwartungsfaktor	
Farbmessungen	
Spektrum der Leuchte	C0/γ0
Farbwiedergabe (CRI)	C0/γ0
Ähnlichste Farbtemperatur	In Kelvin
Farbkoordinaten	CIE 1931 x,y - Koordinaten
Elektrische Messungen	
Leuchtenspannung	Wert in Volt (AC bzw. DC). Primärspannung immer 230V. Sollte ein LED-Konverter benutzt werden, muss dieser zur Verfügung gestellt werden
Leuchtenstrom	Wert in Ampere.
Leistung	Wert in Watt
Leistungsfaktor	Wirkleistung/Scheinleistung

Leistungsmessgerät	Hersteller und Typ des Geräts
Spannungsquelle	Hersteller, Typ,
Letzte Kalibrierung der Geräte	Datum
Temperaturmessungen	
Messung auf der Platine	Temperatur am Solderpoint. Dieser soll vom Hersteller gekennzeichnet werden. Das Anbringen von Messsonden wird am FGLT erfolgen
Messung auf dem Betriebsgerät (EVG)	Tcp soll auch vom Hersteller angegeben werden. Das Anbringen von Messsonden wird am FGLT erfolgen.

Tab. 2 Messbedingungen und Messwerte

3. Messsysteme

3.1 Drehspiegel-Goniophotometer

Das Goniophotometer mit Drehspiegel zeichnet sich dadurch aus, dass Lichtquellen während der Messung in der vorgegebenen Brennlage betrieben werden. Lampen, Leuchten und Scheinwerfer aller Art können mit hoher Genauigkeit gemessen werden. Die stabile Mechanik des Leuchten- und Spiegeldreharm und die Verwendung eines Spezialgetriebes gewährleistet, dass die Leuchtendrehachse in gleichbleibender Position um die Spiegelachse bewegt wird. Die Leuchtendrehachse kann für hängende oder stehende Brennlage um 180°geschwenkt werden. Messobjekte mit maximalen Abmessungen von 2000 mm und 50 kg Können vermessen werden. Die Stromzuführungen und Messleitungen sind in das Goniometer integriert und über Präzisionsschleifringkörper mit der Lichtquelle verbunden. Durch kontinuierliche Drehung des Messobjektes werden ruck- und schwingungsfreie Messungen mit kurzen Messdauern ermöglicht. Als sehr ebener Spiegel, mit nach BSI- und CEN-Normen vermessenen Abweichungen im Reflexionsgrad, wird verwendet. Ein Photometer der Genauigkeitsklasse L nach DIN 5032 Teil 7 einschließlich der Spiegeleigenschaften ist Teil des Messsystems. Die Kalibrierung des Drehspiegel-Goniophotometers erfolgte als Lichtstromkalibrierung mit Lichtstromnormallampen.
Als Spannungsversorgung wurde ein Chroma, Modell 6410 (150-300 V, 45-500Hz, 1500VA) verwendet, welches zusammen mit einem Powermeter Typ Yokogawa WT 410 in einem 19“ Schrank untergebracht ist.

3.2 Leuchtenwender-Goniophotometer

Das Goniophotometer mit Leuchtenwender zeichnet sich dadurch aus, dass durch Rotation der Lichtquelle während der Messung in der horizontalen und der vertikalen Achse die Leuchten nicht in Betriebslage vermessen werden können. Hoch präzise Messungen sind nur mit Leuchten möglich, deren Lichtstrom unabhängig von der Brennlage ist. Die stabile Mechanik mit horizontaler und vertikaler Drehachse kann Messobjekte mit maximalen Abmessungen von 1900 mm und 50 kg ausnehmen. Stromzuführung und Messleitungen sind in das Goniometer integriert. Ein Photometer der Genauigkeitsklasse L nach DIN 5032 Teil 7

ist Teil des Messsystems. Die Kalibrierung des Leuchtenwender-Goniophotometers erfolgte als Lichtstärkekalibrierung mit einer Lichtstärkennormallampe Wi41G.
Als Spannungsversorgung dient eine Spannungsquelle des Herstellers HBS Elektronik GmbH, Model: ACS – 0800-PS (0-300VAC / 0-425VDC, 0-1kHz, 0-6A) verwendet, die Messung der elektrischen Parameter wurde mit einem Leistungsmessgerät ZES Zimmer, Modell LMG – 2-Kanäle durchgeführt.

4. Bisherige Ergebnisse der Vergleichsmessungen

4.1 Bisherige Messergebnisse

Bisher wurden drei Innenleuchten lichttechnisch vermessen. Die Ergebnisse sind in Tab. 3 dargestellt.

		Lichtstrom [lm]	Spannung [V]	Strom [A]	Leistung [W]	Powerfaktor	Lichtausbeute [lm/W]
Leuchtenwender - Goniophotometer	E_2_1	701	230,00	0,168	17,9	0,46	39,2
	E_2_2	694	230,00	0,169	18,0	0,46	38,6
	E_2_3	699	230,00	0,169	18,1	0,46	38,6
	F_3_1	354	230,00	0,080	5,9	0,31	60,0
	F_3_2	359	230,00	0,089	6,5	0,31	55,2
	F_3_3	349	230,00	0,088	6,4	0,32	54,5
	H_1_1	1773	230,00	0,164	35,6	0,94	49,8
	H_1_2	1676	230,00	0,144	30,8	0,93	54,4
	H_1_3	1677	230,00	0,148	31,7	0,93	52,9
Drehspiegel-Goniophotometer	E_2_1	813	229,97	0,166	17,9	0,47	45,4
	E_2_2	685	229,98	0,167	18,0	0,47	38,1
	E_2_3	696	229,97	0,167	18,0	0,47	38,7
	F_3_1	337	229,99	0,085	6,3	0,32	53,5
	F_3_2	345	230,00	0,088	6,5	0,32	53,1
	F_3_3	333	230,00	0,086	6,4	0,32	52,0
	H_1_1	1721	229,88	0,164	35,8	0,94	48,1
	H_1_2	1651	229,93	0,149	31,8	0,93	51,9
	H_1_3	1635	229,92	0,146	31,1	0,93	52,6

Tab. 3 Auswertung der Messergebnisse

4.2 Bisherige Auswertung

Die Auswertungen der vorläufigen Ergebnisse zeigen, dass nur bei einigen Messungen sehr starke Abweichungen gemessen wurden. Die Ursachen dazu werden derzeit noch untersucht.

Leuchten-wender	Lichtstrom in lm	Drehspiegel	Lichtstrom in lm
E_2_1	701	E_2_1	813
E_2_2	694	E_2_2	685
E_2_3	699	E_2_3	696
F_3_1	354	F_3_1	337
F_3_2	359	F_3_2	345
F_3_3	349	F_3_3	333
H_1_1	1.773	H_1_1	1.721
H_1_2	1.676	H_1_2	1.651
H_1_3	1.677	H_1_3	1.635

Tab. 4 Auswertung Lichtstrom

Leuchte	Lichtstrom $f_{(F)}$ *in %*	Lichtausbeute $f_{(h)}$ in %
E_2_1	-13,8	-16,0
E_2_2	1,3	1,3
E_2_3	0,4	-0,1
F_3_1	5,0	10,8
F_3_2	4,1	3,9
F_3_3	4,8	4,6
H_1_1	3,0	3,5
H_1_2	1,5	4,6
H_1_3	2,6	0,6

Tab. 5 Abweichungen Lichtströme und Lichtausbeute

5. Ausblick

Die goniophotometrischen Leuchtenmessungen erfolgen mit drei verschiedenen Goniophotometern, bisher wurden gerade in den Laboren der Leuchtenhersteller in den seltensten Fällen Fehleranalysen durchgeführt. Mit diesen Messungen wird ein umfassender und systematischer Vergleich der Messgenauigkeit der Goniophotometrie mit verschiedenen Goniophotometertypen in unterschiedlichen Lichtlaboren durchgeführt. Die wissenschaftlichen und technischen Analysen der Messunsicherheit der Goniophotometrie sowie der Ursachen über die verschiedenen Qualitäten der gemessenen LED-Leuchten ist dabei zentrales Thema. Die Messergebnisse werden mit den jeweiligen Leuchtenfirmen bilateral diskutiert, im Sinne der Entwicklung von qualitativ hochwertigen Leuchten „Made in Germany“. Dabei wird die Messunsicherheit der Lichtlabore der TU Darmstadt, des VDE Institutes mit den Lichtlaboren der 13 beteiligten Firmen verglichen. Innerhalb der ZVEI-

Arbeitsgruppen werden wir die Ergebnisse neutral kommunizieren und Verbesserungen anregen.

Literaturhinweise:

1. Ausführliche Beschreibung zum Forschungsauftrag PQL (2010)

Anwendung von modifizierten Farbmesskameras für photometrische Messungen im mesopischen Bereich

Udo Krüger, Franz Schmidt

TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, W.-v.-Siemens-Str. 5, 98693 Ilmenau
eMail: udo.krueger@technoteam.de

1 Einleitung

Mit CIE81-1989 /1/ stellte die CIE einen Bericht zur Verfügung, der eine Vielzahl von Modellen für die verschiedensten Einsatzfälle im mesopischen Leuchtdichtebereich enthält. Dabei wurde klargestellt, dass es nicht eine Methode geben kann, um eine Bewertung von Szenen vorzunehmen, sondern die Methode auf der Basis der Aufgabenstellung ausgewählt werden muss. In den letzten beiden Jahren wurden von der CIE zwei weitere Reports veröffentlicht /2//3/, die sich der mesopischen Modellierung widmen und aufgabenspezifische Modelle vorschlagen, die auf der Basis umfangreicher Untersuchungen entstanden sind.

2 Photometrie

Die Erfassung einer Szene mit ortsauflösenden Leuchtdichtekameras /4/ ist derzeit bei vielen Anwendungen schon Stand der Technik. Dabei wird in der Regel mit Hilfe eines Vollfilters die spektrale Empfindlichkeit des Gesamtsystems (bestehend aus Objektiv, Anpassungsfilter und Sensor) auf die spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges für das Tagsehen (2°-Normalbeobachter; $V(\lambda)$) angepasst /5/. Man erhält dabei, mit kalibrierten und rückgeführten Geräten, Leuchtdichtebilder, bei denen die einzelnen Pixel Leuchtdichtewerte in cd/m² enthalten.
Diese Systeme können mit weiteren Filtern erweitert werden, sodass auch Bilder mit Farbinformationen (spektrale Anpassung entsprechend 2°-Normalbeobachter, /6/) und Bilder mit skotopisch angepasster spektraler Empfindlichkeit ($V'(\lambda)$; /7/) erstellt werden können.
Dabei ist zu beachten, dass die Leuchtdichte und die weiteren definierten Größen eine reine messtechnische Größe darstellen. Es handelt sich hier jeweils um das Integral der bewerteten spektralen Strahldichte mit verschiedenen Bewertungsfunktionen. Eine Verbindung zu wahrnehmungsphysiologischen Größen wie Helligkeit, Erkennbarkeit, Kontrasten oder Reaktionszeiten kann in der Regel nicht direkt angegeben werden und unterliegt starken Abhängigkeiten von weiteren Größen wie Adaptation, Sehwinkel u.v.m. (siehe u.a. /8/ und /9/).
Weiterhin ist anzumerken, dass sich die Einheit der verwendeten Größen bei Änderung der Wichtungsfunktion nicht verändert. Es gibt keine skotopischen oder mesopischen cd/m² oder gar mesopische lm o.ä.! Durch die Beschreibung der Messgröße (Symbol oder Erläuterung) muss die verwendete Wichtungsfunktion daher deutlich zum Ausdruck gebracht werden. Bestimmte Messgrößen ergeben aber auch wahrnehmungsphysiologisch keinen Sinn (z.B. mesopischer Lichtstrom [lm]) und sind daher nicht anzugeben /10/.
Weiterhin wird in einigen Modellen (z.B. von Kokoschka) der 10°-Normalbeobachter /11/ verwendet, für den es aber kein photometrisches Äquivalent gibt, d.h. dieser Beobachter kann in der Regel nicht für photometrische Messungen verwendet werden /12/. Da es auf Grund der Verteilung von Zapfen und Stäbchen auf der Netzhaut jedoch zu Unterschieden in der spektralen Empfindlichkeit des Auges und somit auch in den abhängigen wahrnehmungsphysiologischen Größen kommt /9/ sollte der Unterschied zwischen den 2°- und 10°- Normalbeobachtern ggf. mit Hilfe spektraler Korrekturfaktoren berücksichtigt werden (SMCF, /13/).

In Zukunft könnte auch der Ort des Reizes eine immer größere Rolle /9/ spielen und somit Geräte erfordern, die nicht nur die Leuchtdichte und Farbbilder zur Verfügung stellen sondern auch den Ort der Reize. Hierzu sind dann Leuchtdichte- und Farbmesskameras vom Type II einzusetzen, die neben der photometrischen Kalibrierung auch eine geometrische Kalibrierung mitbringen /4/.

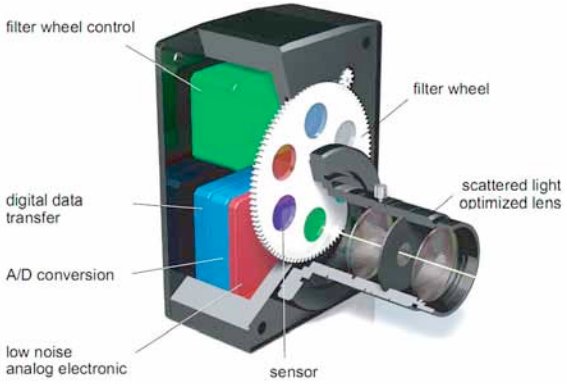


Abb. 1: Schematische Zeichnung einer Farbkamera mit Filterrad

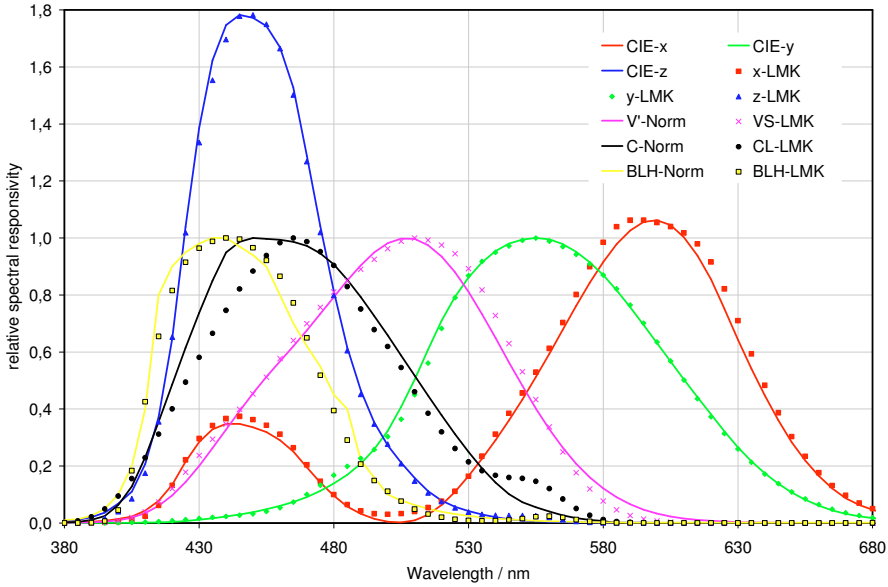


Abb. 2: Zusammenfassung der derzeit realisierten spektralen Empfindlichkeiten (Vergleich von Soll- und Ist-Funktion) für das Filterradsystem aus Abb. 1

Die Modelle aus /3/ sind in der Regel für die Bestimmung äquivalenter Leuchtdichten nicht geeignet, da hier zwar eine Entscheidung der Art Heller/Dunkler getroffen werden kann aber keine Skala zur Verfügung steht, d.h. man kann nicht entscheiden ob ein Objekt dop-

pelt so hell wie ein anderes ist. Daher werden für die messtechnische Realisierung wohl die Modelle aus /2/ bevorzugt werden, obwohl bei der Verwendung des Begriffes äquivalente Leuchtdichte stehst Erklärungsbedarf bestehen wird, um dem Anwender zu erläutern, dass dies nicht in Bezug auf die Helligkeit gemeint ist.

2.1 Realisierte Systeme

Mit den, vorwiegend im Bereich von Universitäten, im Einsatz befindlichen Farbkamerasystemen mit zusätzlichen **skotopischen** Filtern, ist es also möglich neben einem Leuchtdichte/Farbbild auch ein Bild mit skotopischer spektraler Wichtung $V'(\lambda)$ der Szene zu erfassen.

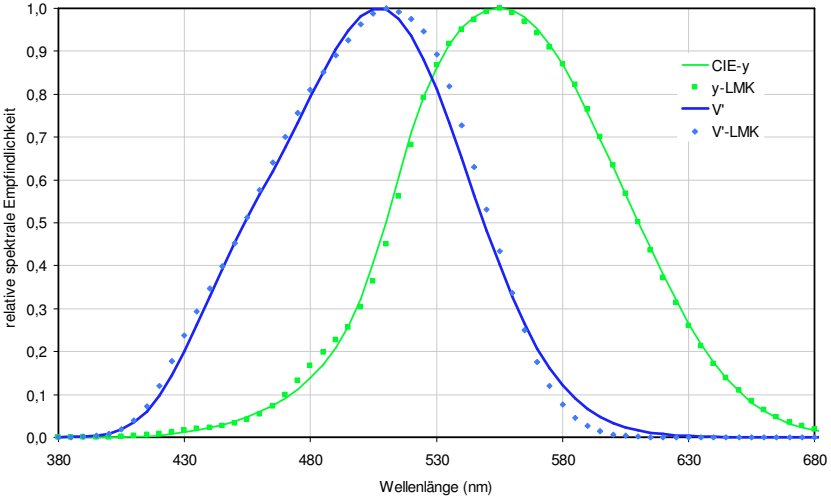


Abb. 3: Unterschied zwischen realisierter (Einzelpunkte) und vorgegebener (durchgezogene Linien) spektraler Empfindlichkeit für das photopische und skotopische Filter einer Filterradkamera

2.2 Vorgehen bei der Messung

Für die Messung der mesopischen Größen sind Geräte erforderlich, mit denen auf die verschiedenen Aspekte der Modellierung eingegangen werden kann:

1. Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte
2. Bestimmung der Farbwerte (je nach Modell)
3. Bestimmung photopischer und skotopischer Leuchtdichten
4. Berechnung eines mesopischen Leuchtdichtebildes mit äquivalenten Leuchtdichten

Wie die Adaptationsleuchtdichte inhomogener Szenen bestimmt werden muss ist derzeit noch stark umstritten. Es wird sich jedoch allgemein gesprochen um eine örtlich gewichtete Leuchtdichte handeln, die aus dem Y-Kanal des Farbbildes bzw. aus dem Leuchtdichtebild bestimmt werden kann. Für erste praktische Messungen könnte man auf Größen wie L_{20} oder die Augenbeleuchtungsstärke zurückgreifen. Mit Hilfe der Modellparameter, die neben der Adaptationsleuchtdichte ggf. noch vom Blickwinkel des Betrachters (bzw. von der Winkeldifferenz zwischen Betrachterblickwinkel und Objektwinkel) oder den jeweiligen Leuchtdichte- und Farbwerten abhängen, können dann mesopische Leuchtdichtebilder für die verschiedenen Anwendungen bestimmt werden.

3 Beispiel

Am Beispiel der Bewertung einer Straßenszene (Nebenstraße in Ilmenau) mit Hilfe des Models aus /2/, das schon in /14/ vorgestellt wurde, wird dieses Vorgehen erläutert.

Abb. 4: Leuchtdichtebild (photopisch) mit L_{20}-Kreis zur Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte (lineare Skalierung)

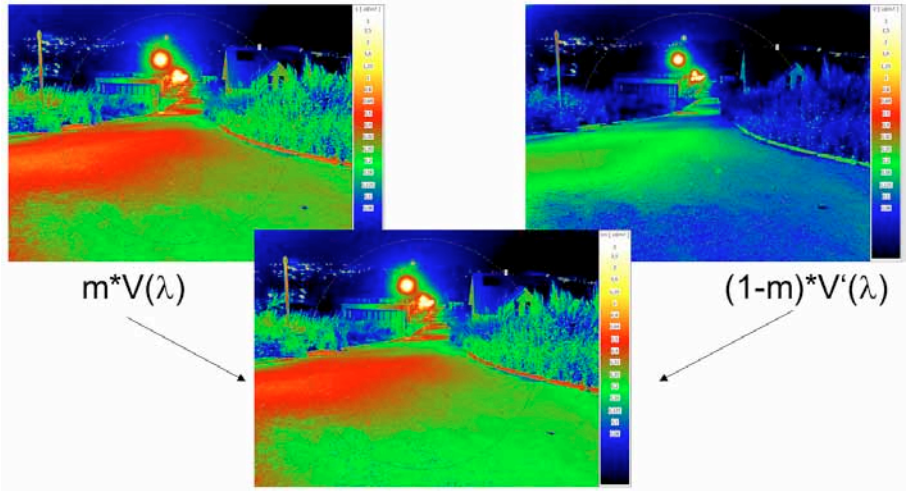


Abb. 5: Zusammenfassung des photopischen (links oben) Leuchtdichtebildes und des skotopischen (rechts oben) Leuchtdichtebildes zum Bild mit der äquivalenten mesopischen Leuchtdichte entsprechend des verwendeten Modells. (Alle Bilder dieser Abbildung mit logarithmischer Skalierung.)

Mit den Eingangsgrößen L_{20}=0,67 cd/m² und L'_{20}=0,33 cd/m² wurde das S/P Verhältnis zu 0,49 bestimmt und damit der Modellparameter m zu 0,69. Es ist anzumerken, dass diese Berechnung auf Grund der nicht vorhandenen Orts- oder Richtungsabhängigkeit gewählten Models nur einmal für das Bild ausgeführt werden muss und dann das ganze Bild mit der äquivalenten Leuchtdichte bestimmt werden kann. Das dies für den Bereich der Fovea nicht zutreffen wird, ist schon in /2/ vermerkt.

Mit der modifizierten Farbmesskamera können nicht nur mesopische Leuchtdichten entsprechend eines Modells ermittelt werden, sondern es können mit Hilfe der zu Grunde liegenden Messdaten (Farbbild, skotopisches Leuchtdichtebild, Winkelzuordnung der Pixel) die Werte nach verschiedenen Modellen bestimmt werden. Die Messung geht dabei sehr schnell (wenige Minuten) und die Auswertung kann im Labor erfolgen, wobei durch die erfasste Bildinformation die Zuordnung der Auswertebereiche zur Szene jederzeit kontrolliert werden kann.

4 Ausblick

Die genaue messtechnische Umsetzung des Modells aus /2/ wird derzeit in CIE TC 2-65 „Photometric Measurements in the Mesopic Range“ unter Leitung von Teresa Goodman diskutiert.
Die Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte inhomogener Szenen, des entscheidenden Parameters für die Modellanwendung, ist Inhalt des JTC 001 „Implementation of the CIE 191:2010 Mesopic Photometry in Outdoor Lighting“ unter Leitung von Liisa Halonen.
Aus messtechnischer Sicht sind entsprechend modifizierte Farbmesskameras bei mehreren Instituten im Einsatz und werden für die Validierung und die Entwicklung von neuen Modellen aktiv eingesetzt, wobei die Modellierung meist über externe Software erfolgt, die direkt auf die Kamerasteuerung zugreifen kann. In Zukunft ist die Implementierung wichtiger Modelle direkt in der Software der Kameraansteuerung geplant, um die Auswertung auch einem breiteren Benutzerkreis zugänglich zu machen.

Referenzen:

/1/ CIE Technical Report, Mesopic Photometry: History, Special Problems and Applications. Publ. CIE 81-1989, 1989
/2/ CIE Technical Report, Recommended System for Mesopic Photometry based on Visual Performance. Publ. CIE 191-2010, 2010
/3/ CIE Technical Report, CIE Supplementary System of Photometry. Publ. CIE 200-2011, 2011
/4/ CIE Characterization of Imaging Luminance Measurement Devices (ILMD). Draft 1.5, Div. 2, TC2-59, 2011
/5/ CIE, 6e Session, 1924, Commission Internationale de l’Éclairage Compte Rendu des Séances, Cambridge University Press, pp. 67-70, 1926
/6/ CIE Technical Report, Colorimetry, Publ. CIE 15.2-1986, 1986
/7/ CIE: Compte Rendu. 12th Session, Stockholm V3, pp. 32-40, CIE Central Bureau Vienna, 1951
/8/ Schierz, Ch.: Wie wird Leuchtdichte subjektiv als Helligkeit wahrgenommen? LuxJunior, Dörnfeld bei Ilmenau, 2007
/9/ Raphael, S.: Characterization of mesopic vision for luminance Photometry. Diss., Universität Paderborn, 2010
/10/ Goodman, T: The mesopic lumen: fact or fiction? Proceedings of the 27th Session of the CIE, SunCity / South Africa, pp. 192-196, 2011
/11/ CIE: 10 Degree Photopic Photometric Observer. CIE 165:2005, 2005
/12/ CIE: Proceedings of the CIE 15th session, Vienna, Vol. A, 1963, CIE, 1964
/13/ CIE DS 023/E:2012: Characterization of the Performance of Illuminance Meters and Luminance Meters, Commission Internationale de L'Eclairage, 2012
/14/ Krüger, U. and Bieske, K.: Combining imaging measurement results for vision evaluation in the field of mesopic vision and colour evaluation. 2nd CIE Expert Symposium on Appearance. Gent, 2010

Spektroradiometrisches Verfahren zur Messung der Lichtstärkeverteilung von LED-Leuchten

Dipl.-Ing. Silvia Bensel, Prof. Dr.-Ing. Stephan Völker, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik, Einsteinufer 19, 10587 Berlin

1 Problemstellung

Mit einer voranschreitenden Entwicklung von Hochleistungs-Leuchtdioden wächst der Bedarf an einer exakten wissenschaftlichen Beschreibung technischer Gütemerkmale von LEDs. Dies sind insbesondere photometrische, elektrische sowie thermische Größen zur Charakterisierung der LEDs.
Etablierte Verfahren zur Photometrie von Lampen und Leuchten basieren in der Regel auf Silizium-Photodioden, die mittels Voll- oder Partialfilter spektral an die V(λ)-Kurve angepasst werden. Je nach Anpassungsgüte entstehen dabei mehr oder weniger große Fehlbewertungen. Bei besonders schmalbandigen Lichtquellen, z. B. blauen LEDs, kann der gemessene Wert weit über 15 % vom tatsächlichen Wert abweichen /1/. Bei Spektroradiometern erfolgt die spektrale Anpassung mathematisch durch eine Multiplikation der Spektralverteilung mit der V(λ)-Funktion, Messwertabweichungen durch spektrale Fehlanpassungen werden so vermieden.
Traditionell werden Lampen und Leuchten getrennt voneinander photometriert. Für die Messung von Lampen werden beispielsweise Ulbrichtkugeln verwendet. Von besonderem Interesse sind der Lichtstroms, die ähnlichstes Farbtemperatur sowie die Farbwiedergabe. Für die Messung von Lichtstärkeverteilungen und zur Bestimmung von Leuchtenbetriebswirkungsgraden werden bisher goniophotometrische Verfahren verwendet. Bei LED-Leuchten mit fest eingebautem Leuchtmittel ist eine getrennte Messung von Lampe und Leuchte nicht möglich.

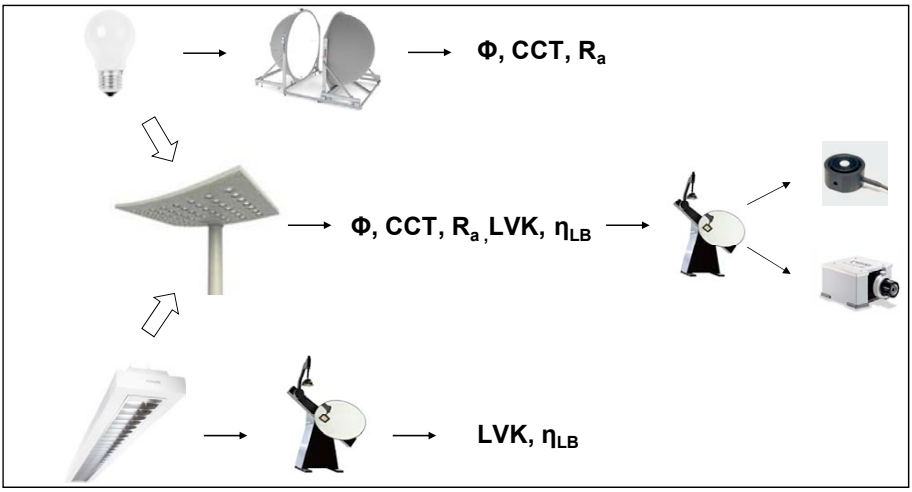


Abb. 1: Photometrie von LED-Leuchten

Daher wird im Zuge der Untersuchung ein zentrisches Drehspiegelsystem mit spektroradiometrischem Empfänger getestet, welches eine simultane Messung

photometrischer und colorimetrischer Daten sämtlicher LED-Systeme erlaubt. Besonders schmalbandige LED-Lichtquellen können zudem spektral gemessen werden.

2 Stand der Technik und Normung

2.1 Stand der Technik

Die Lichtstärkeverteilung von Leuchten wird aus der winkelabhängigen Messung der Lichtstärke bestimmt. Zum einen kann außerhalb der photometrischen Grenzentfernung die Beleuchtungsstärke ermittelt werden, da diese bei einer sogenannten Fernfeldmessung, das heißt unter Annahme einer punktförmigen Lichtquelle, proportional zur Lichtstärke ist. Zum anderen kann die Lichtstärke durch eine Nahfeldmessung der örtlichen Leuchtdichteverteilung der leuchtenden Fläche einer Leuchte innerhalb der photometrischen Grenzentfernung bestimmt werden /2/. Bei der Nahfeldmessung wird mit einer Leuchtdichtemesskamera mit V(λ)-Filter gemessen. Im Fernfeld können die relevanten optischen Größen photometrisch oder spektroradiometrisch erfasst werden.
Für Leuchten, die eine stabile Brennlage erfordern, eignet sich zur Messung der Lichtstärkeverteilung z. B. ein Drehspiegel-Goniophotometer. Dabei rotiert die Lichtquelle um eine vertikale Achse (Azimutwinkel φ), während die ebene Spiegelanordnung um eine horizontale Achse (Elevationswinkel ϑ) gedreht wird. Der Empfänger steht während der Messung fest, kann jedoch je nach erforderlicher photometrischer Grenzentfernung in Längsrichtung verschoben werden, so dass der Abstand zwischen Lichtquelle und Detektor variiert werden kann. Beim Betrieb von LEDs ist zwar keine bestimmte Brennlage erforderlich, die für die Wärmeabfuhr verwendeten Kühlkörper sind jedoch lageabhängig. Bisher werden Drehspiegel-Goniophotometer mit integraler Messtechnik angeboten.

2.2 Stand der Normung

Es werden bereits einige Normen und Standards zur Messung von LEDs und LED-Leuchten erarbeitet, so zum Beispiel die prEN13032-4:2012, Licht und Beleuchtung - Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten, Teil 4: LED Lampen, Module und Leuchten /3/ sowie die überarbeitete DIN Norm-Vorlage „Messung der lichttechnischen Größen von inkohärent strahlenden Halbleiterlichtquellen“ /4/. Diese Normen befinden sich jedoch noch im Entwurf. Bestehende Normen zur Photometrie eignen sich zum Teil nicht für die Messung von LED-Leuchten.

3 Forschungshypothesen

Weiße LEDs können mit vorhandener integraler Messtechnik gemessen werden. Die Messunsicherheit ist im Einzelfall neu zu bewerten.
Für farbige LEDs bzw. Sonderlösungen sind ggf. neue (spektroradiometrische) Messverfahren erforderlich.
Zusätzlich zu den photometrischen bzw. radiometrischen Größen sind stets thermische Messungen durchzuführen, da Effizienz und Lebensdauer der Gesamtsysteme maßgeblich vom Thermomanagement abhängen.

4 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau (siehe Abb. 2) besteht aus einem zentrischen Drehspiegelsystem in Kombination mit einem in longitudinaler Richtung verschiebbaren Array-Spektroradiometer.

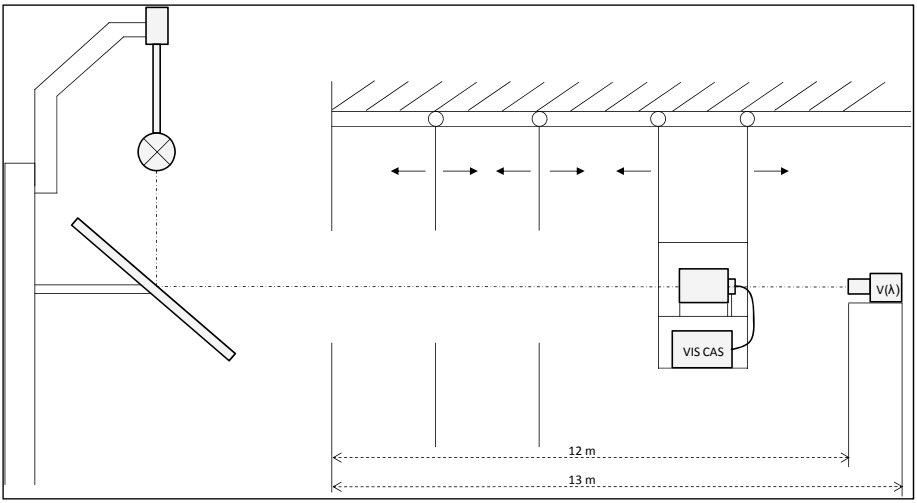


Abb. 2: Messaufbau

Vor der Eingangsoptik des Spektrometers befindet sich eine tubusartige, schwarz ausgekleidete Box, die zur Reduktion des Streulichts dient. Je nach Messabstand sind verschiedene Blenden unterschiedlicher Durchmesser einsetzbar (Abb. 3). Die Eingangsoptik des Spektrometers befindet auf gleicher Höhe wie der integrale Empfänger.

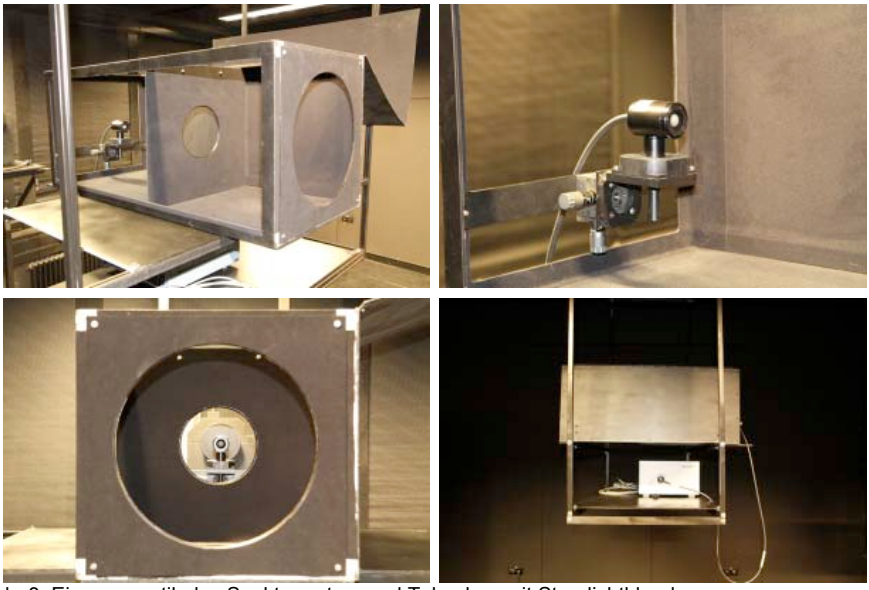


Abb. 3: Eingangsoptik des Spektrometers und Tubusbox mit Streulichtblenden

Die zur Auskleidung der Tubusbox verwendete schwarze Veloursfolie wurde hinsichtlich ihrer Reflexionseigenschaften untersucht. Die spektrale Reflexion im sichtbaren Wellenlängenbereich (Spektralbereich des Spektrometers) ist in Abbildung 4 dargestellt.

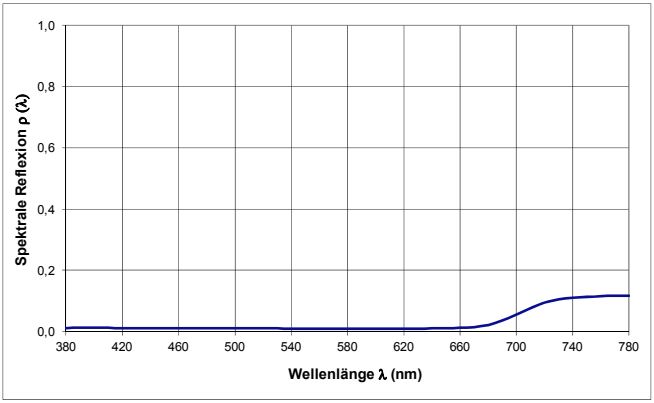


Abb. 4: Spektrale Reflexion der verwendeten schwarzen Veloursfolie

Untersuchungen zum Vergleich der eingesetzten integralen und spektralen Messtechnik, zur Spektralverteilung in Abhängigkeit der Winkel ϑ und φ, zum Einfluss der Luftbewegung und der Bewegung der Messobjekte auf den Lichtstrom sowie zur notwendigen Winkelabtastung bei engstrahlenden Leuchten sind vorgesehen.
Thermische Größen werden mit Hilfe von Thermodrähten, NTC-Temperaturfühlern und berührungsloser Infrarotthermografie ermittelt.

5 Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Der beschriebene Versuchsaufbau wird derzeit getestet. Erste Ergebnisse der geplanten Messungen werden auf der Tagung präsentiert.

Literatur

/1/ Blattner, P., Basic Concepts in Photometry, METAS 2010

/2/ DIN EN 13032-1:2004, Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten.

/3/ prEN 13032-4:2012, Licht und Beleuchtung - Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten, Teil 4: LED Lampen, Module und Leuchten (CEN/TC 169/WG 7)

/4/ Überarbeitete Norm-Vorlage „Messung der lichttechnischen Größen von inkohärent strahlenden Halbleiterlichtquellen“, 2011 (DIN NA 058-00-03 AA, N 0349)

Richtungsabhängige Empfindlichkeit von Photometerköpfen

D. Lindner, M. Lindemann, D. Friedrich
Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

1 Form und Aufbau von Photometerköpfen

Die Bewertung des auf die Lichteintrittsfläche eines Photometerkopfes auffallenden Lichtes hängt vom Lichteinfallswinkel ab.
Die richtungsabhängige Bewertungsfunktion wird von der Form und dem optischen Aufbau des Photometerkopfes bestimmt. Durch Auswahl von verschiedenen lichtstreuenden Vorsätzen können spezielle Bewertungsfunktionen realisiert werden. Hierzu gehören auch Kosinus-Vorsätze für die Messung der planaren Beleuchtungsstärke. Andere Vorsätze zur Messung z. B. der räumlichen oder halbzylindrischen Beleuchtungsstärke werden hier nicht behandelt. Einige in der Photometrie bevorzugten Typen werden in den Abb. 1 bis 3 dargestellt und Haupteinsatzgebiete genannt.

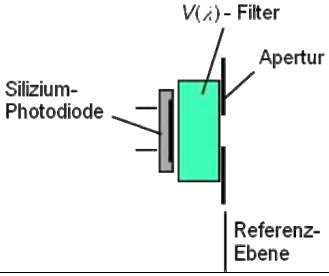


Abb. 1: Photometerkopf P 1
- ohne Diffusor
- Einsatz in der gerichteten Photometrie (Messung von kleinen Beleuchtungsstärken)

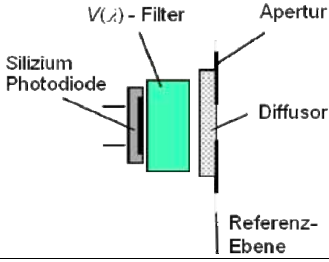


Abb. 2: Photometerkopf P 2
- mit Diffusor
- Einsatz in der gerichteten Photometrie und Goniophotometrie

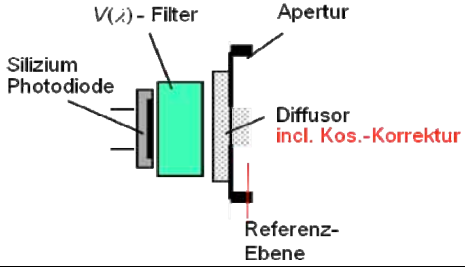


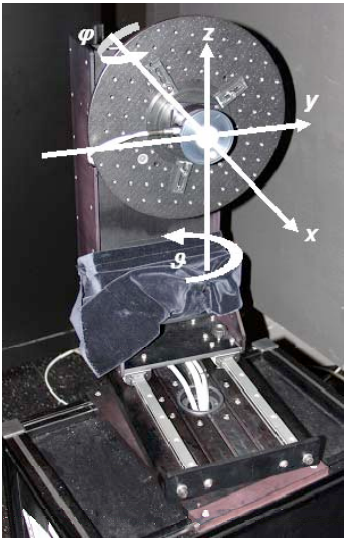
Abb. 3: Photometerkopf P 3
- mit Diffusor incl. Kosinusvorsatz
- Einsatz als klassischer Messkopf für Beleuchtungsstärkemessgeräte, im Kugelphotometer)* und in der Goniophotometrie

)* hier ohne Ringblende

2 Kenngrößen zur Richtungsabhängigkeit

In der deutschen bzw. internationalen Normung /1/ werden Kenngrößen zur Richtungsabhängigkeit aufgeführt. Diese geben einen Überblick zur Vergleichbarkeit der Photometerköpfe untereinander, können aber für photometrische Korrekturen nicht verwendet werden.
Allgemein gilt, dass durch Drehung des Photometerkopfes um seine horizontale oder vertikale Achse der Lichteinfallswinkel bezogen auf die Mitte der Lichteintrittsfläche (limitierende Blende) des Photometerkopfes, zu verändern ist. Das Drehzentrum muss übereinstimmen mit dem Zentrum der Lichteintrittsfläche. Zunächst ist der Ort der Lichteintrittsfläche als Referenzebene nicht bekannt. Ausführlich wird in /2/ ein Messverfahren erläutert, dass es mit kleiner Messunsicherheit ermöglicht, diesen Ort zu bestimmen. Weiterhin sind gem. /1/ die Messungen der Ausgangsgröße als Funktion des Lichteinfallswinkels in wenigstens zwei zueinander senkrechten Ebenen durchzuführen.

3 Bestimmung der Richtungsabhängigkeit



In der PTB wird die Richtungsabhängigkeit goniophotometrisch bestimmt.
Abb. 4 zeigt das 2-Achsen-Goniophotometer mit eingebautem Photometerkopf. Die Winkeländerungsschrittweite betrug jeweils 1°. Zur Messung wurde in 3 m Abstand eine FEL-Lampe bei ca. 2856 K betrieben. Zur Kontrolle des Betriebszustandes kam ein Monitorsystem zur kontinuierlichen Messung der Beleuchtungsstärke in nicht veränderter Geometrie zur Lampe zum Einsatz. Streulicht wurde u. a. durch Einsatz von Blenden minimiert.
Alle hier untersuchten Photometerköpfe waren thermostatisiert.

Abb. 4: Goniophotometer mit eingebautem Photometerkopf

4 Ergebnis der Messungen zur Richtungsabhängigkeit

In den Abb. 5 bis 7 sind die richtungsabhängigen Empfindlichkeiten der drei exemplarisch ausgewählten Photometerköpfe P 1, P 2 und P 3 dargestellt.

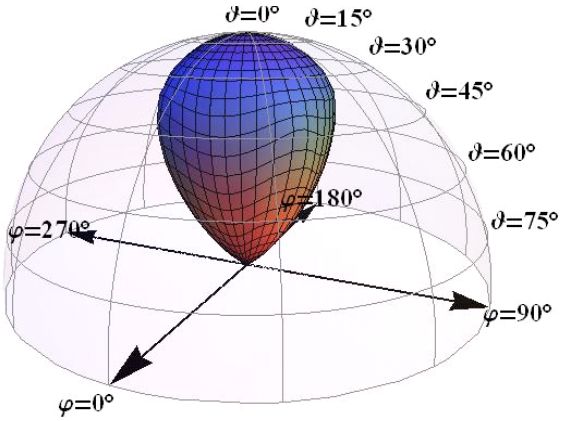


Abb. 5:
Richtungsabhängige
Empfindlichkeit P 1

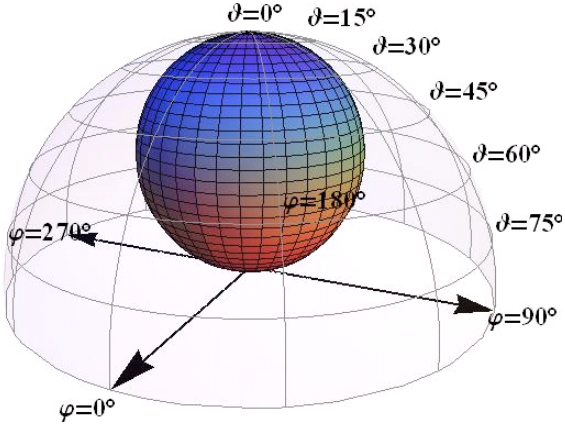


Abb. 6:
Richtungsabhängige
Empfindlichkeit P 2

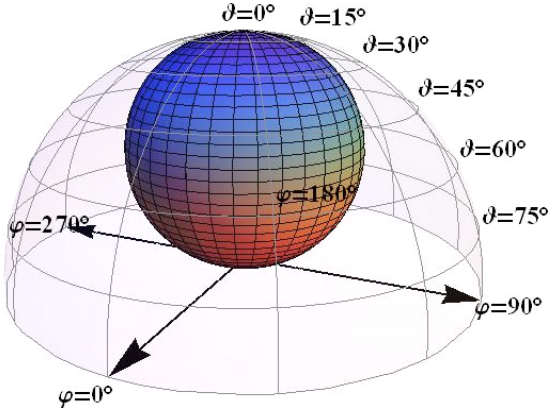


Abb. 7:
Richtungsabhängige
Empfindlichkeit P 3

Die Auswertung der winkelabhängigen Messungen zeigt zunächst, dass für die verwendeten Photometerköpfe

i) bei Drehung nur um die φ -Achse der gemessene Photostrom y konstant bleibt und

ii) die Drehung um die ϑ -Achse die Photoströme $y(-\vartheta_i) = y(\vartheta_i)$ im gemessenen Winkelbereich jeweils gleich sind.

Die in Abb. 8 eingetragenen winkelabhängigen relativen Photoströme $y_{rel}(\vartheta)$ (Punkte) für einen exemplarisch ausgewählten Photometerkopf können sehr gut mit dem funktionalen Zusammenhang $y(\vartheta) = \cos(\vartheta)^m$ beschrieben werden. Die hervorgehobene Funktion beschreibt den Zusammenhang $y(\vartheta) = \cos(\vartheta)^{m=1}$.

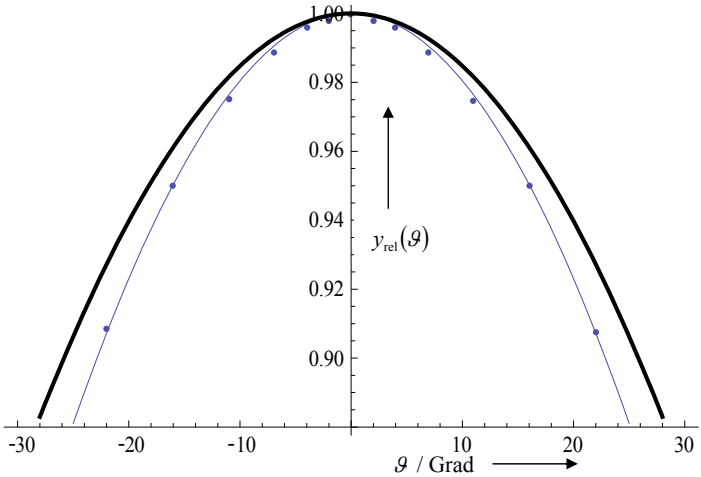


Abb. 8: Winkelabhängige relative Photoströme und Funktionsbeschreibung (exemplarisch für Photometerkopf P 2)

Die jeweils berechneten Exponenten m sind charakteristische Größen, die für spätere Korrekturen der Photoströme verwendet werden können. Tab. 1 zeigt die Exponenten für die ausgewählten Photometerköpfe.

Photometerkopf	P 1	P 2	P 3
Exponent m	1,942	1,287	0,8635

Tab. 1: Exponenten m für die ausgewählten Photometerköpfe

5 Berechnung der Korrekturen für goniophotometrische Messungen

Unter Berücksichtigung der richtungsabhängigen Empfindlichkeit werden Korrekturen am Beispiel von goniophotometrischen Messungen möglich. Dafür werden ungefähr im Gerätezentrum des Goniophotometers - hier als Beispiel – linienförmige Lichtquellen (z. B. Leuchtstofflampen) unterschiedlicher Längen l angeordnet und in Abhängigkeit des Messabstandes Korrekturfaktoren für die gemessenen Photoströme berechnet. Die prinzipielle geometrische Anordnung zeigt Abb. 9.

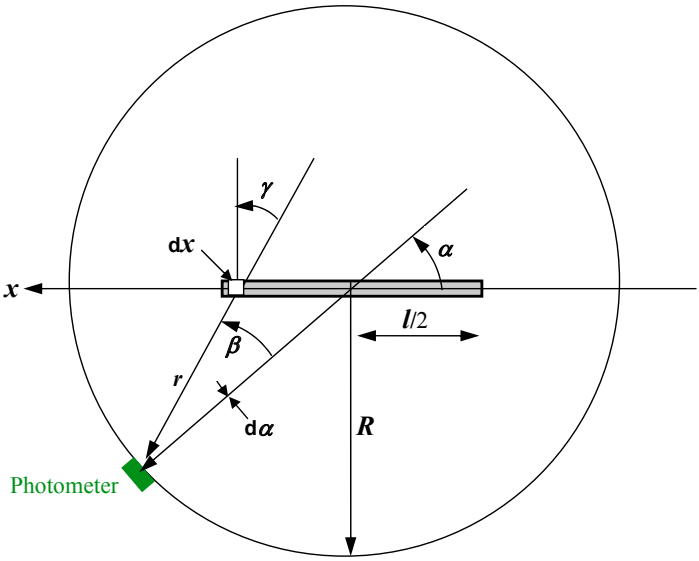


Abb. 9: Geometrische Anordnung

Zusammengefasst erfolgt die Berechnung der entsprechenden Korrekturfaktoren nach Gleichung 1:

$$K_C = \frac{\int_{x=-l/2}^{x=l/2}\int_{\alpha=0}^{\pi} \sin(\alpha)\cos(\gamma)^{n=1} / r^2 \cos(\beta)^{m=1}\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}\alpha}{\int_{x=-l/2}^{x=l/2}\int_{\alpha=0}^{\pi} \sin(\alpha)\cos(\gamma)^{n=1} / r^2 \cos(\beta)^{m}\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}\alpha} \qquad (1)$$

Dabei werden der wirksame Radius r, der Einfallswinkel zur Empfängernormalen β und der Abstrahlwinkel γ aus den Beziehungen gem. Gleichung 2 bis 4 ermittelt:

$$r = \sqrt{R^2 + x^2 - 2Rx\cos(\alpha)} \qquad (2)$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{x^2 - R^2 - r^2}{-2Rr}\right) \qquad (3)$$

$$\gamma = \pi - \alpha - \beta - \frac{\pi}{2} \qquad (4)$$

Der in Gleichung 1 eingeführte Exponent n beschreibt die Abstrahlcharakteristik der Lichtquelle. Er wird hier mit $n = 1$ angenommen (Lambert-Abstrahlung).
Nachfolgend werden in den Abb. 10 bis Abb. 12 nötige Korrekturen $K_C(R,l)$ dargestellt. Dabei erfolgt eine Variation des Messradius R von 1 m bis 3 m für unterschiedlich ausgedehnte linienförmige Lichtquellen $l = 0{,}6\,\mathrm{m}$ (durchgezogene Linien) bzw. $l = 1{,}2\,\mathrm{m}$ (gepunktete Darstellungen).

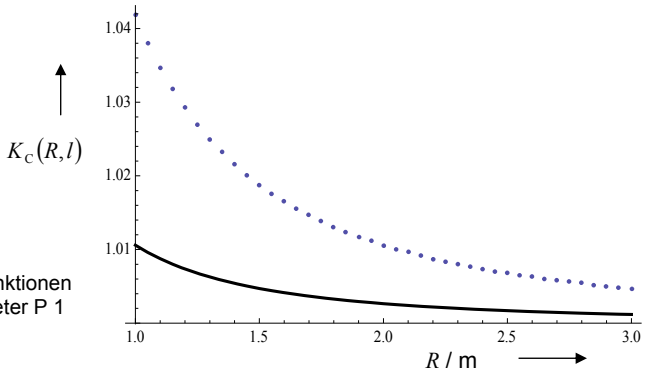


Abb. 10:
Korrekturfunktionen
für Photometer P 1

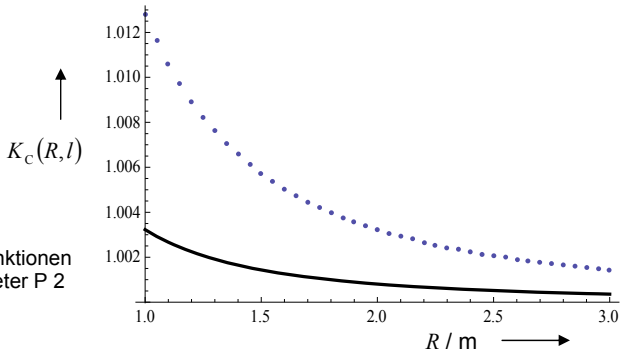


Abb. 11:
Korrekturfunktionen
für Photometer P 2

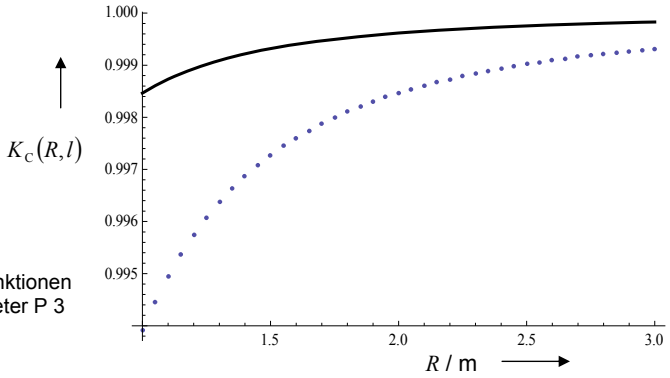


Abb. 12:
Korrekturfunktionen
für Photometer P 3

6 Zusammenfassung

Im Beitrag werden zur Charakterisierung der richtungsabhängigen Empfindlichkeit von Photometerköpfen ausschließlich Lichtquellen eingesetzt, die Planck-ähnliche Strahlungsfunktionen aufweisen. Die hierbei ermittelten Ergebnisse können für Lichtquellen mit breitbandigen Strahlungsfunktionen zu photometrischen Korrekturen verwendet werden.
Es sind aber auch entsprechende Eigenschaften beim Einsatz anderer Lichtquellen (z. B. „Linienstrahler“, RGB-LEDs) zu bestimmen, so dass entsprechende richtungsabhängige Korrekturmöglichkeiten ermöglicht werden. Dafür werden in der PTB weitere Untersuchungen durchgeführt.

7 Literatur

/1/ DIN EN 13032-1 Licht und Beleuchtung . Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten . Teil 1

/2/ D. Lindner, A. Sperling; Photometer als Transfer-Normale zur Messung von sehr kleinen bis hin zu sehr hohen Beleuchtungsstärken, Tagungs-CD LICHT 2010

Spektrale Empfindlichkeit von Photometerköpfen und ihre Richtungsabhängigkeit

M. Schuster, D. Lindner, S. Nevas, A. Sperling

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

1. Problemstellung

Die Kalibrierung von Photometerköpfen für planare Beleuchtungsstärken hinsichtlich photometrischer Empfindlichkeit erfolgt mit Planck-ähnlicher Strahlung bei senkrechtem Lichteinfall. Bei photometrischen Messungen im Goniophotometer der PTB wird der Gesamtlichtstrom, bzw. werden die Beleuchtungsstärken von ausgedehnten Lichtquellen mit von Planck abweichenden Strahlungsfunktionen bestimmt. In diesem Fall ergeben sich zusammengefasst zwei Abweichungen von der ursprünglichen Kalibriersituation.

1. Die Strahlungsfunktion der Lichtquelle folgt nicht in jedem Fall der Planckschen Strahlungsfunktion. Dies gilt beispielsweise für Leuchtstofflampen oder LEDs.

2. Bei räumlich ausgedehnten Lichtquellen kann nicht mehr von einem rein senkrechten Lichteinfall und von einer Punktlichtquelle ausgegangen werden. Hier trifft Strahlung aus verschiedenen Winkeln auf den Empfänger.

Diese Abweichungen sollten in jedem Fall berücksichtigt werden, da sie zu einem erheblichen Messunsicherheitsbeitrag führen können.

Es ist daher sinnvoll, hierfür eine umfangreichere Charakterisierung des zur Kalibrierung eingesetzten Empfängers durchzuführen. Dazu gehören zum Einen die Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit des Photometers und zum Anderen die Bestimmung seiner richtungsabhängigen Empfindlichkeit. Da die richtungsabhängige Empfindlichkeit wellenlängenabhängig sein kann, muss sie wenigstens für repräsentative Wellenlängen bestimmt werden. Dabei müssen sich die Drehachsen im Zentrum der limitierenden Blende schneiden. Ihre Lage muss deshalb je nach Design des Photometerkopfes ggf. spektral abhängig bestimmt werden. Erst durch diese Charakterisierung ist es möglich, die Messwerte durch die ermittelten Korrekturfunktionen hinsichtlich spektraler und räumlicher Fehlanpassung zu korrigieren.

2. Ziel der Forschungsarbeit

Ziel der Forschungsarbeit ist die Bestimmung der richtungsabhängigen Komponente der spektralen Empfindlichkeit von verschiedenen Photometerköpfen zur Korrektur der Messdaten eines Goniophotometer, bzw. zur Auswahl geeigneter Referenzphotometer für ein Goniophotometer.

Dafür ist in einem ersten Schritt die spektrale Empfindlichkeit der Photometerköpfe bei senkrechtem Lichteinfall zu bestimmen. Damit kann nun die Kenngröße f_1' nach DIN EN 13032 /1/ berechnet werden, die ein Maß für die Abweichung der spektralen Empfindlichkeit von der Hellempfindlichkeitskurve des menschlichen Auges angibt. Diese Kenngröße liefert einen Eindruck über die Güte der Anpassung. Allerdings ist in dieser Kenngröße eine Wichtung bezüglich Planck'scher Strahlung enthalten. Werden Lichtquellen mit abweichender Strahlungsfunktion gemessen, muss

zusätzlich noch die spektrale Fehlanpassung des Empfängers für die verwendete Lichtquelle bestimmt werden. Mit der Anpasskorrektur kann dieser korrigiert werden /2/.

In einem zweiten Schritt wird die winkelabhängige Empfindlichkeit des Photometers $f_2(\varepsilon,\varphi)$ bestimmt. Entsprechend DIN EN 13032 wird dies im Allgemeinen integral, d.h. mit breitbandiger Strahlung durchgeführt. Diese Kenngröße eines Photometerkopfes gibt einen Eindruck über die Güte der richtungsabhängigen Anpassung. Allerdings wird diese Größe typischer Weise nur für die Lichtquellen angegeben, deren Strahlungsfunktion dem Planck'schen Strahlungsgesetz folgen. Da die Winkelabhängigkeit aber auch wellenlängenabhängig sein kann, reicht die integrale Bestimmung über einen Temperaturstrahler nicht aus um eine geeignete Korrektur für Strahlungsquellen, die von Planck abweichen, berechnen zu können. In diesem Fall muss die Winkelabhängigkeit für repräsentative Wellenlängen über den sichtbaren Spektralbereich bestimmt werden. In Anlehnung an DIN EN 13032 kann daraus eine Kenngröße, $f_2(\varepsilon,\varphi,\lambda)$, bestimmt werden. Zusätzlich ist es sinnvoll, eine Kenngröße f_2' zu definieren, die die Güte der kosinusgetreuen Anpassung mit einer, dem Anwendungsfall entsprechenden, Gewichtung angibt.

3. Kenngrößen

Die Kenngrößen bezüglich Wellenlängenabhängigkeit und Winkelabhängigkeit der Empfindlichkeit für die Charakterisierung von Photometerköpfen finden sich in DIN EN 13032.

Die Kenngröße zur Beurteilung der Güte der spektralen Anpassung f_1' berechnet sich nach Gleichung (1) mit $V(\lambda)$, dem spektralen Hellempfindlichkeitsgrad des menschlichen Auges für das Tagsehen und $s^*_{\mathrm{rel}}(\lambda)$, der bewerteten spektralen Empfindlichkeit aus Gleichung (2).

$$f_1' = \frac{\int \left| s^*_{\mathrm{rel}}(\lambda) - V(\lambda) \right| \mathrm{d}\lambda}{\int V(\lambda)\mathrm{d}\lambda} \tag{1}$$

$$s^*_{\mathrm{rel}}(\lambda) = s_{\mathrm{rel}}(\lambda) \cdot \frac{\int P(\lambda,\mathrm{T_A}) \cdot V(\lambda)\mathrm{d}\lambda}{\int P(\lambda,\mathrm{T_A}) \cdot s_{\mathrm{rel}}(\lambda)\mathrm{d}\lambda} \tag{2}$$

Mit $s^*_{\mathrm{rel}}(\lambda)$ wird berücksichtigt, dass die Planck'sche Strahlungsfunktion $P(\lambda,\mathrm{T_A})$ integral einen höheren Anteil im roten Spektralbereich aufweist als im blauen und damit eine Abweichung der relativen spektralen Empfindlichkeit, $s_{\mathrm{rel}}(\lambda)$, vom Hellempfindlichkeitsgrad im roten Spektralbereich einen größeren Einfluss hat.

Die Kenngrößen sind im Allgemeinen nicht zur Korrektur von Anpassungsfehlern geeignet. Sollen nun Strahlungsquellen mit von Planck abweichender Strahlungsfunktion, S_{Quelle}, gemessen werden (die photometrische Empfindlichkeit wird in der Regel für Normlicht A angegeben), muss die spektrale Fehlanpassung $F'(T)$ nach Gleichung (3) berechnet werden.

$$F'(T) = \frac{\int V(\lambda) \cdot S_{\text{Quelle}} \mathrm{d}\lambda}{\int s_{\text{rel}}(\lambda) \cdot S_{\text{Quelle}} \mathrm{d}\lambda} \Bigg/ \frac{\int V(\lambda) \cdot P(\lambda, T_{\text{A}}) \mathrm{d}\lambda}{\int s_{\text{rel}}(\lambda) \cdot P(\lambda, T_{\text{A}}) \mathrm{d}\lambda} \tag{3}$$

Zur Bestimmung der Richtungsabhängigkeit von Photometerköpfen wird f_2 aus den gemessenen Photoströmen, in Abhängigkeit vom Winkel gegen die Flächennormale (ε) und dem Azimutwinkel (φ) bezogen auf den gemessenen Photostrom bei senkrechtem Lichteinfall (ε=0), bestimmt (Gleichung 4).

$$f_2 = \frac{\text{Istwert}}{\text{Sollwert}} - 1 = \frac{Y(\varepsilon, \varphi)}{Y(0, \varphi) \cdot \cos\varepsilon} - 1 \tag{4}$$

Praktisch wird dabei Gleichung (5) verwendet, d.h. es wird bei vier Azimutwinkeln gemessen und daraus der Mittelwert gebildet.

$$f_2 = \frac{1}{4} \sum_{j=0}^{3} f_2(\varphi = j \cdot \frac{\pi}{2}) \tag{5}$$

Bei der in der Norm aufgeführten Kenngröße wird jedoch die Abweichung von der kosinusgetreuen Bewertung über den gesamten Halbraum gewertet. Diese ist zu großen Winkeln hin stets abweichend vom Kosinus. Im Goniophotometer trifft außer Streustrahlung fast keine Strahlung unter einem Winkel $\varepsilon > 45°$ auf das Photometer. Für diesen Anwendungsfall wird die Kosinusabweichung also überbewertet.

Aus diesem Grund soll hier eine abweichende Bestimmung der winkelabhängigen Empfindlichkeit vorgestellt werden. Die Berechnung erfolgt analog der Berechnung von f_1' mit einer dem Anwendungsfall angepassten Bewertungsfunktion B, die eine Gewichtung der für den Anwendungsfall relevanten Winkelbereiche durchführt.

Die Kenngröße f_2' ergibt sich aus der Abweichung der bewerteten richtungsabhängigen Empfindlichkeit $m^*_{\text{rel}}(\varepsilon, \varphi, \lambda)$ zum Kosinus $\cos(\varepsilon, \varphi)$ nach Gleichung (7) und (8)

$$f_2'(\lambda) = \frac{\int \left| m^*_{\text{rel}}(\varepsilon, \varphi, \lambda) - \cos(\varepsilon, \varphi) \right| \mathrm{d}\varepsilon \mathrm{d}\varphi}{\int \cos(\varepsilon, \varphi) \mathrm{d}\varepsilon \mathrm{d}\varphi} \tag{6}$$

$$m^*_{\text{rel}}(\varepsilon, \varphi, \lambda) = m_{\text{rel}}(\varepsilon, \varphi, \lambda) \cdot \frac{\int\int B(\varepsilon, \varphi) \cdot \cos(\varepsilon, \varphi) \mathrm{d}\varepsilon \mathrm{d}\varphi}{\int\int B(\varepsilon, \varphi) \cdot m_{\text{rel}}(\varepsilon, \varphi) \mathrm{d}\varepsilon \mathrm{d}\varphi} \tag{7}$$

Die Bewertungsfunktion B ist entsprechend des Anwendungsfalles zu wählen, z.B Rechteckfenster mit Breite 20°.

4. Forschungshypothesen und -methode

Grundsätzlich ist die wirksame Lage der limitierenden Blende von Photometerköpfen wellenlängenabhängig anzusetzen. Auch die relative spektrale Empfindlichkeit ist richtungsabhängig. Erst die Bestimmung beider Faktoren ermöglicht die vollständige Korrektur richtungsabhängiger und spektraler Anpassfehler.

Die relative spektrale und richtungsabhängige Empfindlichkeit wird mit monochromatischer Strahlung am Lasermessplatz TULIP der PTB bestimmt. Sie wird für verschiedene Photometerköpfe bei unterschiedlichen Einfallswinkeln der optischen Strahlung gemessen. Ziel ist es, die aus den Abhängigkeiten berechneten Korrekturen für die photometrische Empfindlichkeit mit richtungsabhängigen Messergebnissen für verschiedene Strahlungsfunktionen an der Photometerbank zu vergleichen.

Da die Bestimmung der spektralen Fehlanpassung Stand der Wissenschaft ist und dies bereits in Veröffentlichungen beschrieben ist, soll hier nicht weiter darauf eingegangen werden.

5. Versuchsaufbau

Der Lasermessplatz TULIP /3/ stellt als durchstimmbares Lasersystem optische Strahlung u.a. im Wellenlängenbereich von 360 nm bis 830 nm bereit. Die eingesetzten Laser werden leistungsstabilisiert betrieben, wobei Kohärenzeffekte mit Hilfe einer Ulbricht-Kugel und weiteren geeignete Methoden unterdrückt werden. Die Stabilität der Gesamtapparatur wird durch Monitorempfänger gesichert. Die Ulbrichtkugel erzeugt ein aufgeweitetes, homogenes Strahlungsfeld am Ort der limitierenden Blende des Photometerkopfes. (Abb. 1)

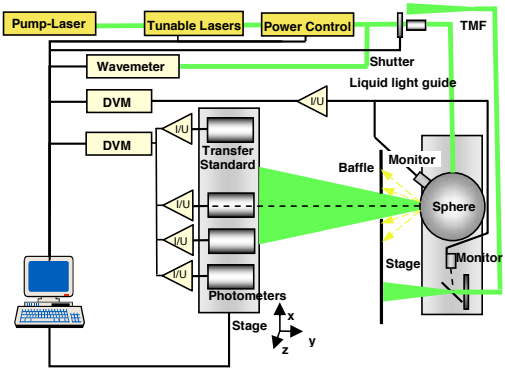


Abb. 1: Versuchsaufbau zur Bestimmung der spektralen und richtungsabhängigen Empfindlichkeit von Photometerköpfen (TULIP)

Die zu charakterisierenden Empfänger sind übereinander auf einem Drehtisch montiert. Die Empfänger sind dabei so ausgerichtet, dass eine Drehung stets um die geometrische Lage der limitierenden Blende ausgeführt wird. Der Drehtisch befindet sich auf einem Dreiachsen-Positioniersystem zur Ausrichtung der Empfänger zur Strahlungsquelle.

Als Empfänger werden exemplarisch Photometerköpfe verschiedenen Typs verwendet. Dabei Tabelle 1 zeigt einen Überblick über diese Photometer. Es handelt sich dabei um eine repräsentative Auswahl mit unterschiedlichen Durchmessern, Filterarten und Streuscheibe.

Tab. 1: für die Charakterisierung verwendete Photometer

Bezeichnung	Filter	Durchmesser	Streuscheibe
LV10	Voll	10mm	Ja
P10	Voll	10mm	ohne
F30	Partial	30mm	Ja

Für die winkelabhängige Empfindlichkeit der drei Empfänger wurde Rotationssymmetrie unterstellt und daher die Abhängigkeit vom Azimutwinkel nicht gemessen.

Die Empfänger wurden im Winkelbereich von -45° bis 45° charakterisiert. Die Norm DIN EN 13032 sieht einen größeren Winkelbereich vor. Da hier aber nicht die Winkelabhängigkeit allgemein, sondern für einen bestimmten Anwendungsfall (Einsatz im Goniophotometer) beschrieben werden soll, wurde der Winkelbereich eingeschränkt.

7. Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Üblicherweise und wie in DIN EN 13032 beschrieben wird die gemessene Winkelabhängigkeit auf den Messwert bei 0° normiert. Dies kann jedoch zu Problemen führen. Die Photometer werden auf Autokollimation justiert, d.h. ein einfallender Lichtstrahl wird direkt an der Empfängeroberfläche (Filter oder Diffusor) in sich zurückreflektiert. Dabei kommt es zu einer Interreflexion zwischen Quelle und Empfänger, die die Empfindlichkeit an der Stelle 0° überbewerten kann. Werden nun die Messwerte aller anderen Winkel auf diesen Messwert bezogen, erfolgt eine Falschbewertung aller anderen Messwerte. Abhilfe schafft hier eine leichte Verkippung (bis zu 1°) senkrecht zur ε-Ebene. Ist diese nicht möglich, sollte bei der Auswertung nicht auf den Messwert bei 0° bezogen werden sondern besser auf den Wert der Fit-Kurve bei 0°. Dies ist jedoch in DIN EN 13032 nicht vorgesehen.

Abbildung 2 zeigt die Winkelabhängigkeit im Winkelbereich von -35° bis +35° der drei Empfänger bezogen auf senkrechten Lichteinfall für die Wellenlängen 555 nm und 750 nm. Es ist zu erkennen, dass alle Photometer eine vom Kosinus abweichende Richtungsabhängigkeit ausweisen. Allerdings ist die Abweichung für die Photometer LV10 und F30 sehr gering und nahezu nicht wellenlängenabhängig, wohingegen die Abweichung des Photometers P10 deutlich zu erkennen und auch stark wellenlängenanhängig ist. Dies ist einfach durch das Fehlen der Streuscheibe zu erklären. Dadurch legt die Strahlung, die nicht senkrecht auf das Filter auftrifft, im Filterglas unterschiedlich lange Wege zurück, wird teilweise absorbiert und trifft ggf. nicht mehr vollständig auf den Detektor auf. Je größer der Winkel, desto größer auch der Anteil der Strahlung, der absorbiert oder reflektiert wird. Wird jedoch eine Streuscheibe vor das Filter gesetzt, so wird die nicht senkrecht auftreffende Strahlung ins Material hineingestreut, dadurch wird sichergestellt, dass nur ein sehr geringer Teil der Strahlung nicht auf den Empfänger auftrifft.

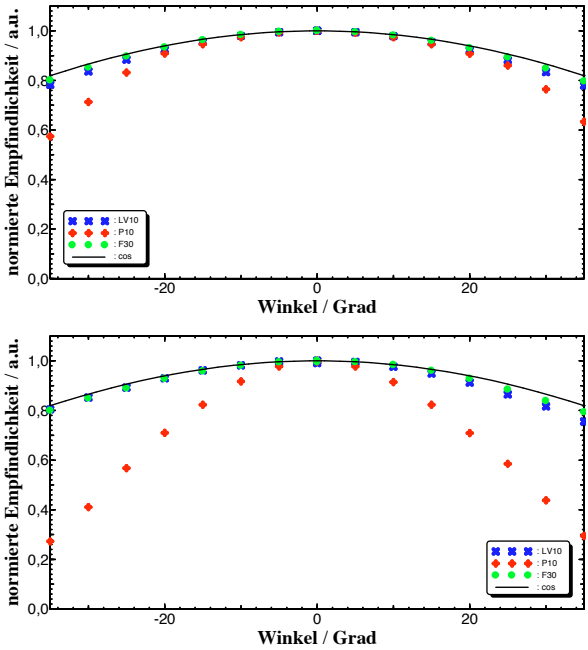


Abb. 2: Winkelabhängigkeit für die drei Photometer LV10, P10 und F30 exemplarisch bei den Wellenlängen 555 nm (a) und 750 nm (b)

Die Winkelabhängigkeit des Photometers ohne Streuscheibe ist auch wellenlängenabhängig. Bei 555 nm, der Peakwellenlänge des Filters, ist die Winkelabhängigkeit dem Kosinus am ähnlichsten. Mit zunehmender Abweichung von dieser Wellenlänge weicht auch die Winkelabhängigkeit stärker vom Kosinus ab. Das resultiert aus der Absorptionseigenschaft des Filters. Bei 555 nm ist die Absorption im Filter am geringsten, bei Wellenlängen unterhalb und oberhalb dieser Wellenlänge nimmt die Absorption zu.

Um die Abweichung der Winkelabhängigkeit vom Kosinus der drei Photometer zu quantifizieren, wurde eine Fitfunktion bestimmt, entsprechend $\cos(\varepsilon)^m$. Der Exponent m beschreibt die Abweichung vom Kosinus. Ein idealer Kosinus liefert ein m von 1. Abbildung (3) zeigt die Ergebnisse für die drei Photometer in Abhängigkeit von der Wellenlänge.

Auch hier zeigt sich, dass das Photometer F30 die geringste Abweichung vom Kosinus zeigt und diese Abweichung zu großen Wellenlängen nur leicht zunimmt. Das Photometer LV10 zeigt ebenfalls eine sehr geringe Abweichung vom Kosinus, die allerdings etwas höher ist als beim F30. Das Photometer P10 zeigt eine deutliche Abweichung vom idealen Kosinus, die bei 555 nm am geringsten ist und zu kleinen und großen Wellenlängen stark ansteigt

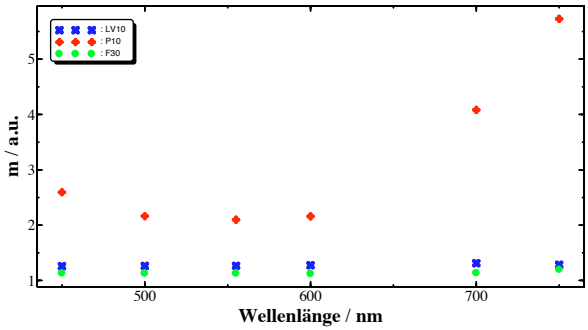


Abb. 3: Ergebnis des Exponenten *m* aus der Fit-Berechnung für die drei Photometer

Um die Güte der Winkelabhängigkeit zu bestimmen, muss die Kenngröße $f_2(\varepsilon,\varphi)$, bzw. $f_2(\varepsilon,\varphi,\lambda)$ berechnet werden. Für die Bewertung der Photometer hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit im Goniophotometer ist dies jedoch wie bereits beschrieben, nicht zielführend. Daher soll hier die neue Kenngröße $f_2'(\lambda)$ nach Gleichung (6) und (7) verwendet werden. Dabei wurde eine Bewertungsfunktion zugrunde gelegt, die für die Anwendung im Goniophotometer gewählt wurde. Als Bewertungsfunktion wurde ein Rechteckfenster gewählt, das nur den Winkelbereich von -35°bis +35° berücksichtigt. Für andere Anwendungsfälle kann der Winkelbereich eingeschränkt oder erweitert werden. Abbildung (4) zeigt das Ergebnis der Berechnung für alle drei Photometer. Auch hier ist zu erkennen, dass die Abweichung vom idealen Kosinus für die Photometer LV10 und F30 sehr gering und nicht wellenlängenabhängig ist. Das Photometer P10 zeigt jedoch eine deutliche Abweichung vom Kosinus, die bei 555 nm am geringsten ist und zu kleineren und größeren Wellenlängen deutlich zunimmt.

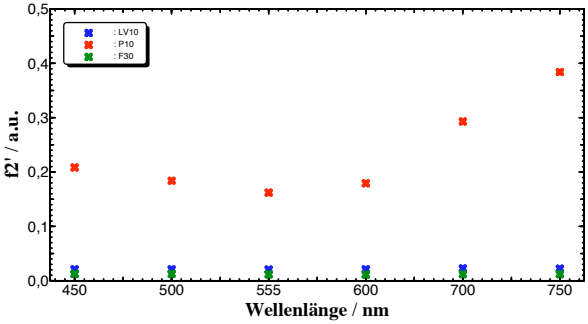


Abb. 4: Kenngröße $f_2'(\lambda)$ für die drei Photometer

8. Zusammenfassung

Werden in einem Goniophotometer ausgedehnte Lichtquellen mit von Planck abweichender Strahlungsfunktion kalibriert, so muss der verwendete Referenzempfänger hinsichtlich seiner spektralen und richtungsabhängigen

Empfindlichkeit umfangreich charakterisiert werden. Mit Hilfe der spektralen Empfindlichkeit kann eine Korrektur der spektralen Fehlanpassung durchgeführt werden, wenn die Strahlungsfunktion des Kalibrierobjektes bekannt ist. Auch die richtungsabhängige Empfindlichkeit muss genau bekannt sein, um einen geeigneten Referenzempfänger für das Kalibrierobjekt auszuwählen. Dabei muss auch die Wellenlängenabhängigkeit der Richtungsabhängigkeit mit berücksichtigt werden.

Die Messungen des Photometers ohne Streuscheibe zeigen eine starke Abweichung vom Kosinus, die auch noch stark wellenlängenabhängig ist. Dieses Photometer ist für den Einsatz als Referenzphotometer in einem Goniophotometer nicht geeignet. Es eignet sich jedoch sehr gut für die Messung kleiner Beleuchtungsstärken in der gerichteten Photometrie.

Aus den Messungen zeigte sich für die Photometer mit Streuscheibe nur eine geringe Abweichung vom idealen Kosinus und eine geringe Wellenlängenabhängigkeit. Diese Empfänger sind für den Einsatz im Giniophotometer gut geeignet.

Um aus den gefundenen richtungsabhängigen spektralen Bestrahlungsstärken Korrekturen für die planare Beleuchtungsstärke berechnen zu können, sind jedoch noch Kenntnisse über die Strahlungsfunktion und die relative Verteilung der Strahlung aus dem Halbraum (Leuchtdichtekörper) erforderlich. Dies wird besonders wichtig für die Messung an organischen LEDs mit richtungsabhängiger Strahlungsfunktion. An diesen Untersuchungen wird in der PTB in Fortführung des Projektes OLED100 gearbeitet.

9. Literatur

/1/ DIN EN 13032-1:2004, Licht und Beleuchtung – Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten; Teil 1: Messung und Datenformat.

/2/ Schuster, M. et. al., Korrekturmöglichkeiten der spektralen Fehlanpassung von Photometerköpfen, Licht 10/2010.

/3/ Schuster, M. et. al., Spectral calibration of radiometric detectors using tunable laser sources, Appl. Opt. Vol. 51, No. 12, 2012.

Das Glühlampenverbot – Der Anfang vom Ende eines kalkulierbaren Transfer - Normals?
Ein verfrühter (?) Nachruf aus messtechnischer Sicht

Werner Jordan, Werner Halbritter, Klaus Killer, Axel Gurel und Walter Steudtner

OSRAM AG
Central Laboratory for Light Measurements
Hellabrunnerstraße 1
81543 München

1 Einleitung

Die Europäischen Union verbietet im Rahmen der Energiegesetzgebung die Glühlampe (und weitere Lichtquellen), die den heutigen Anforderungen an die Energieeffizienz nicht mehr genügen (EU Richtlinie 2005/32/EG „Eco-Design Requirements for Energy Usíng Products“ und die entsprechenden Durchführungsmaßnahmen – „Implementing Measures for Domestic Lighting“, auch als „Glühlampenverbot“ bezeichnet, siehe auch [1] zur Diskussion zum „Glühlampenverbot“).

Auch der wohl dadurch forcierte Trend hin zu LED-Lichtquellen („Solid State Lighting – SSL) verändert nicht nur die gesetzlich zugelassenen und anwendbaren Technologien für die Allgemeinbeleuchtung, sondern hat auch potenzielle Auswirkungen bezüglich der Verfügbarkeit von speziellen Glühlampen, die z. B. in einem Mess- und Kalibrierlabor als Transfernormale und Sekundärnormale gebraucht werden, um die metrologische Rückführbarkeit der durchgeführten Prüfungen und Kalibrierungen zu gewährleisten.

2 Lichttechnische Transfernormale

Eine Voraussetzung für globalen Handel und Austausch von Waren ist unter anderem auch die messtechnisch einheitliche Beschreibung des Handelsobjekts. Hierzu müssen Messeinrichtungen verwendet werden, welche an die international gültigen, dargestellten und bewahrten Einheiten angeschlossen sind. Die Darstellung der Einheiten ist die bestimmungsgemäße Aufgabe der Staatsinstitute der Nationalstaaten (Deutschland: PTB). Der Übergang bzw. die Weitergabe dieser Einheiten von den Staatsinstituten zu den Anwendern von Mess- und Kalibriertechnik erfolgt durch Transfernormale, welche unter bestimmten, definierten und einzuhaltenden Bedingungen diese Einheiten auch außerhalb des Staatsinstituts, also im Anwenderlabor repräsentieren. Nur so kann heute eine global einheitliche, quantifizierbare Beschreibung von messtechnisch erfassbaren Charakteristika gewährleistet und Handelsware überall und substituierbar verwendet werden.

Für die Lichttechnik und die zur Beschreibung ihrer Produkte (Lampen, Leuchten) notwendigen Merkmale werden heute immer noch – in der überwiegenden Mehrzahl – Glühlampen als Transfer-/Sekundärnormale verwendet.

Diese Transfernormale müssen eine Reihe von allgemeinen Bedingungen erfüllen und bestimmte Eigenschaften haben, um den beabsichtigten und sicheren Gebrauch zu ermöglichen:

- Transportsicherheit (kein Einfluss von Erschütterungen auf die repräsentierten Eigenschaften bzw. auf das Objekt an sich)
- Unempfindlichkeit gegen Temperatur- und Feuchteschwankungen

- Lagerbeständigkeit (keine Veränderung bei Nichtgebrauch)
- Ausreichend vollständig zu beschreibende Nutzungs-/Betriebsbedingungen
- Wiederholbare Darstellung der repräsentierten Einheit
- Technisch einfach durchzuführender und reproduzierbarer Betrieb
- Ökonomisch durchführbare Adaptation an die jeweiligen Laborbedingungen
- Kostengünstig
- Wieder verwendbar (erneut/mehrmals kalibrierbar)
- Für den vorgesehenen Zweck geeignete Abstrahlcharakteristik
- Bereitstellung eines geeigneten Dynamikbereichs für die Einheit
- Kontinuierliche, „lückenlose“ spektrale Verteilung

Diese Anforderungen werden dadurch erreicht, dass Glühlampen entweder aus dem bestehenden Produktspektrum entsprechend dieser Kriterien ausgesucht werden, oder dass spezielle Glühlampen für die Darstellung einer bestimmten lichttechnischen Einheit entwickelt und gebaut werden.

Bemerkung: Alle namhaften Lampenhersteller wie GE, Philips, Toshiba und OSRAM, sowie einige spezialisierte Anbieter, wie z. B. Polaron, haben dies frühzeitig erkannt und für die lichttechnische Metrologie geeignete Lampen und Strahler angeboten [2, 3]. Bereits jetzt nimmt, durch die EU und USA energie-politisch motiviert und die jetzt schon mögliche LED Technologie, die Typenvielfalt von Glühlampen stark ab. Die Glühlampen - Technologie und das Wissen darum wird, verständlicherweise auch aus wirtschaftlichen Erwägungen der Unternehmen heraus, nicht mehr gepflegt und ist so zum Verschwinden verurteilt.

2.1 Photometrisches Transfernormal „Lichtstärke“

Die „Lichtstärke“ (Candela) repräsentiert eine der SI-Basiseinheiten, mit der Besonderheit, dass es sich hierbei um eine physiologisch bewertete Größe handelt. Aus der „Lichtstärke“ lassen sich alle anderen, lichttechnisch interessanten Größen ableiten beziehungsweise im Labor darstellen.

Anwendung des photometrischen Grundgesetzes:

$$d\Phi_v = L_v \frac{\cos\varepsilon_1 d\Omega_1 \cos\varepsilon_2 d\Omega_2}{r^2} \Omega_0$$

zur Darstellung von:

Lichtstrom $\Phi_v = \int_{\Omega} I_v d\Omega$

Beleuchtungsstärke $E_v = \frac{\int_{\Omega} I_v d\Omega}{A_{Empfänger}}$

Leuchtdichte $L_v = \frac{I_v}{A_{leuchtende\ Fläche}}$

Hier eignen sich prinzipiell Halogenglühlampen als Transfernormale, die durch ihre Leistungsaufnahme von 5 W bis hin zu 1000 W einen großen Dynamikbereich bereitstellen können.
Eine spezielle Bauform stellt die Glühlampe OSRAM WI 41/G dar, die vor allem im Bereich der Präzisionsmetrologie als Transfer- beziehungsweise Referenznormal verwendet wird. Die Leistungsaufnahme dieser Lampe wird dabei häufig so eingestellt, dass die spektrale Strahlstärkeverteilung die Normlicht A (definiert durch die CIE [4]) repräsentiert und somit

auch bei der standardisierten Überprüfung oder Kalibrierung der spektralen Empfindlichkeit von Photometerköpfen Verwendung findet.

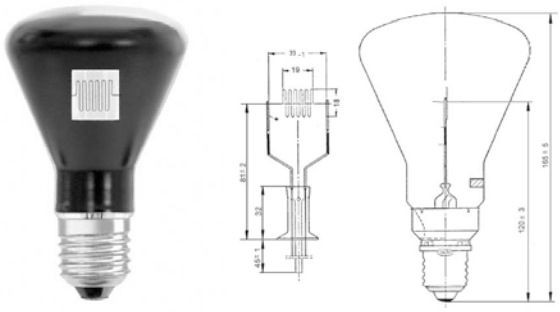


Abb. 1: OSRAM WI 41/G, mit gerichteter, durch die schwarze Lampenschürze definierter Ausstrahlungsrichtung

2.2 Photometrisches Transfernormal "Lichtstrom"

Auch hier finden derzeit Glühlampen und Halogenglühlampen Anwendung. Entsprechend den Labor- und Anlagenbedingungen werden Lampen mit 5W bis zu 1000W Leistungsaufnahme zum Einsatz in Ulbricht-Photometerkugeln oder Goniophotometern verwendet. Diese Lampen sind so konstruiert bzw. für diesen Zweck ausgesucht, dass die Lichtausstrahlung möglichst gleichmäßig über den gesamten Raumwinkel (4π) verteilt ist. Dies wird durch spezielle Wendelformen und/oder durch Mattierung erreicht.

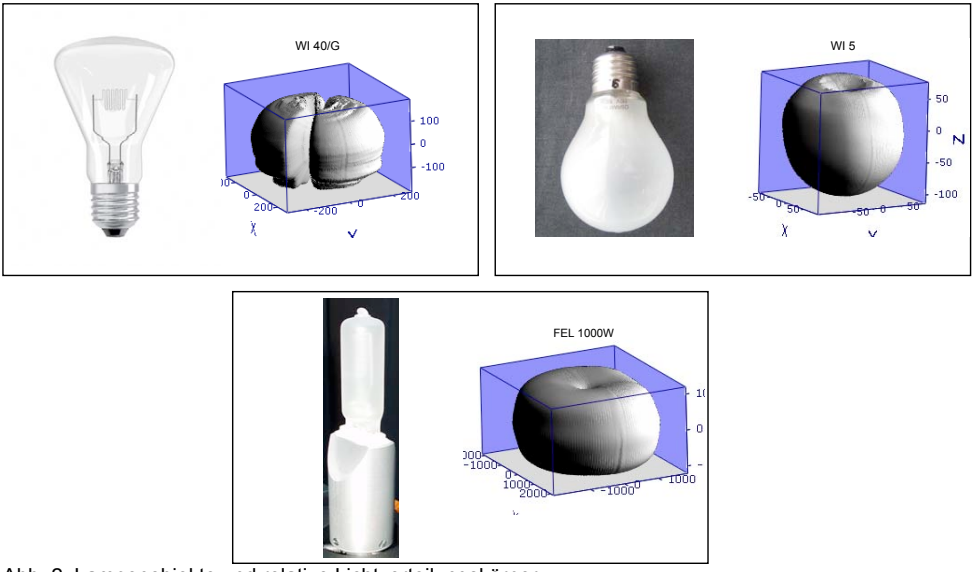
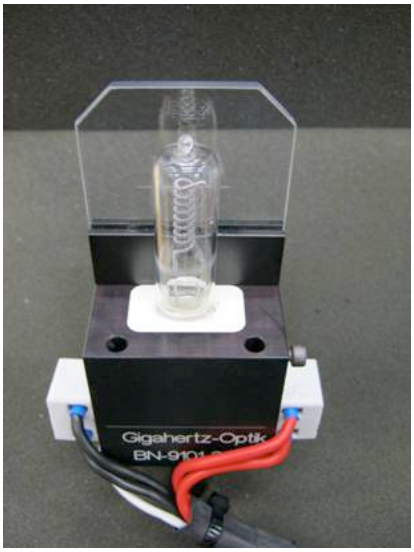


Abb. 2: Lampenobjekte und relative Lichtverteilungskörper:
OSRAM WI 40/G, OSRAM Glühlampe WI 5 und OSRAM Sylvania FEL 1000 W modified

2.3 Radiometrisches Transfernormal „spektrale Empfindlichkeit“

Seit etwa 15 Jahren werden spektralradiometrische Messsysteme (Polychromatoren, Spektroradiometer) auch in der Lichttechnik zur Erfassung von photometrischen Daten sowie von UV- und IR-Strahlungsleistung immer häufiger eingesetzt [5]. Die spektrale Empfindlichkeit dieser Systeme kann in der Regel im Wellenlängenbereich von 250 nm bis 2500 nm durch Halogenglühlampen bestimmt beziehungsweise kalibriert werden. Auch hier macht man sich den einfachen Betrieb und die kontinuierliche, lückenlose Emission der Lampen über diesen Spektralbereich zu Nutze.



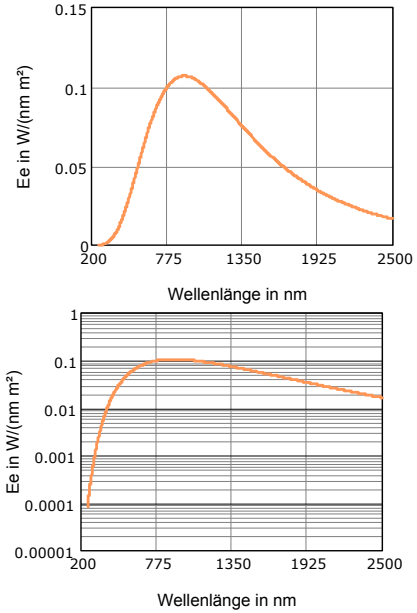


Abb. 3: Bestrahlungsstärke-Transfernormal (Halogenglühlampe Typ FEL 1000 W modified) mit Justierhilfe und spektrale Dichte der Bestrahlungsstärke (Ordinate linear und logarithmisch)

Alle vorgegebenen und mit dem Monochromator ansteuerbaren Wellenlängenschritte und - Intervalle mit den zugeordneten spektralen Bandbreiten können vollständig mit Strahlung beaufschlagt und somit die (absolute) spektrale Empfindlichkeit $s(\lambda)_{\text{Mono}}$ ermittelt werden [6].

spektrale Empfindlichkeit $s(\lambda)_{Mono}$:

$$s(\lambda)_{Mono} = \frac{Y_\lambda(\lambda)\mathrm{d}\lambda}{X_{e\lambda}(\lambda)\mathrm{d}\lambda}$$

mit $Y_\lambda(\lambda)$ Ausgangsgröße

$X_{e\lambda}(\lambda)$ Eingangsgröße

2.4 Transfernormal „Leuchtdichte“ und „spektrale Strahldichte“

Eine „Leuchtdichte“ respektive eine „spektrale Strahldichte“ beziehen sich auf eine definiert leuchtende/strahlende Fläche. Dies wird beim Lampenbau durch ein planes Wolframband realisiert (sogenannte Wolframbandlampen). Durch die messtechnische Nutzung eines definierten Bandausschnitts lassen sich damit sowohl die Leuchtdichte als auch die spektrale Strahldichte darstellen. Zusätzlich wird diese Art von Lampen auch zur Weitergabe von sogenannten Schwarzen Temperaturen (Strahldichten entsprechend der Planckschen Strahlung) benutzt und findet Anwendung in der Messung von Strahlungstemperaturen. Bei Untersuchungen zur „optischen Strahlungssicherheit“ wird die, durch solche Lampen bereitgestellte spektrale Strahldichte, zur Kalibrierung der Messanlage verwendet.

Nachfolgend ist der Vergleich zwischen berechneten (—) und gemessenen Strahldichtewerten (□) einer Wolframbandlampe dargestellt. Die Berechnung der Strahldichtewerte der Wolframbandstrahlung beruht auf der Wolframemission nach de Vos [12] und der Transmission der Abschlussscheibe der Bandlampe.

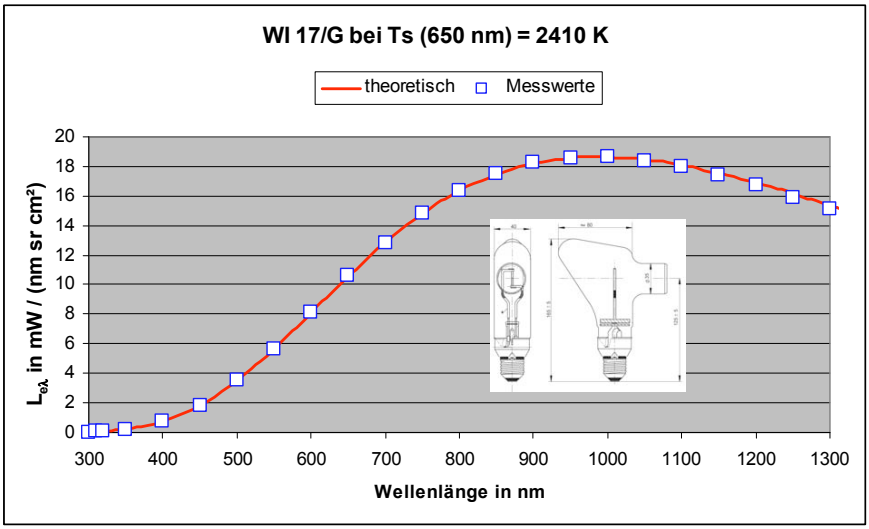


Abb. 4: OSRAM WI 17/G: Berechnete und gemessene spektrale Strahldichtewerte für einen Lampenbetrieb bei Ts (650 nm) = 2410 K

2.5 Das „kalkulierbare“ Glühlampennormal

Glüh- und Halogenglühlampen sind in ihren elektrischen und lichttechnischen Eigenschaften sehr gut bekannt. So können z. B. für Strom- und Spannungsvariation, Lebensdauererwartungen und Lichtstromänderungen mit den elektrischen Parametern mit Hilfe der Betriebsgesetze für Glühlampen und Halogenglühlampen berechnet werden [7, 8].

Für einen höheren metrologischen Anspruch und dem dafür notwendigen Verfahren zur Korrektion von Betriebszuständen wird, für kleine Abweichungen der gewünschten Einstellung, über einen Potenzansatz auf vorgegebene Nominalwerte korrigiert (Kennlinienverfahren [9]).

Glühlampen zeigen ein definiertes und vorhersagbares Alterungsverhalten z. B. in der Änderung der Lampenspannung oder der Lichtstärke mit der Brenndauer. Dies bedeutet, dass diese Lampeneigenschaften zum Einen korrigiert werden können, zum Anderen es möglich ist, auch eine klare Bedingung zum Re-Kalibrierintervall daraus abzuleiten.

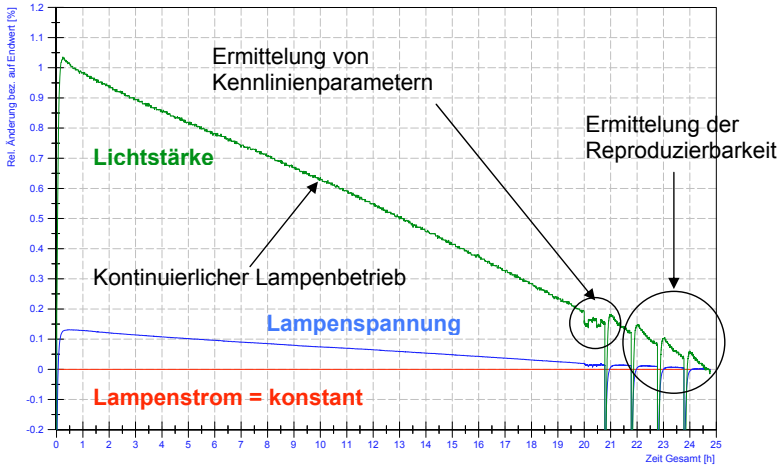


Abb. 5: Beispiel WI 41/G – Typisches Alterung- /Konditionierungsdiagramm: Zeitabhängige Änderung von Lampeneigenschaften (Alterung) bei vorgegebenen Betriebsbedingungen.

Die spektral kontinuierliche, „lückenlose“ Emission von Glühlampen ermöglicht zusätzlich die anschauliche Kennzeichnung von Lampen durch die Verhältnis- oder die Verteilungstemperatur [10], die auf die berechenbare Strahlungsemission eines Planckschen Strahlers bezogen wird.
All diese bekannten Eigenschaften ermöglichen bei der Anwendung von Transfernormalen eine sehr gute Aussagesicherheit, da durch Plausibilitätsüberlegungen das erhaltene Ergebnis einfach verifiziert werden kann.

3 Forderungen an neuartige Transfernormale (strahlerbasiert)

Beruhend auf den Erfahrungen mit und den Eigenschaften von Glühlampen-Normalen lassen sich für zukünftig zu entwickelnde LED-Normale (als weiße Lichtquellen) folgende Forderungen an deren Eigenschaften ableiten und nach dem heutigen Kenntnisstand bewerten:

- **Transportsicherheit:** Ist wegen der Bauart und verwendeten Technologie gegeben.
- **Unempfindlichkeit gegen Temperatur- und Feuchteschwankungen:** Die Strahlungsemission von LEDs ist stark temperaturabhängig. Hier sind aufwendige Kühlkörper erforderlich, die sowohl die Anwendung (zum Teil sehr groß) als auch die Messtechnik (Störkörpereinfluss) verfälschen beziehungsweise aufwendig korrigiert werden müssen.
- **Lagerbeständigkeit (keine Veränderung bei Nichtgebrauch):** Hier ist noch der Nachweis zu führen, da verwendete Kunststoffkomponenten bereits im Herstellungsprozess Fehlstellen aufweisen können, die dann katalytisch durch Umwelteinflüsse degradieren und damit optische Eigenschaften verändern

- **Ausreichend vollständig zu beschreibende Nutzungs-/Betriebsbedingungen:** Da für LEDs ein einfacher DC-Betrieb möglich ist, sollten sich hier ausreichend definierte, elektrische Betriebszustände einstellen lassen. Um jedoch große Strahlungsleistungen mit LEDs zu generieren, wird in der Regel Pulsbetrieb angewendet. Dieser erfordert zusätzlich aufwendige Vorschaltelektronik, die dann mit der LED zusammen als eine Systemeinheit betrachtet und charakterisiert werden muss.
- **Wiederholbare Darstellung der repräsentierten Einheit:** Ist aufgrund der erreichbaren LED-Lebens- und Nutzungsdauer gegeben.
- **Technisch einfach durchzuführender und reproduzierbarer Betrieb:** Möglich, wenn die Betriebsbedingungen, das thermische Stabilisieren und der messtechnische Aufbau ausreichend reproduzierbar durchzuführen sind.
- **Ökonomisch durchführbare Adaptation an die jeweiligen Laborbedingungen:** Bedingt eine neue Halter- und Adaptergeneration. Derzeit sind aber aufgrund von fehlender Standardisierung der geometrischen Abmessungen nur aufwendige Einzellösungen möglich.
- **Kostengünstig und verfügbar:** Da es sich um eine neue Technologie handelt, sind die Stückkosten noch hoch und die Verfügbarkeit oftmals eingeschränkt.
- **Wieder verwendbar (erneut/mehrmals kalibrierbar):** Möglich.
- **Für den vorgesehenen Zweck geeignete Abstrahlcharakteristik:** Möglich, jedoch ist hier noch Entwicklungsaufwand für geeignete Optiken anzusetzen.
- **Bereitstellung eines geeigneten Dynamikbereichs für die Einheit:** Erfordert derzeit geeignete elektronische Betriebsgeräte, die eine daraus kombinierte Lichteinheit verteuern und zu erhöhten messtechnischen Aufwand bezüglich elektrischen Größen führen.
- **Kontinuierliche „lückenlose“ spektrale Verteilung:** Ist derzeit im sichtbaren Spektralbereich durch Leuchtstoffkonversion möglich, aber mit starken Gradienten der Verteilungsfunktion.

4 Detektorbasierte Transfernormale

Detektor-basierte Verfahren sind eine weitere Möglichkeit, die metrologische Rückführung einer Messeinrichtung zu gewährleisten. Hier ist die Verwendung von Strahlungs- bzw. Lichtnormalen im Allgemeinen auf die Staatsinstitute beschränkt (Kryoradiometer, Sekundärnormale der Staatsinstitute). Dazu wird in aufwendigen Verfahren die absolute (integrale) Detektorempfindlichkeit z. B. in Ampere/Lumen und zusätzlich die relative Empfindlichkeit des Detektors bestimmt, welche zur Korrektur von systematischen Abweichungen, die durch andere als bei der Kalibrierung vorliegende Spektralverteilungen verursacht werden, verwendet wird [11]. Diese Verfahren liefern absolut charakterisierte, spektral - integrierend messende Detektoren, die dann unter möglichst ähnlichen geometrischen Bestrahlungssituationen im Mess- und Kalibrierlaboratorien eingesetzt werden können. Dieser Weg ist, da technologisch sehr aufwendig, dadurch auch sehr teuer und wegen der einschränkenden Randbedingungen für den Detektorbetrieb nur bedingt im allgemeinen Laborbetrieb einsetzbar.

5 „Verfrühter“ Nachruf und Chance

Die Glühlampen – Technologie begleitet und beeinflusst die Licht- und Strahlungsmesstechnik seit rund 100 Jahren. Die daraus entwickelten Verfahren zur Kalibrierung von Messeinrichtungen sind bekannt, eingeführt und anerkannt. Sie ermöglichen die Beurteilung von jeglicher Art von spektralen und geometrischen Strahlungsverteilungen und sind somit auch für alle Lampentechnologien anwendbar. Das

metrologische System der Labore weltweit und auch das der Staatsinstitute sind darauf aufgebaut und untereinander durch internationale Vergleiche abgestimmt.
Detektorbasierte Verfahren existieren für spezielle Anwendungen auf aufwendigem und teurem Technologieniveau, LED-Normale für weiße Lichtquellen werden gerade angedacht und theoretisch konzipiert.
Die Abkehr von der Glühlampentechnologie und die rasante Entwicklung der SSL-Lichtquellen lässt Bedenken entstehen, dass die Glühlampe als UV-VIS- und IR-Strahler mittelfristig nur noch eingeschränkt, und langfristig überhaupt nicht mehr zur Verfügung stehen wird. Aus der Sicht eines Mess- und Kalibrierlabors kann man derzeit, aus ökonomischen und metrologischen Erwägungen heraus nur hoffen und wünschen: „Lang lebe die Glühlampe“, d. h. wenigstens so lange, bis der sinnvolle und geordnete Übergang hin zur neuen SSL-Technologie, bei wenigstens nicht größer werdenden Messunsicherheiten, vollzogen werden kann.

6 Literaturhinweise

[1] Gert Wemmer: LiTG-Schrift „Klimawandel und Energieeffizienz, Konsequenzen für die Glühlampe“ 2009
[2] E. B.Power: “Precision Incandescent Secondary Standard Lamps”, G.E.C. Journal, Vol 33, No 3, 1966, pages 127 - 132
[3] CIE 149:2002 The use of tungsten filament lamps as secondary standard sources
[4] CIE 15:2004 Edition. 3- Colorimetry
[5] J. Metzdorf, A. Sperling, S. Winter, K.-H. Raatz und W. Möller, “A new FEL-type quartz-halogen lamp as an improved standard of spectral irradiance”, Metrologia, Vol. 35, pages 423-426, 1998
[6] DIN 5031 Teil 2 „Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik, Strahlungsbewertung durch Empfänger“, 1982
[7] H.-J. Helwig: „Betriebsgesetze der Glühlampe“, Lichttechnik 2, Nr, . 2, Seiten 47-48 (1950)
[8] G. M. Neumann: „Betriebsgesetze der Halogenglühlampe“, Lichttechnik 21, Nr. 6, Seiten 63A – 65A, (1969)
[9] CIE 198:2011 „Determination of measurement uncertainties in photometry“
[10] CIE 114:1994, “CIE Collection in Photometry and Radiometry – 114/4 – Distribution Temperature and Ratio Temperature”
[11] Y. Ohno, C. L. Cromer, J. E. Hardis und G. Eppeldauer: „ The Detecor-Based Candela Scale and Related Photometric Calibration Procedures at NIST“, Journal of the Illuminating Engineering Society, USA (Winter 1994), pages 89-98
[12] J. C. De Vos: “The emissivity of tungsten ribbon”, Dissertation, Freie Universität Amsterdam (1953)

Über die Alterung von Hochleistungs-LEDs: Verfahren, Aufbau, Alterungsmechanismen

Prof. Dr.-Ing. Hartmut Kopp, Hochschule Hannover, Labor für Lichttechnik, Ricklinger Stadtweg 120 30459 Hannover; Dipl.-Ing. Hristo Ganev TU Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Hochschulstr. 4a 64289 Darmstadt

1 Motivation für Alterungsuntersuchungen an Hochleistungs-LEDs

Die Zukunft der Beleuchtungstechnik wird untrennbar mit der Schlüsseltechnologie Leuchtdiode verbunden sein. Hocheffiziente, kommerziell verfügbare weiße Leuchtdioden weisen zurzeit bereits Lichtausbeuten von über 100 lm/W auf, 200 lm/W scheinen in greifbare Nähe zu rücken. Der heutige LED-Markt ist von einer Fülle von LED-Herstellern und LED-Typen gekennzeichnet. In einem Evolutionsprozess der Beleuchtungstechnik hatte sich die Leuchtenindustrie erfolgreich auf die Technik „konventioneller" Strahlungsquellen eingestellt, wie verschiedene Bauformen von Glühlampen, Nieder- und Hochdruckentladungslampen. Mit dem Einsatz der LED steht die Leuchtenindustrie nun mitten in einem herausfordernden Konversionsprozess, den die Ergebnisse des hier vorgestellten Forschungsprojektes, gefördert vom Bundeswirtschaftsministerium, flankieren und befördern sollen. Bild 1 zeigt die Zusammensetzung der Forschungsgruppe.

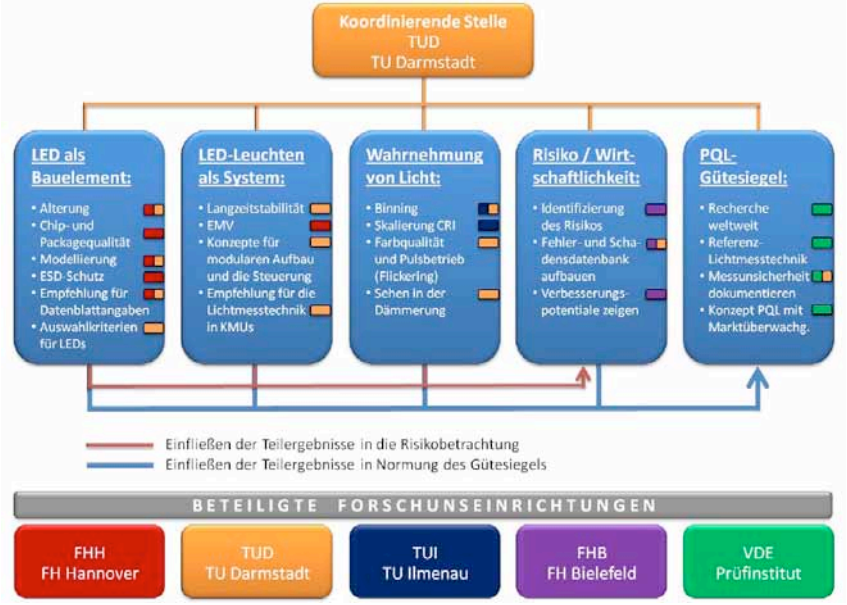


Bild 1: Struktur und Arbeitsbereiche der PQL-Forschungsgruppen

In den dargestellten Segmenten sollen die Anforderungen an ein Qualitätslabel für hochqualitative LED-Leuchten (PQL) definiert werden. Damit sollen für die Hersteller

einzuhaltende Qualitätsstandards vorgegeben werden und zugleich für den Verbraucher ein Erkennungssymbol für eine zuverlässige, langlebige, energetisch und lichttechnisch dem Stand der Technik entsprechende LED-Leuchte geschaffen werden.

Für die Planung und den Betrieb von LED-Leuchten steht a) die Lichtstromabnahme mit zunehmender Betriebsdauer im Vordergrund (Degradation), nachrangig scheint b) der Ausfall (Mortalität) auf Grund funktionaler und konstruktiver Eigenarten der LED zu sein. Unter Berücksichtigung der Vorgaben für die Planung und den Betrieb von Beleuchtungsanlagen für Arbeitsstätten [1], [2], [3] müssen jedoch beide Aspekte a) und b) berücksichtigt und modelliert werden, damit der Betreiber der Beleuchtungsanlage einen geeigneten Wartungsplan [1] aufstellen und umsetzen kann, d.h. auch den Zeitpunkt des Unterschreitens des Wartungswertes der Beleuchtungsstärke vorhersagen. Der Austausch degradierter oder defekter Leuchtmittel in konventioneller Beleuchtungstechnik war bisher problemlos möglich; es ist bekannt, dass bei LED-Systemen dies sowohl aus technischen als auch aus Kostengründen nicht sinnvoll ist und andere Wege beschritten werden müssen.

Das in [8] beschriebene Verfahren zur Auswertung von Alterungsversuchen mit dem Ziel der Prognose des Alterungsverhaltens weist mit der Begrenzung von Prognosezeiträumen auf die maximal sechsfache Versuchszeit folgendes Problem auf: Ein anzugebender Wert für die mögliche Lichtstromabnahme innerhalb von z.B. 48.000 h setzt einen vorangegangenen kontrollierten Alterungsversuch von 8000 h plus 1000 h Voralterung voraus, also einen Zeitraum von über einem Jahr. Dies ist bezogen auf eine wirtschaftlich sinnvolle Produkteinführungszeit (Time to Market) nicht umsetzbar. Hinzu kommt, dass Hochleistungs-LEDs in kürzer werdenden Zyklen angekündigt und vom Markt genommen werden.

2 Alterungsmechanismen

In Bild 2 sind herstellungs- und anwendungsbedingte Einflussgrößen auf das elektrische und lichttechnische Betriebsverhalten der LEDs untergliedert.

In Bild 2 sind herstellungs- und anwendungsbedingte Einflussgrößen auf das elektrische und lichttechnische Betriebsverhalten der LEDs untergliedert. Sie unterscheiden sich durch ihre Komplexität grundlegend von denen, die konventionellen Leuchtmittel zu eigen sind. Über viele der in Bild 2 aufgeführten Alterungsmechanismen wurde bereits berichtet. Sie unterscheiden sich durch ihre

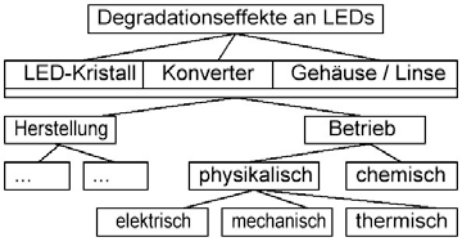


Bild 2: Quellen von Degradationseffekten an LEDs

Komplexität grundlegend von denen, die konventionellen Leuchtmittel zu eigen sind. Über viele der in Bild 2 aufgeführten Alterungsmechanismen wurde bereits berichtet.

Da die verschiedenen Ursachen von Degradationseffekten nach Tab. 1 größtenteils jedoch nicht voneinander entkoppelt sind und zugleich eine stetig wachsende Vielfalt von LED-Varianten am Markt verfügbar ist, ergibt sich eine fast unüberschaubare Variabilität von Parametern bei Untersuchungen. Besondere Aufmerksamkeit muss bei Anwendungen in der Beleuchtungstechnik zwangsläufig den Degradationseffekten zukommen, die sich direkt auf das radiometrische Verhalten der LED auswirken, wie z.B. Abnahme des Lichtstroms, Verschiebung des Farborts und Veränderung des allgemeinen Farbwiedergabeindex Ra. Aktuell kommt in diesem Zusammenhang zwei Aspekten besondere Bedeutung zu, der Wärmeabfuhr zusammen mit der Temperaturabhängigkeit des Wärmewiderstands R_{thJS} und bei weißen LEDs den chemischen und thermischen Einwirkungen auf den Leuchtstoff.

Kristall	Gehäuse/Kristallkontaktierung thermische Kontaktierung	Leuchtstoff
Thermischer Stress Mechanischer Stress Chemische Einwirkungen Bildung deep levels Metalldiffusion Überstrom/Überspannung/ESD Sperrstrombelastung Kristallisationsvorgänge	Delamination Überstrom / Überspannung ESD Bildung von Whiskers Elektromigration Current Crowding	Chemische Einwirkung Strahlungseinwirkung Thermische Einwirkung

Tabelle 1: Ursachen von Degradationseffekten an LEDs

Es ist bekannt, dass LEDs mit unvermeidbaren Toleranzen der photometrischen und elektrischen Eigenschaften produziert werden; dies zieht zurzeit zwangsläufig einen aufwändigen und kostenintensiven Binning-Prozess nach sich. Nicht untersucht ist bisher die Frage, ob alle Bins vergleichbare Alterungs- und Degradationseffekte aufweisen.

3. Verfahren zur Alterung von LEDs

Schon immer wurden aus Gründen der Qualitäts- und Zuverlässigkeitssicherung elektronischer Bauteile und Systeme standardisierte Bauteiluntersuchungen durchgeführt und publiziert, z.B. [4], [5]. Es ist üblich, die Lebensdauer in B_q-Werten anzugeben; der Index q steht für den prozentualen Ausfallwert des Bauteils nach x Stunden. Diese Angabe ist für Leuchtdioden, die gemäß [1] Verwendung finden, nicht ausreichend. Hier wird zusätzlich ein L_m-Wert benötigt; der Index m steht für den prozentualen Lichtstrom, den die LED nach y Stunden noch abgibt. Aussagen zur Vorhersage des Degradationsverhaltens von LEDs sind nur im Zusammenhang mit zugehörigen Versuchsbedingungen sinnvoll interpretierbar. Angaben aus Datenblättern der Hersteller sind in der Regel wegen der Fülle von extrinsischen Einflussgrößen in Verbindung mit gewünschten Betriebsdauern zwischen 20.000 h und 50.000 h nicht hilfreich, da sie sich häufig auf Kristalltemperaturen um 25 °C und klinisch reine Umgebungen beziehen. Beides ist bei technischen Leuchten nicht gegeben. In Ermangelung europäischer Vorgaben zur anwendernahen Ermittlung von L_m-Werten haben u.a. die IESNA (Illuminating Engineering Society of North America) die Standards [6], [7], [8] und [9] in Kooperation mit namhaften LED-Herstellern erarbeitet. Diese sehen vor, dass wegen des teils untypischen Alterungsverhaltens in den ersten 1000 Betriebsstunden LEDs grundsätzlich vor Beginn von Alterungsmessungen 1000 Stunden vorzualtern sind. Nach dieser Voralterung sollen die Messreihen aufgenommen werden, z.B. Lichtstrom, Durchlassspannung und

Farbort. Weitere Vorschläge sind [10] bis [12] zu entnehmen. In diesem Forschungsvorhaben sollen u.a. auch Wege gesucht werden, möglichst zeitnah belastbare Aussagen über das Alterungsverhalten von LEDs zu bekommen, falls möglich auch aus den Daten des Voralterungszeitraums.

4 Versuchsaufbau und Versuchsmesstechnik

4.1 Hochschule Hannover

Die an der Hochschule Hannover aufgebauten Versuchsstände mit den LEDs nach Tab. 2 entsprechen den Vorgaben nach [6] bis [8]. Die LED-Alterung erfolgt in Gruppen zu je 20 LEDs bei den Temperaturen 55 °C, 85 °C und 95 °C. Die teilweise unerwartet hohen Wärmewiderstände $\boldsymbol{R}_{\mathrm{thJS}}$ erfordern eine gewisse Sicherheitsreserve; die höchste Temperatur wird daher so gewählt, dass die von den Herstellern spezifizierte maximale Kristalltemperatur nicht erreicht wird. Alle Messungen an LEDs werden sowohl bei der o.g. jeweiligen Alterungstemperatur als auch bei 25 °C durchgeführt.

	LED-Typ					
I in mA	CREE XP-G KW	CREE XP-G WW	NICHIA NVSW219 AT	NICHIA NVSW219 AT-H3	CREE - XPEROY-L1-0000-00B01	
350	x	x	x	x	x	x
700	x	x	x	x	x	
1000	x	x	x	x	x	

Tabelle 2 Testkonditionen und Verteilung der LEDs im Alterungsaufbau an der Hochschule Hannover

Thermischer Betrieb und Messtechnik: Die zu alternden LEDs sind auf spezielle Metallkernplatinen gelötet, die mit Hilfe von Schraubverbindungen gut wärmeleitend auf Temperierplatten montiert sind. Die Temperierplatten bestehen aus einer Aluminiumlegierung und weisen gefräste Kanäle auf; durch diese Kanäle wird eine Temperierflüssigkeit gepumpt, die in einem Badthermostat auf die erforderliche Temperatur erwärmt oder gekühlt wird. Der Temperatur-Istwert nach [7] wird mit einem Pt100-Sensor direkt an einer LED gewonnen. Mit Hilfe einer optimierten Kaskadenregelung können alle LEDs auf einer Temperierplatte mit einer Toleranz ≤ 0,5 K vom Sollwert bei der gewünschten Temperatur betrieben werden. Alle Temperaturen werden zyklisch und automatisch von einem separaten Mess- und Protokolliersystem überwacht. In Bild 3 ist einer der Versuchsstände dargestellt. Die Messung der Kristalltemperatur erfolgt indirekt in einem modifizierten Verfahren nach [13]. Mit dieser Temperatur wird der reale Wärmewiderstand R_{thJS} berechnet.

Elektrischer Betrieb und Messtechnik: Im Alterungsbetrieb werden jeweils fünf in Reihe geschaltete LEDs aus einer hochgenauen Konstantstromquelle versorgt. Die Konstantstromquellen werden aus einem 24-V-Zwischenkreis gespeist. Zyklisch und automatisch werden die Ströme messtechnisch überprüft und protokolliert. Die LEDs werden aus einem Dualsourcemeter versorgt und die Messung elektrischer Basiskenndaten der LEDs erfolgt mit einem Switchmultimeter. Aus gemessenen Daten werden LED-Parameter wie z.B. Diodenkennlinie, Sättigungssperrstrom, statische Bahnwiderstand, Idealitätsfaktor und Kristalltemperatur berechnet.

Radiometrische und photometrische Messtechnik: Das Strahlungsspektrum der LEDs wird mit einer 5-cm-Ulbricht-Kugel und einem Zeiss-Spektrometer erfasst. Die Ulbrichtkugel ist mit einem Adapter ausgestattet, der die reproduzierbar positionsgenaue Platzierung der LED vor der Kugel sichert. Aus dem Spektrum werden Strahlungsleistung, Lichtstrom, ähnlichste Farbtemperatur, Farbkoordinaten und der allgemeine Farbwiedergabeindex Ra berechnet.

Bild 3: Ein Versuchsstand der Hochschule Hannover zur Alterung von Hochleistungs-LEDs

4.2 TU Darmstadt

Der LED-Alterungsaufbau am Fachgebiet Lichttechnik der TU Darmstadt ist an die Kriterien der IESNA LM-80-08 [7] angelehnt. Die LEDs werden bei 55 °C, 85 °C und 95 °C gealtert. Die LEDs werden aus hochgenauen Konstantstromquellen betrieben, die Temperatur am Solderpoint wird geregelt. Die Ausfalldetektion erfolgt vollautomatisiert.
In Tabelle 3 sind die zu alternden LED-Typen aufgeführt. In der Mehrzahl sind es weiße LEDs mit der ähnlichsten Farbtemperatur T_{CC} von 4000K und einem Farbwiedergabeindex Ra > 80.

		LED-Typ					
		Samsung 2323	Rebel ES weiß	Rebel ES blau	Osram Square weiß	Osram Square blau	Citizen CL-L233
Betriebsstrom in mA	60	x					
	150	x					
	350		x		x		
	700		x	x	x	x	x
	1000		x		x		
	1200						x

Tab. 3: Testkonditionen und Verteilung der LEDs im Alterungsaufbau am FG Lichttechnik der TU Darmstadt

Die LEDs wurden aus drei verschiedenen Leistungsklassen ausgewählt, die heute in der modernen Beleuchtungstechnik verwendet werden:

- Midi-Power < 0,5W: Samsung 2323
- High-Power < 5 W: Philips Rebel ES, Osram Square

- Chip-on-Board LED: Citizen-Modul CL-L233

Parallel zu den weißen werden auch blaue LEDs gealtert, um die Degradation des Leuchtstoffs separat ermitteln zu können.

Der Messaufbau am FG Lichttechnik der TU Darmstadt ermöglicht die präzise und reproduzierbare Messung an den zu testenden LEDs. Die Erfassung der lichttechnischen Größen erfolgt in einer 30-cm-Ulbricht-Kugel und einem Array-Spektrometer CAS 140. Die elektrischen Parameter werden mithilfe eines 4-Quadrant Präzisionsnetzteils erfasst. Alle Messungen erfolgen im eingeschwungenen Zustand und Solderpoint-Temperatur von 25 °C, die durch aktive Regelung konstant gehalten wird. Neben den elektrischen und den lichttechnischen Größen wird die Ermittlung des thermischen Widerstandes der LEDs und seine Abhängigkeit vom Alterungszustand und dem LED-Aufbau untersucht.

Während der ersten 1000 Stunden finden vier Messungen statt, um den Prozess der LED-Seasoning detaillierter zu untersuchen. Nachfolgend werden die LEDs alle 1000 Stunden gemessen.

5 Zusammenfassung / Ausblick

Das Ziel der Alterungsaufbauten/-versuche an beiden Forschungseinrichtungen, anwendungsorientierte und reproduzierbare Daten für die LED-Leuchtenhersteller zu generieren, wird erreicht. Die während der Aufbauphase gewonnenen Kenntnisse über die möglichen Ursachen für vorzeitigen Ausfall bzw. beschleunigte Alterung von LEDs werden schon heute von führenden Leuchtenherstellern in die Praxis umgesetzt. Die Ergebnisse der Untersuchungen stärken die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Leuchtenindustrie und tragen dazu bei, dass das Vertrauen der Leuchtenanwender in die LED-Technik gestärkt wird. Zugleich liefern die Untersuchungen neue Informationen für europäische Normungs- und Standardisierungsvorhaben im Bereich LED-Leuchtmitteln und LED-Leuchten. Ergebnisse der Untersuchungen sollen u.a. in die Definition von Messvorschriften für die Produktbeschreibung und Parameter des o.g. Qualitätslabels für LED-Leuchten einfließen.

6 Literaturverzeichnis

[1]	DIN	DIN EN 12464-1 „Beleuchtung von Arbeitsstätten in Innenräumen“, August 2011
[2]	ISO	ISO 8995/CIE S 008 „Lighting of work places -- Part 1: Indoor”
[3]		ASR 7/3 „Arbeitsstättenrichtlinie Künstliche Beleuchtung“
[4]	IEC TR 62380	Reliability data handbook –. Universal model for reliability prediction of electronics components, PCBs and equipment. First edition 2004-08
[5]	Gottschalk, Arnim:	Qualitäts- und Zuverlässigkeitssicherung elektronischer Bauelemente und Systeme
[6]	IES	LM-79-08: “Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products”
[7]	IES	LM-80-08: “Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources”
[8]	IES	TM-21-11: “Projecting Long Term Lumen Maintenance of LED Light Sources”
[9]	IES	LM-82-12: “Characterization of LED Light Engines and LED Lamps for Electrical and Photometric Properties as a Function of Temperature.”
[10]	Park, Seongchong	Preparation of standard light-emitting diode (LED) for photometric

et al.: measurements by functional seasoning. Metrologica 43 (2006)
[11] Gu, Yimin; Narendran et al.: White LED Performance. Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy NY
[12] Recommendations for Testing and Evaluation White LED Engines und Integrated LED Lamps Used in Decorative Lighting Luminaires. Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, ASSIST Vol. 4, Issue 1, May 2008, Revised April 2009
[13] EIA/JEDEC Standard JESD51-51 - April 2012: Implementation of the Electrical Test Method for the Measurement of Real Thermal Resistance and Impedance of Light-Emitting Diodes with Exposed Cooling

7 Danksagung

Das Labor für Lichttechnik der Hochschule Hannover und das Fachgebiet Lichttechnik der TU Darmstadt bedanken sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie für die Förderung des Forschungsprojekts Performance Quality Label für LED-Leuchten (PQL), in dessen Rahmen die hier vorgestellten Untersuchungen durchgeführt werden.

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Die Vorteile homogen abstrahlender LED Light Engines für Leuchtenhersteller

Hubert Ott
Director, R&D System & Platform Engineering – LED Spotlight & Downlight
OSRAM AG
Wernerwerkstraße 2
D-93049 Regensburg
hubert.ott@osram.com

1. Einleitung

Durch die rasante Effizienzsteigerung der Leuchtdioden (LED) während der letzten Jahre, sind diese nun nach der Automobilindustrie, Telekommunikation und Unterhaltungselektronik auch in der Allgemeinbeleuchtung angekommen und haben dort inzwischen einen festen Platz eingenommen. Aufgrund ihrer kleinen Bauteilabmessungen bieten sie größte Flexibilität und erlauben gar die Realisierung von Anwendungen, die mit traditionellen Lichtquellen nie umgesetzt werden konnten. Flexibilität im Bezug auf LEDs bedeutet auch vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten. Auf unterschiedliche Art und Weise können ähnliche oder gleiche Beleuchtungsaufgaben oder Lampenentwicklungen realisiert werden. Um dieser neuen Designfreiheit gerecht werden zu können, ist es unerlässlich, sowohl die Anforderungen der Anwendung, als auch die Gestaltungs- und Einsatzmöglichkeiten der Halbleiterbauelemente verstanden zu haben. Wie dieses Verständnis bei LED Light Engines bzw. Lampen insbesondere für Spotlights zu Produktverbesserungen und damit echtem Kundennutzen geführt hat, beschreibt dieser Artikel.

2. Herausforderungen für Spot-Leuchten und Spotlight-Engines

Spot-Leuchten werden häufig in Verkaufsräumen eingesetzt, in denen nicht nur die hohe Lichtqualität bezüglich Farbwiedergabe, Farbtreue und Ausleuchtungs-homogenität eine große Rolle spielen, sondern auch der Einsatz von unterschiedlichen Abstrahlwinkeln. Je nach Ausleuchtungsanforderungen können Abstrahlwinkel von etwa 10° bis etwa 60° gefordert sein. Der Lichtstrom variiert dabei von 800lm bis 5000lm, teils 7000lm. Die Herausforderung für den LED-Lampenhersteller (LED Light Engines) ist es, Light Engines mit hohem Lichtstrom anzubieten, der es gleichzeitig erlaubt, solch unterschiedliche Abstrahlwinkel zu realisieren. Diese Anforderung wird umso schwieriger, je enger der Abstrahlwinkel werden soll. Bei engen Abstrahlwinkeln spielen die abbildenden Eigenschaften des Reflektors eine große Rolle und bilden somit die Lichtquelle partiell oder ganz in der Projektionsebene ab. Konkret bedeutet das, wenn eine Lichtquelle aus einzelnen Lichtpunkten zusammengesetzt ist, dann können diese Lichtpunkte unter Umständen in der Projektionsebene, z.B. an der beleuchteten Wand, als Licht- oder Farbflecken,

oder als Lichtringe wahrgenommen werden. Diese Effekte würden den Erwartungen des Anwenders bezüglich Ausleuchtungs-homogenität klar widersprechen.

Ein einzelner LED-Chip emittiert nicht ausreichend viel Licht, um den Lichtstromanforderungen einer kompletten Spot-Leuchte zu entsprechen. Daher müssen aus Sicht des Lampenherstellers mehrere LEDs oder LED-Chips gebündelt werden. Die Art und Weise wie diese „Bündelung“ umgesetzt wird, entscheidet darüber, wie leicht ein Leuchtenhersteller die LED-Lampe bzw. Light Engine anwenden kann und wie gut damit die Ausleuchtungsqualität dargestellt werden kann.

3. Vergleich der PrevaLED Core Generationen

3.1 PrevaLED Core – 1. Generation

PrevaLED Core ist eine LED-Lampe für Spot-Leuchtenhersteller. In der ersten Generation wurde das Produkt zwischen 800lm und 3000lm angeboten, mit Farbtemperaturen von 3000K bis 4000K und mit einem Farbwiedergabeindex von 80 und 90. Die Lichtpakte dieser Produktgeneration wurden durch Cluster von einzelnen Hochleistungs-LEDs erreicht. Siehe dazu Abbildung 1 und 2.

Abb. 1: PrevaLED Core HD (CRI90)

Abb. 2: PrevaLED Core ECO (CRI80)

Alle diese Produkte haben gemeinsam, dass der Anwender, bzw. der Leuchtenhersteller, für eine gute Lichtmischung Sorge tragen muss. Wenn diese Lichtmischung nicht ausreichend durchgeführt wird, kann es zu oben beschriebenen Abbildungsfehlern bzw. Abbildungseffekten kommen. Durch facettierte und/oder aufgeraute Reflektoren, kann die Farbmischung verbessert werden. Die besten Ergebnisse erzielt man jedoch durch den Einbau von Diffusoren, die das Licht sehr gut mischen und damit jegliche negative Effekte vermeiden. Leider erzeugt jede Lichtmischung dieser Art Verluste und geht damit zu Lasten der Systemlichtausbeute.

Die Bilder 3 bis 4 illustrieren am Beleuchtungsszenario einer weißen Wand, wie unterschiedlich diverse Reflektoren die Lichtquelle abbilden. Die Wahl und Ausgestaltung des Reflektors nimmt großen Einfluss auf die Qualität des Beleuchtungsszenarios.

Bild 3 zeigt, der Einsatz eines einfachen, gedrückten Reflektors kann sowohl Farbflecken als auch Helligkeitsunterschiede bzw. Farb- oder Lichtringe in den Abbildungen erzeugen.

Der facettierte Reflektor in Bild 4 zeigt eine deutliche Verbesserung der Abbildungsqualität.

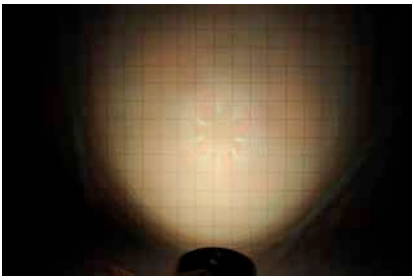


Abb. 3: Einfacher Reflektor

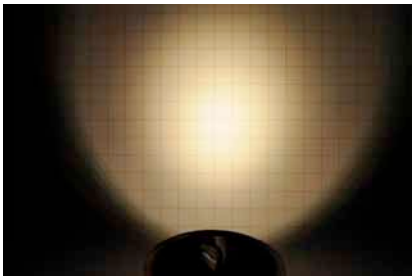


Abb. 4: Facettierter Reflektor

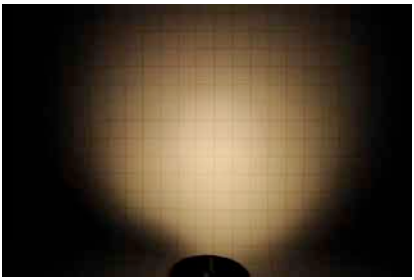


Abb. 5: Einfacher Reflektor und Light Engine mit diffuser Kappe

Der Aufsatz einer diffusen Kappe, wie sie OSRAM als Accessoire anbietet, mischt das Licht perfekt zu einer hochqualitativen, makellosen Abbildung, wie in Bild 5 zu erkennen ist. Dieser Schritt reduziert, je nach Lichtmischung, die Systemeffizienz bis um etwa 15%. Eine technische Gegenüberstellung wird in Abschnitt 5 (Zusammenfassung) dargestellt.

3.2 PrevaLED Core – 2. Generation

Um dem Leuchtenhersteller die Arbeit mit LED Light Engines leichter zu machen, setzt die zweite Generation der PrevaLED Core (Z2) statt diskreten Einzel-LEDs sogenannte CoB-Produkte ein. Der Vorteil der CoB-Produkte gegenüber Einzel-LEDs ist, dass das Licht in der Lampe als homogener Leuchtfleck erscheint und damit die oben beschriebene Auflösungsproblematik der Einzellichtpunkte löst. Der Leuchtenhersteller kann damit auch tolerante und kostengünstige Reflektoren einsetzen und muss nicht gesondert über Lichtmischungen nachdenken. Auf diese

Weise reduziert sich die Anwendungskomplexität des Leuchtenherstellers entscheidend und verbessert damit die Produkteigenschaft der PrevaLED Core wesentlich. Auch die PrevaLED Core Z2 ist im Bereich von 800lm bis 5000lm, von 2700K bis 4000K, mit Farbwiedergabeindex 80 und 90 und mit passenden Vorschaltgeräten verfügbar. Siehe erläuternd Bild 6 und 7.

Abb. 6: PrevaLED Core Z2

Abb. 7: PrevaLED Core Z2 - Derivate

In den Bildern 8 und 9 sieht man wieder am Beleuchtungsszenario einer weißen Wand, dass der Einsatz unterschiedlicher Reflektorarten keinen Einfluss auf die Abbildungsqualität bezüglich Lichtflecken oder Lichtringe hat. Der Reflektor erfüllt lediglich die Aufgabe der Lichtverteilung und des Abstrahlwinkels, aber nicht mehr die Funktion der Lichtmischung. Diese passiert bereits in der Light Engine bzw. LED-Lampe.

Bild 8 zeigt die Beleuchtungshomogenität mit einem einfachen Reflektor und Bild 9, die eines facettierten Reflektors. Die Abbildungsqualität lässt sich nicht mehr unterscheiden und erweitert damit in ausgezeichneter Weise die Einsatzmöglichkeiten der Lampe.

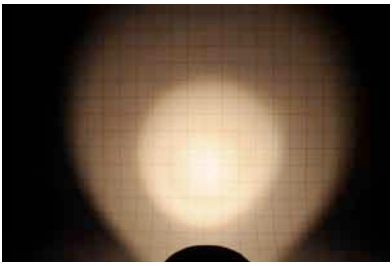


Abb. 8: Einfacher Reflektor

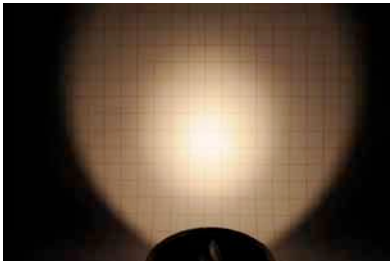


Abb. 9: Facettierter Reflektor

Leuchtenentwicklungen mit der PrevaLED Core werden stark vereinfacht und garantieren durch die Zhaga-Kompatibilität auch die notwendige Lampenverfügbarkeit über viele Jahre.

4. Zhaga-Zertifizierung

Die PrevaLED Core ist eines der ersten Produkte in der Geschichte, das eine Zhaga-Zertifizierung erhalten hat und damit alle Zhaga-Anforderungen erfüllt. Daraus ergeben sich zahlreiche Vorteile für den Anwender.

4.1 Lampenverfügbarkeit über viele Jahre

Eine Leuchte im Portfolio eines Leuchtenherstellers kann je nach Typ bis zu 20 oder gar 30 Jahre bestehen. Die Lebensdauer einer LED im Produktportfolio eines LED-Herstellers hingegen ist wesentlich kürzer. Diese Tatsache gründet darin, dass sich die LED-Technologie noch über die nächsten Jahre hinaus weiterentwickeln wird. Daraus resultiert der Anspruch einer längerfristigen Lieferfähigkeit von standardisierten Produkten, die von unterschiedlichen Herstellern bezogen werden können. Liefersicherheiten und Lieferfähigkeiten können für Leuchtenhersteller klare Kostenvorteile bedeuten.

4.2 Reduzierte Entwicklungsaufwendungen

Standardisierte LED-Lampenprodukte mit festen Schnittstellen (mechanisch, optisch, elektrisch, thermisch) verringern den Entwicklungsaufwand der Leuchtenhersteller. LED-Helligkeiten oder LED-Gehäusebauformen ändern sich viel schneller als fertig entwickelte Leuchten. Jede Nachbesserung einer Leuchte ist mit Entwicklungsaufwand verbunden. Dieser Aufwand muss in Form von Entwicklern bereit gestellt werden und/oder in Form von Investitionen, wie Werkzeuganpassungen oder Änderungen von Fertigungsautomaten. Auf alle Fälle beeinflusst dieser Effekt die Wirtschaftlichkeitsrechnung jeder Leuchte. Durch den Einsatz einer standardisierten Light Engine kann dieser Kostenblock minimiert werden.

4.3 Reduzierte Logistikaufwendungen

Die Anwendung einer standardisierten Light Engine stellt sicher, dass diese zu jedem Zeitpunkt mit gleichen Leistungskriterien bestellt werden kann. Dies verringert den Aufwand an Lagerhaltungskosten, weil weniger Einzelposten eingelagert werden und diese Posten nicht kontinuierlich an LED-Helligkeitsgruppen angepasst werden müssen. Auch der Wertverfall der Lagerware kann dadurch einfacher aufgefangen werden. Lagerposten mit Halbleiterprodukten verlieren zum einen relativ schnell an Wert und zum anderen bekommt man in vergleichsweise kurzen Zeitabständen Leistungssteigerungen der Halbleiterkomponenten. Light Engines kontrollieren dieses Problem für den Leuchtenhersteller und stellen dennoch immer gleiche Produktleistungen nach vereinbartem Standard sicher.

4.4 Wettbewerbsfähige Leuchtenlösungen mit grüner Technologie

Das Bekenntnis mehrerer Hersteller zu einem Standard führt zwangsläufig zu kostengünstigen Produkten. Verbunden mit künftig steigenden Volumina werden

standardisierte LED-Lampen sehr kostengünstige LED-Leuchten ermöglichen, die über lange Zeit stabil im Portfolio bestehen können.

5. Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich sagen: Die PrevaLED Core Z2 ist eine LED basierte Lampe für Spotleuchtenhersteller, die ein extrem breites Spektrum an Abstrahlwinkeln ermöglicht und gleichzeitig beste Lichtqualität verspricht. Durch ihre neuartige Architektur werden auch enge Winkel in bester Abbildungsqualität möglich. Darüber hinaus erfüllt sie alle Schnittstellenanforderungen nach Zhaga und bietet alle damit verbunden Vorteile, wie Liefersicherheiten, lange Verfügbarkeiten und kostengünstige Entwicklungen.

Tabelle 1 stellt die Verbesserung des Produkts in der Generationsfolge quantitativ dar.

Produkteigenschaften	Gen1 - Prevaled Core	Gen2 - Prevaled Core Z2	Verbesserung von Gen1 nach Gen2
Effizienz [lm/W] bei 3000K	77	108	40%
Bauteilhöhe	9	7,1	-21%
max. Tc-Temperatur (case temp.)	65	80	23%
Anzahl an Derivate	20	32 (weitere in Entwicklg.)	60%
Abstrahlwinkel	150°	120°	"Standard"
Zhaga-Standard	nein	ja	

Tab. 1: Technischer Vergleich und Verbesserungen der PrevaLED Core Generationen

Analyse des thermischen Degradationsverhaltens von LED Systemen

Manfred Scholdt, Klaus Trampert, Cornelius Neumann

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Lichttechnisches Institut
Engesserstr. 13, D-76131 Karlsruhe

1 Einleitung

Im Rahmen des BMBF Projektes UNILED werden Verfahren entwickelt, mit denen die Lebensdauer von LED Systemen anhand von Kurzzeitmessung abgeschätzt werden kann. Die aktuelle Methode zur Abschätzung der Lebensdauer besteht darin, den Lichtstrom der LED Systeme bis zu 6.000 h bzw. 10.000 h zu messen und die Langzeitdegradation zu extrapolieren [1], [2]. In der Beobachtungsperiode sind teilweise nur geringe Lichtstromdegradationen von weniger als 5 % zu erwarten, was ist in Abb. 1 exemplarisch zu sehen ist. Deshalb besteht die Notwendigkeit, den Lichtstrom der LED Systeme möglichst präzise zu messen, wofür die Sicherstellung eines thermisch stabilen Zustandes die Voraussetzung ist.

Deshalb wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem die thermische Stabilisierung analysiert und. vorhergesagt werden kann. Als Referenz wurden bei den untersuchten Systemen die Stabilisierungszeiten nach den Normen LM-79-08 der amerikanischen IES und der DIN/PAS 62717 der IEC bestimmt und bewertet [3], [1]. Hier zeigte sich, dass die Methode der IES mit bis zu 120 min sehr lange Stabilisierungszeiten benötigt, während die Methode der IEC als Folge ihrer deutlich kürzeren Stabilisierungszeiten von 15 min bis 30 min Abweichungen von bis zu 3,8 % im Maximum erhält. Diese Abweichung liegt deutlich über der von der IEC avisierten Abweichungsschwelle von 1 %.

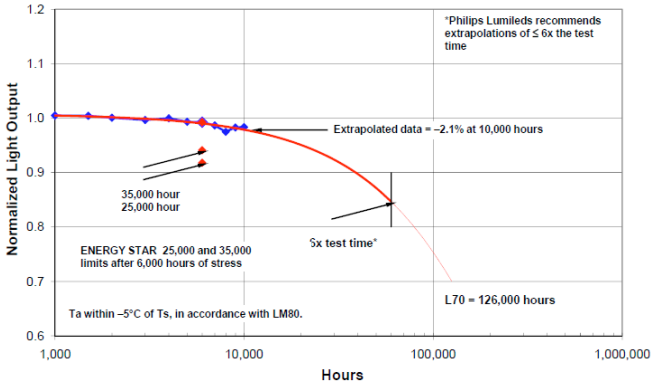


Abb. 1 Messwerte zur Lebensdauerbestimmung einer weißen LUXEON Rebel nach LM-80 [4]. Aus den Messwerten der ersten 10.000 h wird bis auf ein L70 von rund 125.000 h extrapoliert. Zu beachten ist die Streuung der Messwerte im Vergleich ihrer absoluten Höhe und die sich daraus ergebene Unsicherheit der Extrapolation.

2 Grundlagen

2.1 Aktuelle Normen

Die amerikanische und europäische Normungskommission haben definiert, wann ein LED System den thermisch stabilen Zustand eingenommen hat. So verlangt die IES, dass bei einem zu bewertendem System nach 15 min der Lichtstrom gemessen werden soll. Wenn die letzten drei Messungen eine Veränderung aufweisen, die kleiner ist als 0,5 %, dann kann das System als stabil betrachtet werden. Diese Norm bedingt Stabilisierungszeiten von mindestens 30 min, in der Regel ergeben sich deutlich höhere Werte.

Die IEC teilt die Betrachtung ebenfalls in 15 Minutenintervalle ein. Hier muss allerdings in den letzten 5 min eines 15 Minutenintervalls jede Minute ein Messwert genommen werden. Unterscheiden sich die Höchst- und Kleinstwerte dieser Werte um weniger als 1 % von ihrem Mittelwert, gilt das System als stabil. Falls das Kriterium nicht erfüllt wird, muss die Stabilisierung um ein 15 Minutenintervall verlängert werden. Nach dem dritten Zyklus dieser Art, was gleichbedeutend mit 45 min ist, gilt das System in jedem Fall als stabil.

2.2 Thermische Beschreibung eines LED Systems

Zu Beginn der Untersuchung sollte zunächst die Temperatur der LED Systemen zeitabhängig während der Stabilisierungsphase gemessen werden. Dies beinhaltet ein Zeitintervall ab dem Einschalten bis über die Stabilisierung des Systems hinaus, was bei den vermessenen Systemen einige Stunden waren. Allerdings lässt sich die Chiptemperatur bei einer LED schwer messen, ohne den thermischen Pfad deutlich zu verändern oder von einem Messpunkt rückrechnen zu müssen. Aus diesem Grund wurde die Temperatur indirekt über die Messung der Vorwärtsspannung bestimmt, deren Temperaturabhängigkeit man ausnutzen kann. Eine Messung zur Bestimmung dieser Abhängigkeit ist in Abb. 2 zu sehen.

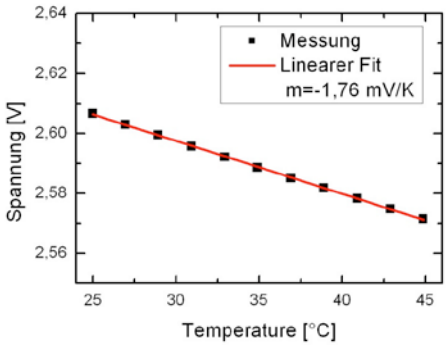
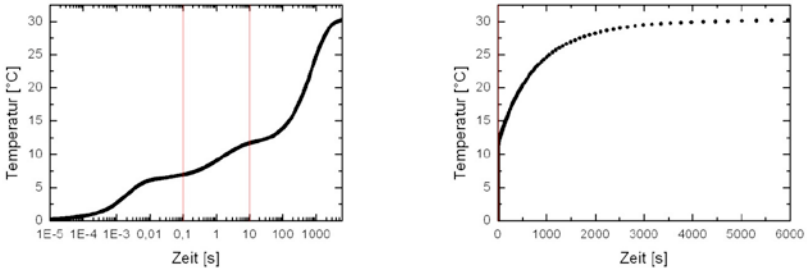


Abb. 2 Gemessen Vorwärtsspannung einer weißen Seoul P4 LED bei einem Strom von 10 mA. Die Vorwärtsspannung verringert sich linear mit einer Steigung von m=1,76 mV/K.

Ein weiterer Vorteil der Temperaturbestimmung über die Vorwärtsspannung besteht darin, dass mit dieser Methode die Temperatur mit einer zeitlichen Auflösung im Mikrosekundenbereich bestimmt werden kann. Eine Temperaturerhöhung einer LED nach dem Einschalten mit dieser zeitlichen Auflösung ist in Abb. 3 in logarithmischer (a) und linearer Darstellung (b) zu sehen. Es zeigt sich, dass sich die Temperatur der LED nicht linear

sondern exponentiell einem stabilen Zustand annähert. Außerdem kann in der logarithmischen Darstellung erkannt werden, dass es Bereiche gibt, in denen sich die Temperatur schnell ändert und welche, in denen die Temperatur eher stabil ist.



a) logarithmische Darstellung b) lineare Darstellung

Abb. 3 Der Temperaturanstieg ΔT einer Seoul P4 LED auf einem Kühlkörper nach dem Einschalten. In der logarithmischen Darstellung (a) können Bereiche mit großer und kleinerer Steigung ausgemacht werden, während die lineare Darstellung (b) nur einen Sprung am Anfang und ein langsames Annähern an die Zieltemperatur auflöst.

Diese verschiedenen Bereiche können aus dem Aufbau des Systems bzw. thermischen Pfads beschrieben werden und repräsentieren die Bauteile LED Chip, thermisches Übergangsmaterial und Kühlkörper. Diese können mathematisch in Analogie zum elektrischen Ersatzschaltbild durch die Werte ihrer thermischen Widerstände und Wärmekapazitäten beschrieben werden, was in Abb. 4 schematisch gezeigt wird.

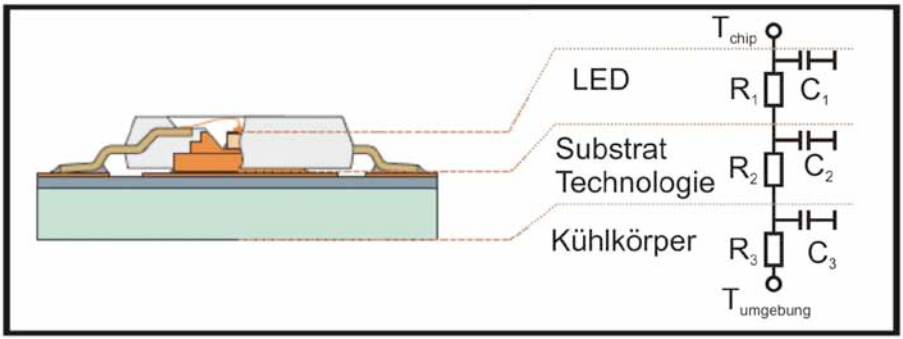


Abb. 4 Der Thermische Pfad einer LED mit der Übertragung der Komponenten ins thermische Ersatzschaltbild. Die Zeitkonstanten der Regionen LED (1), Substrat (2) und Kühlkörper (3) liegen im Bereich von $\tau_1 \approx 10^{-5}$ - 10^{-4} s, $\tau_2 \approx 10^{-1}$ - 10^{1} s und $\tau_3 \approx 10^{2} - 10^{3}$ s. (Bild nach Vorlage aus [5].)

Beschreibt man ein Bauteil aus diesem Netzwerk, in das die thermische Verlustleistung P_{th} eingebracht wird, erwärmt es sich nach dem Einschalten folgendermaßen:

$$\Delta T(t) = P_{th} \cdot R_{th} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1)$$

Hierbei ist τ das Produkt aus thermischen Widerstand R_{th} und Wärmekapazität C_{th}. Zur Beschreibung des gesamten thermischen Pfades kann nun die Lösungen aus der Netzwerktheorie der Elektrodynamik auf das thermodynamische Problem übertragen werden.

Als Lösung des Forster-Netzwerks[1] ergibt sich folgender Ausdruck für die Temperaturerhöhung des LED Chips nach dem Einschalten:

$$T(t) = T_0 + P_{th} \cdot \sum_i R_{th_i} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}\right) \tag{2}$$

Hierbei sind T_0 die Temperatur zum Einschaltzeitpunkt, P_{th} die thermische Verlustleistung, R_{thi} die thermischen Widerstande und τ_i die Zeitkonstanten. Zur Beschreibung der thermischen Stabilisierung eines LED Systems ist die Charakterisierung bis auf die Chipebene nicht notwendig, da die Charakterisierung zu kurzen Zeiten nicht relevant für das Stabilisierungsproblem ist. Betrachtet man die Zeitkonstanten der verschiedenen Komponenten des thermischen Pfads, so liegen die der LED Chips in der Größenordnung von einigen zehn Millisekunden, die des thermisches Interfache im Bereich von Sekunden und die des Kühlkörpers in Bereichen von einigen hundert bis tausend Sekunden. Somit wird die thermische Stabilisierung in optische Messungen eines LED Systems im Wesentlichen durch die große Zeitkonstante des Kühlkörpers beeinflusst. Aus diesem Grund wird die Zeitabhängigkeit der Bauteile mit kleinen Zeitkonstanten vernachlässigt. Sie tragen zur Temperaturerhöhung nur noch durch ihren thermischen Widerstand bei, was den folgenden Ausdruck ergibt:

$$T(t) = T_0 + P_{th}\left(R_{LED} + R_{KK} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{KK}}}\right)\right) \tag{3}$$

Hier entspricht der thermische Widerstand R_{LED} der Summe der thermischen Widerstände im LED System ohne die des Kühlkörpers. Die Formeln 2 und 3 entsprechen sich ab Zeiten, die eine Größenordnung über der größten vernachlässigten Zeitkonstante liegen. Diese Änderung kann auch durch die verschiedenen Auftragungen in Abb. 3 veranschaulicht werden. In dieser repräsentiert die logarithmische Darstellung die Gleichung 2, die die unterschiedlichen Zeitkonstanten auch zu kleinen Zeiten auflöst. Die Wirkungsbereiche der unterschiedlichen Zeitkonstanten sind durch rote Linien markiert. In der linearen Darstellung dagegen steigt die Temperatur scheinbar direkt nach dem Einschalten sprunghaft an, um sich dann mit einer langsamen Zeitkonstante einem stabilen Wert zu nähern. Das entspricht dem Verhalten von Gleichung 3, die nur eine Zeitkonstante besitzt. Die Bereiche der roten Linien fallen in dieser Darstellung scheinbar mit der y-Achse zusammen.

3 Die Anpassungsfunktion

3.1 Thermische Abhängigkeit des Lichtstroms

Will man nun die Formeln der Thermodynamik auf den Lichtstromrückgang im Stabilisierungszeitraum übertragen, muss beachtet werden, wie der Lichtstrom von der Chiptemperatur abhängt. Hierbei wurde die folgende exponentielle Abhängigkeit verwendet [6]:

$$\Phi(T_0 + \Delta T) = \Phi(T_0) \cdot e^{-\frac{\Delta T}{k}} \tag{4}$$

Hierbei ist Φ der bei einem konstanten Strom emittierte Lichtstrom und k eine thermische Degradationskonstante der LED. Setzt man nun Formel 3 als zeitabhängige Temperatur

[1] Auf die Diskussion der Wahl der Netzwerke zwischen Forster- und Cauer-Netzwerk wird im Rahmen dieser Veröffentlichung nicht eingegangen. Es soll allerdings noch auf die Äquivalenz beider Lösungen hingewiesen werden[4].

im Stabilisierungszeitraum in Formel 4 ein, erhält man den zeitabhängigen Lichtstrom im Stabilisierungszeitraum.

$$\Phi(T(t)) = \Phi(T_0) + e^{P_{th}\left(R_{LED}+R_{KK}\cdot\left(1-e^{-\frac{t}{\tau_{KK}}}\right)\right)\cdot k^{-1}} \quad (5)$$

Diese Funktion sollte nun nach der Methode der kleinsten Quadrate an Messwerte der zu untersuchenden LED Systeme angepasst werden [7]. Da die doppelte Exponentialfunktion numerisch nicht einfach anzupassen ist, wurde diese Funktion durch folgende Anpassungsfunktion ersetzt:

$$\Phi^*(t) = \Phi_\infty + A_1 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_o}} \quad (6)$$

Für die Funktionen der Formeln 5 und 6 kann über einen Grenzwertvergleich gezeigt werden, dass sie für die Zeiten von t → 0 und t → ∞ übereinstimmen. Somit entspricht Φ_∞ dem Lichtstrom im thermisch stabilen Zustand und kann direkt als Messwert eines thermisch stabilen Systems interpretiert werden. Da die hergeleitete Temperatur für kleine Zeiten keine Gültigkeit hat, bleibt A_1 eine Rechengröße und sollte nicht direkt auf die optische Messung übertragen werden. Die Zeitkonstante τ_o der Anpassungsfunktion beschreibt die optische Degradation und entspricht der Degradationskonstante des Kühlkörpers τ_{KK}. Die Abweichung dieser beiden Degradationskonstanten konvergiert für große Zeiten und kann in Abhängigkeit der Temperaturerhöhung des Kühlkörpers sowie der Degradationskonstante k der LED nach oben abgeschätzt werden. Im Fall der vermessen Retrofitsysteme lag sie immer unter 5%[2].

3.2 Anwendung der thermischen Anpassungsfunktion

Mit der Anpassungsfunktion aus Formel 6 wurden alle Systeme gefittet. Das Anpassungsergebnis hängt auch vom gewählten Anpassungsintervall ab. Um eine möglich gutes Ergebnis zu erhalten, muss die Überlagerung mit den kurzen Zeitkonstanten der LED Systems möglichst gering sein. Aus diesem Grund wurden in dieser Untersuchung alle Systeme in einem Intervall von τ_o bis $2 \cdot \tau_o$ angepasst. Eine Analyse über eine Optimierung der Auswahl des Anpassungsintervalls soll noch folgen.

Wie die Anpassung durchgeführt wird, wird in Abb. 5 veranschaulicht. Zunächst wird das System vermessen. Danach werden die Messwerte auf das Anpassungsintervall reduziert, was durch die blauen, gestrichelten Linien markiert ist. In diesem Intervall wird die Anpassungsfunktion aus Formel 6 mit der Methode der kleinsten Quadrate [7] an die Messwerte gefittet. Das Anpassungsergebnis wird schließlich danach beurteilt werden, wie gut es mit den Messwert ab dem Fitintervall übereinstimmt. Für kleinere Zeiten sollte die Anpassung dagegen nicht verwendet werden.

Mit Hilfe der Anpassungsfunktion kann die Lichtstromentwicklung ab dem Anpassungsintervall vorhergesagt werden. Somit ist es möglich, für jeden Messzeitpunkt ab diesem Intervall die systematische Abweichung des thermisch nicht stabilen Systems zu bestimmen. Mit dieser Information gibt es zwei Möglichkeiten, die eigene Messung zu verbessern.

[2] Man darf eine Abweichung bei der Bestimmung der Zeitkonstante nicht mit einem Abweichung auf den Messwert verwechseln. Die resultierende Unsicherheit auf den Messwert ist bei den untersuchten Retrofitsystemen um mindestens eine Größenordnung kleiner.

Zunächst kann man den eigenen Messwert um die bekannte Abweichung korrigieren, ohne dass man warten muss, bis das System thermisch stabil ist. Diese Methode bietet sich nur für Messungen mit kurzen Messzeiten an. Wenn die Messung ein thermisch stabiles System verlangt, kann man vorher sein Stabilitätskriterium, wie beispielsweise eine 0,5 % Abweichungsgrenze, definieren. Mit der Anpassungsfunktion kann für diese Grenze die Zeit ausgerechnet werden, wann ein System diese Grenze unterschreitet. Somit ist es möglich, die Stabilisierungszeit im Rahmen der akzeptierten Abweichung zu verkürzen.

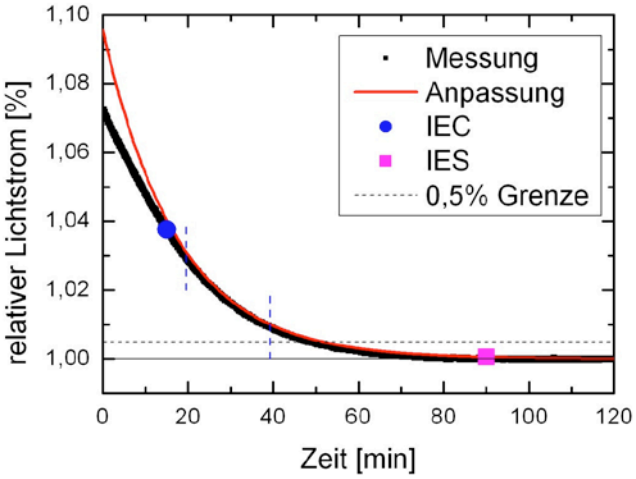


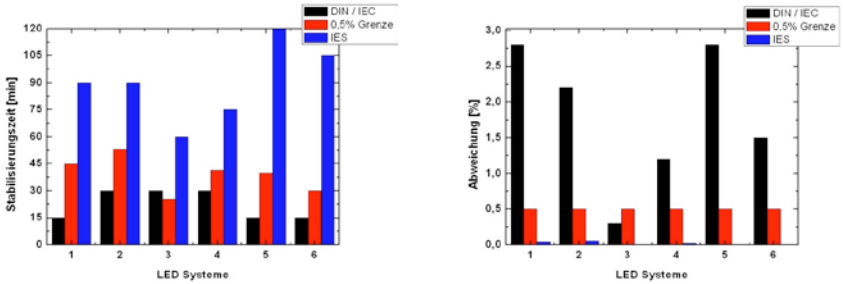
Abb. 5 Messung eines LED Systems (schwarze Punkte). Innerhalb der blauen Linie wurde die Funktion angepasst (rote Linie). Zu beachten ist, dass die Anpassung für t → 0 nicht mehr funktioniert, was Prinzip bedingt ist. Die Messung wird Vervollständig durch die Stabilisierungszeiten nach IEC und IES, sowie einer angenommenen 0,5 % Stabilitätsgrenze.

4 Ergebnisse

In der Untersuchung wurden sechs verschiedene LED Retrofit Systeme mit einer Stückzahl von 20 vermessen. Der Lichtstromrückgang dieser Systeme konnte mit einer Genauigkeit von $R^2 > 0{,}99$ angepasst werden. Neben der Anpassung wurden für diese Systeme die Stabilisierungszeiten nach den Normen der IEC und IES und zu diesem Zeitpunkt die relative Abweichung zu dem Werten des thermisch stabilen Zustands bestimmt. Beispielhaft wurde auch die Zeiten für eine 0,5 % Abweichungsgrenze errechnet. Die Ergebnisse der Mittelung über die Stichprobengröße von 20 Stück sind für jedes System in Tab. 1 und Abb. 6 zusammengefasst.

Bei der Analyse der Stabilisierungszeiten nach der IEC zeigt sich, dass die betrachteten Systeme mit 15 min und 30 min nach einer der beiden kürzest möglichen Zeiten als stabil zu bewerten waren. Diese kurzen Zeiten bergen jedoch das Problem, dass die meisten Systeme noch nicht die von der Norm vorgegebene Stabilisierungsschwelle von 1 % erreicht hatten. Nur eins von diesen sechs Systemen konnte richtig bewertet werden, während sich bei fünf Systemen eine Abweichung größer als 1 % ergab. Als größter Wert konnte eine Abweichung von 3,8 % über dem stabilen Wert festgestellt werden.

Diese Abweichungen vermeidet das Verfahren die IES. Die überprüften Systeme lagen immer in Bereichen, in denen die mögliche Abweichung einer mangelnden thermischen Stabilisierung die Unsicherheiten der Messungen unterschreitet. Damit wird das Ziel einer Stabilisierungsschwelle von 0,5 % deutlich unterschritten. Dies bedingt Stabilisierungszeiten, die doppelt so hoch sind als notwendig.



a) Stabilisierungszeiten b) Abweichungen

Abb. 6: Übersicht der durchschnittlichen Stabilisierungszeiten (a) und Abweichungen (b) nach den Normen der IEC und IES sowie der berechneten 0,5 % Grenzen nach Verfahren der Anpassung.

Tab. 1 Übersicht Bewertung LED Systeme nach IEC und IES. Die Zeitkonstante τ_o, sowie die Abweichungen nach IEC und IES verstehen sich als Mittelung der 20 Proben eines Systems. Zusätzlich ist der größte Wert dieser 20 Proben nach der Bestimmung nach IEC als maximale Abweichung angegeben. Bei den Stabilisierungszeiten nach IEC und IES wurde der am häufigsten vorkommende Wert genommen, da diese nur in Schritten von 15 min ermittelt werden.

System	τ_o / min	t_{Stab} IEC / min	0,5 % Grenze / min	t_{Stab} IES / min	Maximale Abw. IEC / %	Abweichung IEC / %	Abweichung IES / %
1	17,3 ± 1,8	15	44,8	90	3,8	2,8 ± 0,3	0,04 ± 0,05
2	15,6 ± 0,6	30	53,0	90	2,8	2,2 ± 0,3	0,05 ± 0,05
3	7,1 ± 0,2	30	25,5	60	0,3	0,3 ± 0,05	0,01 ± 0,05
4	10,4 ± 0,6	30	41,3	75	2,1	1,2 ± 0,4	0,02 ± 0,05
5	14,4 ± 1,0	15	39,8	120	3,1	2,8 ± 0,2	0,002 ± 0,05
6	12,8 ± 2,9	15	29,9	105	2,9	1,5 ± 0,4	0,003 ± 0,05

5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde eine Anpassungsfunktion vorgestellt, mit der das Stabilisierungsverhalten eines LED Systems genauer analysiert werden kann. Mit dieser ist es möglich, den Lichtstrom des thermisch stabilen Zustandes bereits zu kennen, bevor das System diesen eingenommen hat. Außerdem kann eine Stabilisierungszeit berechnet werden, bei der das System eine vorgegebene Abweichungsgrenze unterschritten hat.

Ebenso konnte im Vergleich zu den Verfahren der Normen nach IEC und IES für beide Normen eine Schwäche verbessert werden. Bezüglich der IES konnte, ohne die Messunsicherheit zu erhöhen, eine Verkürzung der Messzeit um einen Faktor 2 bis 4 erzielt werden. Im Vergleich zum Verfahren der IEC können dagegen vorgegebenen Abweichungsgrenzen eingehalten werden, während die Stabilisierungsvorschrift der IEC systematische Abweichungen von bis zu 3,8 % verursachen kann.

Ausblickend werden für die Anpassungsfunktion noch zukünftige Potentiale in Bezug auf eine genauere Extrapolation der Langzeitdaten sowie eine Abschätzung der Chiptemperatur mit Hilfe einer optischen Messung gesehen.

6 Literatur

[1] IEC, „DIN IEC/PAS 62717, LED-Module für die Allgemeinbeleuchtung - Anforderungen an die Arbeitsweise," 2011.

[2] IES, „LM-80-08, Approved Method for Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources," 2008.

[3] IES, „LM-79-08 Approved Method for Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products," 2008.

[4] Philips Lumileds, „DR06: LM-80 Test Report," Philips Lumileds, 2010.

[5] Osram, „Thermal Management of Golden Dragon LED," 2008.

[6] C. Neumann, „Vorlesung Lichttechnik WS11".

[7] B. Burgeth, „Mathematik für Informatiker III," Mathematical Image Analysis Group, Saarland University, 2007.

[8] R. P. Stout, „Thermal RC Ladder Networks," *Semiconductor Components Industries,* 2006.

Messung, Simulation und Optimierung weißer YAG-LEDs

Dipl.-Ing. Charlotte Bois[*+], Dr. Holger Winkler*[*], Dr. Peter Bodrogi*[+], Prof. Tran Quoc Khanh*[+]

[*] Merck KGaA, Frankfurter Strasse 250, 64293 Darmstadt.
[+]Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Hochschulstraße 4a, 64289 Darmstadt.

1. Problemstellung, Forschungsfrage

Die Beleuchtung mittels einer blauen LED und eines Leuchtstoffes breiten Spektrums (z.B. YAG:Ce) spielt für die Optimierung der Sehleistung (in der Außenbeleuchtung) und die Farbqualität (in der Innenraumbeleuchtung) eine für die Zukunft wichtige Rolle. Für diese Anwendungen ist es äußerst wichtig, die physikalischen Eigenschaften der Leuchtstoffe zu kennen. Die Herstellung des YAG:Ce Materials ist gut beherrscht und die Effizienz des Leuchtstoffes bezieht sich meistens auf die Photolumineszenz-Eigenschaften. Das Material wird jedoch in einer LED-Lichtquelle eingesetzt und die Effizienz der kompletten LED soll ebenfalls berücksichtigt werden. Darum stellen u. a. die Leuchtstoffpartikelgröße sowie die Leuchtstoffkonzentration sehr wichtige Faktoren dar, wobei die folgenden Fragestellungen untersucht werden müssen:

- Wie ist der Einfluss der Leuchtstoffpartikelgröße auf die LED-Effizienz?
- Wie ändert sich die benötigte Leuchtstoffkonzentration der weißen LEDs, wenn sie aus unterschiedlichen Partikelgrößen erzeugt werden?
- Kann man aus den Leuchtstoffdaten und den LED-Eigenschaften die Farbqualität einer fertigen weißen Leuchtstoff-LED vorhersagen?

2. Ziel

2.1 Einfluss des Leuchtstoffes auf die Eigenschaften der weißen LED

In unserer Arbeit wurden die Partikel vom YAG-Leuchtstoffmaterial je nach Größe getrennt und danach in weiße LED-Lichtquellen eingearbeitet. Die Eigenschaften Photolumineszenz und Elektrolumineszenz wurden gemessen. Die zu einem festgelegten weißen Farbort nötigen Leuchtstoffanteile wurden erfasst. Das Ziel der Experimente bestand darin, ein optimales Leuchtstoffmaterial zu finden, das die gewünschten lichttechnischen Kriterien (Lichtausbeute, Farbqualität) mit einer bestimmten Partikelgröße erfüllt.

2.2 Reduzierung der Anzahl der Laborversuche durch Simulation

Um eine weiße LED mit einer gewünschten Farbtemperatur zu bauen, ist es notwendig, den Leuchtstoff mit einem Bindemittel zu mischen, die richtige Leuchtstoffmenge einzuwiegen, und den Farbort der LED messtechnisch zu überprüfen. Da Letzteres einem aufwendigen Prozess entspricht, bietet sich die Simulation der weißen LED als besonders effektives Forschungsvorgehen an, wobei sich die verschiedenen lichttechnischen Eigenschaften (wie die spektralen und räumlichen Strahlungsdichteverteilungen, Farbwiedergabe, Helligkeit und Farbharmonie) mathematisch optimieren lassen, indem die technologischen Eigenschaften des Leuchtstoffes systematisch geändert werden.

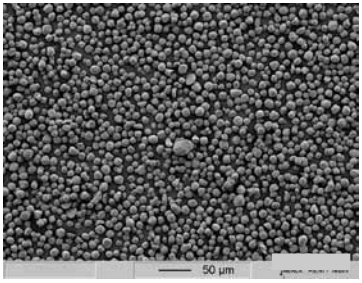
3. Stand der Wissenschaft

Die Leuchtstoffkonzentration je nach Partikelgröße wurde von Masui et al. /1/ veröffentlicht, wobei zwei YAG-Leuchtstoffe unterschiedlicher Korngrößen und Effizienz verglichen wurden. Es ist hingegen unsicher, ob überhaupt auf den Partikelgrößenunterschied zurückgeschlossen werden kann, da kein Hinweis auf die Morphologie des Partikels existiert. Außerdem stimmen die Ergebnisse über die benötigte Leuchtstoffkonzentration für weiße LEDs mit den Ergebnissen unserer Arbeit nicht überein. Im Gegensatz dazu ermittelten Huang et al. /2/ übereinstimmende Ergebnisse bezüglich Effizienz, Konzentration und Korngröße. Das untersuchte Material weist allerdings eine inhomogene Morphologie und eine inhomogene Partikelgrößenverteilung auf.

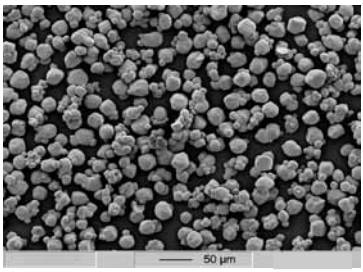
Ein Hinweis auf den Einfluss der Partikelgröße wurde von Tran et al. /3/ ebenfalls veröffentlicht. Diese Untersuchung besteht jedoch lediglich aus Simulationen ohne Vergleich mit experimentellen Ergebnissen. Eine optimale Effizienz wurde von einer Partikelgröße von 20 μm abgeleitet, die in der vorhandenen Studie nicht validiert werden konnte. Sommer et al. /4,5/ berechneten die Winkelabhängigkeit von Orthosilikat-LEDs derselben Geometrie und Konzentration mit Hilfe einer Simulationssoftware, wobei eine räumlich homogene Strahlungsdichteverteilung angestrebt wurde. Die erreichten Farbtemperaturen befanden sich allerdings nicht im visuell akzeptablen Bereich. Darum sind die Ergebnisse mit der vorhandenen Arbeit nur teilweise vergleichbar.

4. Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnisse

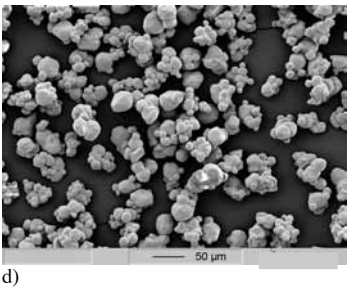
Eine YAG-Leuchtstoff-Charge wurde hergestellt. Dieses Ausgangsmaterial weist eine breite Partikelgrößenverteilung auf. Die Partikel wurden nach Größe getrennt. Es ergaben sich sechs verschiedene YAG-Proben mit Korngrößen von 13 μm bis 36 μm. Die Leuchtstoffpartikel zeigen eine kugelförmige Morphologie, wie es in Abb. 1 zu sehen ist.



a) b)



c)



d)

Abb. 1: Partikelmorphologie (REM-Bild). Partikelgröße a)13μm b) 21μm c) 28μm d) 36μm

Innerhalb derselben Probe weicht der Durchmesser des Leuchtstoffes leicht ab, die Proben zeigen aber eine sehr enge Partikelgrößenverteilung im Gegenteil zum Ausgangsmaterial, siehe Abb. 2. Aus jeder Leuchtstoff-Fraktion wurden weiße LEDs gebaut. Diese weißen LEDs erreichen denselben Weißpunkt, damit sie untereinander verglichen werden können.

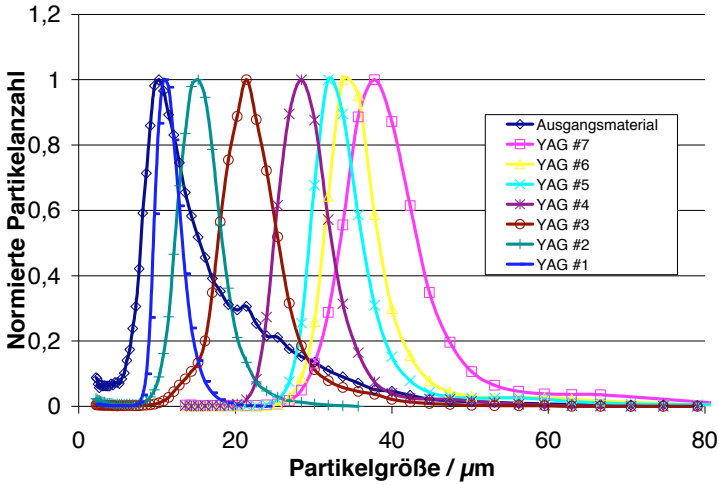


Abb. 2: Partikelgrößenverteilung YAG Proben - YAG #1) 13 μm, YAG #2) 17 μm, YAG #3) 21μm, YAG #4) 28μm, YAG #5) 31μm, YAG #6)36μm

4.1 LED-Eigenschaften

Blaue LEDs mit einem Lichtstrom von 5,1±0,2 lm wurden für jede weiße LED eingesetzt. Ein konstantes Volumen der Leuchtstoff- und Silikonmischung wurde auf der LED Chip aufgebracht. Die Farbtemperatur der LED ändert sich durch die Änderung der Konzentration des Leuchtstoffes. Kaltweiße LEDs von 7000±400K wurden für jede Leuchtstoff-Fraktion hergestellt.

Die erforderliche Leuchtstoffkonzentration, damit alle Leuchtstoff-konvertierte LEDs dieselbe Farbkoordinate aufweisen, nimmt mit der Korngröße linear zu (s. Abb.3). In der oben erwähnten Literatur wurde festgestellt, dass Leuchtstoffe mit zunehmender Korngröße bessere photolumineszente Eigenschaften zeigen. Daher sollte die Leuchtstoffkonzentration mit der Korngröße abnehmen. Die gemessenen Daten im Abb.3 widersprechen dieser Behauptung.

Wenn die Gewichtskonzentration auf die Leuchtstoffpartikelanzahl übertragen wird, ist das Verhältnis allerdings umgekehrt. Die Leuchtstoffkonzentration wurde auf die Anzahl von Leuchtstoffpartikel umgerechnet. Je größer die Leuchtstoffpartikel, desto weniger Partikel sind in den LEDs gebraucht, um den Weißpunkt zu erreichen. Dieses Ergebnis bestätigt den experimentellen Trend: unter den betrachteten LEDs mit identischer Farbtemperatur befindet sich eine geringere Anzahl an Leuchtstoffpartikel deren Durchmesser zunimmt, die Gewichtskonzentration erhöht sich dagegen.

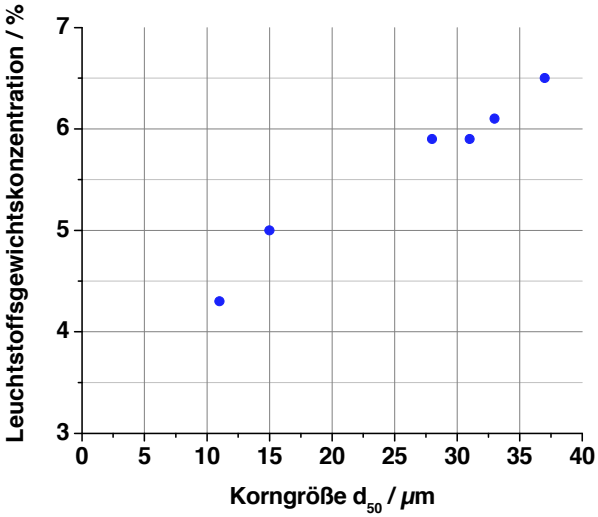


Abb.3: Leuchtstoffkonzentration in weißen LEDs abhängig von der Leuchtstoffkorngröße

Die Messung der Leistung in Abhängigkeit von der Spektralverteilung wurde für die LEDs durchgeführt. Die Messdaten sind in Abb. 4 aufgetragen. Aus Abb. 4 geht hervor, dass die Effizienz mit der Leuchtstoffpartikelgröße steigt.

Die Leuchtstoffkonzentration weißer LEDs nimmt mit der Partikelgröße zu. Außerdem erhöhen sich die Photolumineszenz-Eigenschaften des Leuchtstoffes für zunehmende Leuchtstoffpartikelgröße. Dadurch steigt die LED-Lichtausbeute, wie es in Abb. 4 gezeigt wird.

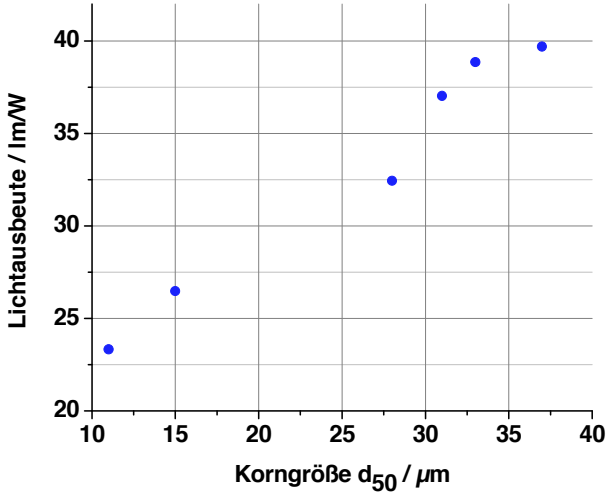


Abb. 4: Lichtausbeute der weißen LEDs mit zunehmender Leuchtstoffpartikelgröße

4.2 Simulation

Die experimentellen Ergebnisse wurden mittels eines Programms simuliert. Die verwendete Berechung berücksichtigt sowohl physikalische als auch fluoreszierende Leuchtstoffeigenschaften. Die reale leuchtstoffkonvertierte LED wurde in der Software reproduziert. Die Leistung, der spektrale Strahlungsfluss der blauen LED und die Maße des Chips wurden eingegeben. Die Effizienz, Konzentration und Partikelgröße des Leuchtstoffes wurden ebenfalls eingetragen.

Einzelne weiße LED aus zunehmender Leuchtstoffpartikelgröße wurden simuliert. Ein ausführlicher Vergleich zwischen den spektralen Messungen und den simulierten spektralen Strahlungsflussverteilungen ist zum ersten Mal berichtet.

Die Simulation und Messung einer weißen LED aus Leuchtstoff mit Partikelgröße 13 μm sind in Abb. 5 aufgetragen. Die Differenz zwischen Experiment und Simulation wurde berechnet und ist auch in der Abb. 5 dargestellt. Die größte Abweichung befindet sich im Bereich der blauen LED bei 420nm. Es handelt sich um eine kleine Verschiebung des blauen Peaks von 4 nm. Die Simulationsergebnisse bei der Leuchtstoffemission treffen mit den Experimenten zu. Der Übergangsbereich bei 480nm, der am schwierigsten zum nachbilden ist, ist hervorragend simuliert. Die Leistung weißer LEDs, Farbwiedergabe und Farbtemperatur gemessener Daten konnten beim Simulieren nachgewiesen werden. Die Simulation stimmt mit den Messdaten für jede Leuchtstoffpartikelgröße überein.

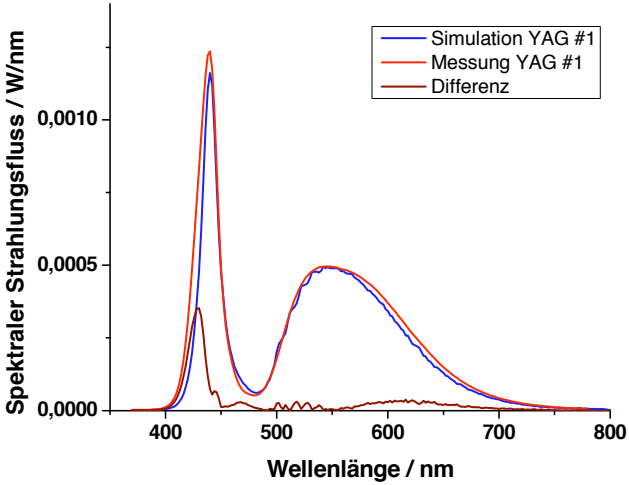


Abb. 5: Experimenteller und simulierter spektraler Strahlungsfluss einer weißen LED mit YAG #1 (13 μm) und Differenz

5. Fazit

Die Partikelgröße des Leuchtstoffes ist für die Anwendung der weißen LEDs sehr relevant, wobei – je nach Anwendungsbereich der weißen LEDs - ein Kompromiss zwischen benötigter Menge an Leuchtstoff und gewünschter lichttechnischer Eigenschaften gefunden werden muss.

Die obige Analyse durch eine Simulation bestätigt, dass die Kenngrößen Brechungsindex, Größenverteilung sowie die Streuung des Leuchtstoffes betrachtet werden können. Dadurch können viele praktische Versuche erspart werden. Dies entspricht einem erheblichen Zeitgewinn.

Literaturverzeichnis

/1/ Hisashi Masui, Shuji Nakamura, Steven P. Den Baars
„ Effects of phosphor application geometry on white Light-emitting diodes“ Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 45, No 34, 2006.

/2/ Shih Chieh Huang, Jui Kung Wu, Wei-Jen Hsu, Hsin Hsiung Chang, Hsien Yen Hung, Chi Lian Lin, Hung-Yuan Su, Nitin Bagkar, Wei-Chih Ke, Hui Tung Kuo, Ru-Shi Liu “Particle Size Effect on the packaging Performance of YAG:Ce Phosphors in White LEDs” International Journal of Applied Ceramic Technology, Vol. 6, No. 4, pp. 465-469, 2009.

/3/ Nguyen the Tran, Jiun Pyung You, Frank G. Shi „Effect of phosphor particle size on luminous efficacy of phosphor-converted White LED“ Journal of Lightwave Technology, Vol. 27, No. 22, November 15, 2009 .

/4/ Christian Sommer, Joachim R. Krenn, Paul Hartmann, Peter Pachler, Marko Schweighart, Stefan Tasch, Franz P. Wenzl „ A detailed study on the requirements for angular homogeneity of phosphor converted high power LED light sources“ Optical Materials, Vol. 31 pp. 837-848, 2009.

/5/ Christian Sommer, Joachim R. Krenn, Paul Hartmann, Peter Pachler, Marko Schweighart, Stefan Tasch, Franz P. Wenzl “ The effect of the phosphor particle sizes on the angular homogeneity phosphor converted high power LED light sources” IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 15, No. 4, 2009.

Anwendung der OLED als professionelles Leuchtmittel in der Allgemeinbeleuchtung

Sebastian Ludwig, TRILUX GmbH & Co.KG, Heidestraße 4, 59759 Arnsberg

1 Aktuelle Forschungsschwerpunkte

Seit der Einführung der Halbleiterlichtquellen in die Allgemeinbeleuchtung ist es für den Leuchtenhersteller unabdingbar geworden, sich ständig mit den neuesten Entwicklungen der SSL-Technologien (Solid-State-Lighting, Festkörper Lichtquellen) zu befassen. Ein professionelles Technologie-Screening spielt in der heutigen Leuchtenentwicklung eine immens große Rolle. Die immer kürzer werdenden Zyklen der Neuentwicklungen und die damit verbundene Dynamik im Markt stellen große Herausforderungen im Umgang mit neuen Lichtquellen dar. Entwicklungszeiten von Leuchten müssen sich mehr und mehr den Entwicklungszeiten der Lichtquellen anpassen. Dabei ist stets zu beachten ein Leuchtmittel sinnvoll einzusetzen und in geeigneten Applikationen zu verwenden. Im Laufe der letzten Jahre hat sich für die LED-Technologie insbesondere die Straßenbeleuchtung als geeignete Applikation erwiesen. Die Anwendung der LED nimmt in diesem Bereich stetig zu, denn der Einsatz ist dort aufgrund der geringeren Wartungszyklen und der hohen Effizienz bei gleichzeitiger guter Farbwiedergabe besonders sinnvoll.

Im Forschungsbereich eines Leuchtenherstellers heißt es die Entwicklungen im Auge zu behalten und ihnen im Idealfall einen Schritt voraus zu sein. Der Kunde wird noch über die neue Technologie LED aufgeklärt und im Umgang damit geschult, da arbeitet die Forschung bereits an einer weiteren SSL-Technologie, der OLED. Seit mehreren Jahren beobachtet die Forschungsabteilung von TRILUX die Entwicklungen im Bereich der organischen LED genau und versucht Ansätze zur Anwendung in der Allgemeinbeleuchtung zu finden. Im Folgenden möchte ich die Forschungsaktivitäten genauer erläutern und anhand der bisher erlangten Erkenntnisse darlegen vor welche Herausforderungen die OLED-Technologie den Leuchtenhersteller stellt. Insbesondere im Hinblick auf erste Anwendungen in der Allgemeinbeleuchtung und die jeweilige Eignung der OLED für bestimmte Applikationen werde ich auf Vor – und Nachteile der OLED eingehen.

2 Anforderungsprofil einer OLED als professionelles Leuchtmittel

Um die Anwendung der OLED als professionelles Leuchtmittel in der Allgemeinbeleuchtung zu prüfen, bedarf es der Definition von Anforderungen, die ein solches Leuchtmittel zu erfüllen hat. Die Anforderungen aus Sicht eines Leuchtenherstellers sind umfangreich und es wird keine Lichtquelle geben, die allen genügt. Die derzeit wichtigsten Kriterien für eine sinnvolle Anwendung der OLED und eine Akzeptanz am Markt, sowie eine Vergleichbarkeit mit anderen existierenden Leuchtmitteln sind: Effizienz, Gleichmäßigkeit, Farbtemperatur und Farbort, Farbwiedergabe, Lebensdauer, Lichtstrom, Leuchtdichte, Winkelabhängigkeit, sowie Preis, Systemintegration und thermische Stabilität. Einige der Kriterien nach denen die OLED aus unserer Sicht bewertet wird sind konkret mit Zahlen zu belegen, andere nicht. Im äußerst wichtigen Austausch mit OLED-Herstellern stellt dies eine der ersten Herausforderungen dar.

Da die OLED potenziell sehr effizient ist, wird eine stetige Verbesserung dieser Eigenschaft vorausgesetzt. Von Herstellern im Labor erreichte Rekordwerte erhöhen diese Erwartungshaltung, gemessene Effizienzen bezogen auf den Anwendungsfall zeigen hier jedoch noch erheblichen Verbesserungsbedarf. Obwohl die innere Effizienz bei OLEDs schon sehr gut ist, liegt das Verhältnis von erzeugtem und effektiv nutzbarem Licht bei unbefriedigenden 80% zu 20%. Für Anwendungen in der Allgemeinbeleuchtung werden diffuse Oberflächen der OLEDs favorisiert, so dass problemlos Licht-Auskoppelstrukturen zur Verbesserung dieses Verhältnisses genutzt werden können. Somit werden in den nächsten Jahren deutlich bessere Verhältnisse zu erreichen sein.

Ebenfalls in Zusammenhang mit der diffusen Oberfläche durch Auskoppelstrukturen steht die Winkelabhängigkeit der OLED. Für die Allgemeinbeleuchtung ist ein Farbdrift über den Betrachtungswinkel keinesfalls akzeptabel. Die Oberfläche sollte homogen, gleichmäßig und vor allem einfarbig sein. Die derzeitigen optischen Strukturen auf OLEDs reduzieren die Winkelabhängigkeit bereits in großem Maße, jedoch besteht auch hier weiterer Verbesserungsbedarf. Betrachtet man diese Eigenschaften im Vergleich mit anderen Leuchtmitteln, besteht der Vorteil der spiegelnden Oberfläche aufgrund der aufgebrachten optischen Strukturen leider nicht mehr. Hier fällt eine Eigenschaft, die die OLED von anderen Lichtquellen unterscheidet und wesentlich abgrenzt weg.

Lag der Fokus der Entwicklungen zu Beginn auf der Effizienz, arbeitet man heute verstärkt an höheren Lichtströmen. Lichtströme von über 120 lm zeigen deutlich, dass man die OLED im Hinblick auf allgemeine Beleuchtungsanwendungen optimiert hat. Um ein Beleuchtungsniveau in einem durchschnittlichen Büro auf 500 lux zu erreichen, benötigte man vor einem Jahr noch über 300 OLED-Panel. Durch die erhebliche Steigerung des Lichtstromes kann diese Anzahl stark auf nur noch ca. 100 Panels reduziert werden.(siehe Vortrag „OLEDs in der Beleuchtungsplanung“ von Claus Steinwandt, TRILUX). Die Leuchtdichte von OLEDs sollte 3000 cd/m2 nicht überschreiten. Derzeit halten wir diese Leuchtdichte für einen Grenzwert um Blendung zu vermeiden. Da OLEDs Flächenstrahler sind, ist die Leuchtdichte gegenüber allen anderen Leuchtmitteln sehr gering, was ein weiterer Vorteil im Hinblick auf Blendung ist. Bezüglich der Farbtemperatur sind hohe Anforderungen an die Flexibilität eines Leuchtmittels gesetzt. Die OLED sollte einen

Bereich zwischen 2700K und 4000K problemlos abdecken können. Die niedrigeren Farbtemperaturen sind hier zu bevorzugen, da die OLED im Gegensatz zur LED in diesem Bereich wesentlich effizienter ist.

Die OLED eignet sich hervorragend für Anwendungen, bei denen flächige, diffuse Beleuchtung verlangt wird. Dieser Bereich wird mehr und mehr von der LED abgedeckt. Die aktuellen LED-Beleuchtungssysteme erreichen sehr gute Gleichmäßigkeiten und hohe Effizienzen. Die Leuchtenwirkungsgrade liegen hier bereits höher als die aktuellen Effizienzen einer einzelnen OLED . Um größere Flächen, Beispielsweise Deckeneinbauleuchten (625mm x 625mm), zu realisieren, muss man derzeit mehrere OLEDs zu einer großen Fläche clustern. Eine einzige OLED in dieser Größe ist hier wünschenswert. Messungen von Leuchtdichten verschiedener OLEDs haben gezeigt, dass es bei größeren Flächen schwierig ist, eine hohe Gleichmäßigkeit zu erreichen. Das Elektrodenmaterial ist in den meisten Fällen nicht in der Lage, den Strom gleichmäßig über die gesamte Fläche in die OLED einzubringen. Dies führt zu einer sichtbaren Inhomogenität. Dieser Effekt wird von manchen Herstellern durch sogenannte Busbar-Strukturen, stromleitende, metallische Gitter, verringert. Untersuchungen zur Akzeptanz solcher Strukturen zeigen, dass diese teils akzeptiert werden, teilweise jedoch nicht. Nach dem Aufbau erster Demonstratoren sind wir zu dem Schluss gekommen, dass für die erste Anwendung in einer Leuchte auf die Busbar-Strukturen verzichtet werden sollte.

Lebensdauerangaben der Hersteller bezogen sich zu Beginn der Entwicklungen für Allgemeinbeleuchtung auf einen Lichtstromrückgang um 50%. In der Allgemeinbeleuchtung bevorzugen wir die Angabe von L70, welche sich auf den Lichtstromrückgang auf 70% des ursprünglichen Lichtstromes bezieht. Aufgrund der hohen Anzahl an Einflussparametern bezogen auf die Lebensdauer gestaltet sich die Angabe je nach präferierter Eigenschaft der OLED unterschiedlich. Höhere Lichtströme und Leuchtdichten bedeuten meist eine verringerte Lebensdauer, wohingegen eine niedrigere Farbtemperatur eine höhere Effizienz und damit meist auch eine längere Lebensdauer ermöglicht.

Um die OLED in der Allgemeinbeleuchtung einzusetzen benötigt man derzeit eine hohe Anzahl an Panels. Hierbei ist offensichtlich, dass der Preis für eine OLED eine große Rolle spielt. Der Einsatz von OLED in Leuchten ist heute wenig lukrativ. Der hohe Einzelpreis der OLED ist eines der größten Hindernisse für die OLED, im Markt akzeptiert zu werden. Der alleinige Einsatz von OLEDs als Leuchtmittel rentiert sich noch nicht. Auch wenn die oben beschriebenen, notwendigen Eigenschaften für einen Einsatz in der Allgemeinbeleuchtung stetig verbessert werden, muss am Ende der Preis in guter Relation dazu stehen.

Während der Arbeit an der aus der Forschungsabteilung und dem Innovationsteam von TRILUX initiierten Hybridleuchte Obliq sahen wir uns mit weiteren Herausforderungen konfrontiert. Der im oberen Teil beschriebenen Eigenschaften bzw. Vor – und Nachteilen der OLED bewusst, sieht man sich bei der Integration in eine Leuchtenentwicklung neuen Aufgabenstellungen gegenüber. Bei der Systemintegration muss auf den empfindlichen Aufbau der OLED Rücksicht genommen werden. Insbesondere die Betrachtung der thermischen Stabilität hat zu interessanten Erkenntnissen geführt. Bei der Kombination

von LED und OLED in einer Leuchte muss man dafür Sorge tragen, dass die im LED-Modul entstehende Wärme von der OLED so weit wie möglich fern gehalten wird. Die OLED sollte eine Temperatur von 50℃ nicht überschr eiten um optimal arbeiten zu können. Daher wurde in speziellen Simulationen getestet, ob Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Stabilität der OLED notwendig sind. Hier war lediglich ein Isolationsring um das LED-Modul notwendig um die OLED nicht zu überhitzen. Bei geeigneter Auslegung der LED-Kühlkörper unter Berücksichtigung der Kombination in einer Leuchte mit OLEDs ist ein ausgewogenes Thermomanagement zu ermöglichen.

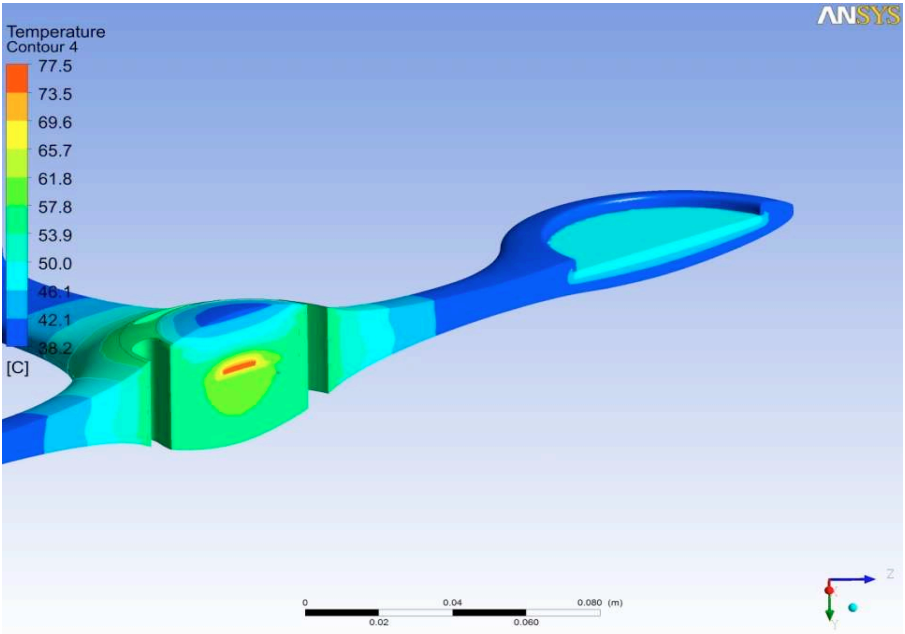


Abb. 1: Thermosimulation der Kombination LED und OLED, TRILUX GmbH & Co. KG

Auf Abb. 1 ist deutlich zu erkennen, dass sich im Bereich der OLED eine für die OLED geeignete Temperatur ergibt. Sie bewegt sich zwischen 38℃ und 48℃. Hiermit wird auch bestätigt, dass man für die OLED keinen eigenen Kühlkörper benötigt.

Die Integration der OLED stellt sich auch in weiteren Bereichen als Herausforderung dar. Durch die sehr unterschiedlichen Ansätze bezüglich elektrischer Kontaktierung und dem notwendigen Verpolungsschutz, sowie dem Schutz vor Glasbruch sind zur Integration weitere zusätzliche Entwicklungsschritte nötig. Für das erwähnte Beispiel aus der TRILUX Forschung wurde die OLED auf eine zusätzliche Leiterplatte aufgebracht um den elektrischen Anschluss bestmöglich zu gewährleisten und die gesamte Integration des Bauteils zu vereinfachen. Schwierig bleibt die elektrische Kontaktierung. Um die OLED

gleichmäßig mit Strom zu versorgen, muss an zwei Stellen der Platine ausreichend Platz für die Lötstellen bleiben, wie auf Abb. 2 gut zu erkennen ist.

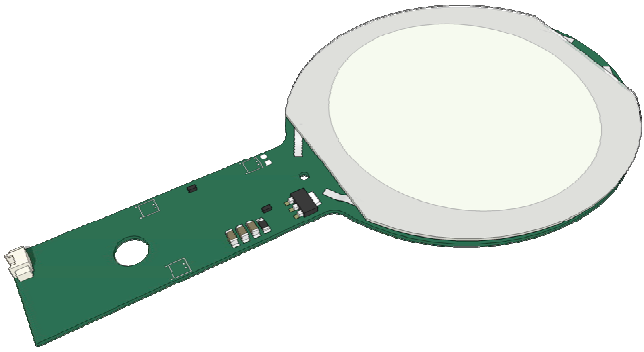


Abb. 2: Skizze der entwickelten OLED, TRILUX GmbH & Co. KG, Philips Technologie GmbH

3 Ausblick

Betrachtet man den jetzigen Entwicklungsfortschritt der OLED und vergleicht die Eigenschaften der OLED mit denen der LED kann man für die Anwendung der OLED als professionelles Leuchtmittel in der Allgemeinbeleuchtung folgende Schlüsse ziehen: Die letzten Jahre haben eine gesteigerte Dynamik in der Weiterentwicklung der OLED und ihrer Eigenschaften gezeigt. Erste Annahmen, dass OLEDs in Effizienz und auch Preis die LED etwa 2015 einholen wird, können nach derzeitigem Stand der Forschung aus unserer Sicht nicht bestätigt werden.

Die LED-Technologie entwickelt sich auch weiterhin dynamisch weiter und wird erst später als angenommen eine Sättigung in den Bereichen Effizienz und Preis erreichen. Daher gehen wir davon aus, dass die OLED die LED in den nächsten 5 Jahren nicht einholen kann. Vor diesem Hintergrund werden erste Anwendungen der OLED in speziellen Nischen aufkommen. Kunden spezifische und Projekt bezogene Applikationen werden den Markt der Allgemeinbeleuchtung für das Thema OLED sensibilisieren. Solange man die OLED dort einsetzt wo ihre Anwendung sinnvoll ist, man sich beim Einsatz dieses Leuchtmittels auf die Stärken der Technologie konzentriert, hat die OLED gute Chancen sich als weitere SSL-Lichtquelle neben der LED zu etablieren.

Neuartige Quecksilberfreie Kompaktleuchtstofflampen

Rainer Kling, Celal Mohan Ögün*, Holger Heuermann**, Stefan Holtrup***

*Lichttechnisches Institut des Karlsruher Institutes für Technologie, Karlsruhe, **FH Aachen, Aachen

1 Einleitung

Die Kompaktleuchtstofflampen sind in der Allgemeinbeleuchtung sehr verbreitet, aber kämpfen noch immer gegen Akzeptanzprobleme. Die Lampen enthalten das gesundheitsschädliche Quecksilber als Emissionsmaterial [1]. Darum müssen die Lampen nach dem Gebrauch zu speziellen Sammelstellen transportiert, aufbereitet und entsorgt werden. Dieser führt zu einem enormen logistischen und ökonomischen Aufwand [2]. Hinzu kommt, dass Kompaktleuchtstofflampen oft eine schlechtere Farbwidergabe und eine unangenehmere Lichtfarbe als Glühlampen haben sowie kaum Sofortstart-Vermögen aufweisen. Aus diesem Grund ist eine drastische Reduzierung oder eine vollständige Entfernung der Quecksilbermenge in der Lampe von größter Bedeutung.

Das Lichttechnische Institut des Karlsruher Institutes für Technologie (KIT) und das Labor für Hochfrequenztechnik der FH Aachen realisieren dies in gemeinsamer Forschung elektrodenloser Kompaktleuchtstofflampen mit und ohne Quecksilber. Es werden die Fortschritte dieser Entwicklungen präsentiert. Hohe Lichtausbeuten wurden quecksilberhaltig und quecksilberfrei erzielt. Die Lampen sind dimmbar und weisen potentiell eine hohe Langlebigkeit auf.

Bei der notwendigen Abwesenheit der Elektroden werden die Lampen durch Mikrowelle angeregt. Diese bietet die folgenden Vorteile [3] für die Lichttechnik der Lampen: Der Elektrodenverlust ist einer der beherrschenden Faktoren, die die Effizienz der Lampe begrenzt. Daher ist eine Effizienzerhöhung im elektrodenlosen Betrieb möglich. Auf dieser Weise sind auch die verbundenen Verlustmechanismen, wie die Degradation der Elektroden, Emissionsmaterialverluste durch Elektroden oder die Schwärzung des Lampenkörpers durch Elektrodenmaterialien vollständig eliminiert. Ohne Elektroden sind deutlich reduzierte Fertigungskosten sowie lange Lebensdauern größer als 30.000 Stunden erzielbar.

Für den Ersatz des Quecksilbers ist der elektrodenlose Betrieb vorteilhaft. Ohne die Gefahr einer chemischen Reaktion zwischen dem Emissionsmaterial und den Elektroden sind die Wahlmöglichkeiten für Ersatzmaterialien viel größer.

Im Rahmen dieser Forschungsarbeiten der elektrodenlosen Energiesparlampe, finanziert durch die Dritte Patentportfolio Beteiligungsgesellschaft mbH & Co. KG hat das Labor für Hochfrequenztechnik der FH Aachen die HF-Leistungsversorgung entwickelt. Eine Impedanztransformationsschaltung (HF-Transformator) und ein Mikrowellenvorschaltgerät (MVG) versorgt die Lampe mit der notwendigen HF-Leistung. Das Lichttechnische Institut des Karlsruher Institutes für Technologie (KIT) hat die Lampenentwicklung und die lichttechnischen Vermessungen durchgeführt.

2 Konzept der Ansteuerung

Die elektrodenlose Lampe wird mittels eines HF-Signals im lizenzfreien 2,4 GHz ISM-Band gezündet und betrieben. Der HF-Transformator erzeugt zur Zündung der Lampe einen hohen Spannungspuls bei der Frequenz $f_{Zünd}$. Abweichungen dieser Frequenz, bedingt durch Fertigungstoleranzen, werden von der Analog Locked Loop (ALL) durch eine skalare Reflexionsmessung der Lampe kompensiert. Das durch die Zündung erzeugte Plasma

führt zu einer Änderung der Abschlussimpedanz, so dass eine Frequenzänderung auf die optimale Betriebsfrequenz f_{op} durch die ALL erfolgt, um eine optimale Leistungseinkopplung in die Lampe zu realisieren. Betrieben wird die mikrowellenangeregte Lampe mittels eines HF-Signals mit bis zu 15 W im genannten ISM-Band. Dieses HF-Signal wird von einem spannungsgesteuerten Oszillator (VCO), der in der ALL implementiert ist, erzeugt und durch eine Verstärkerkette auf die notwendige HF-Ausgangsleistung verstärkt.

Die Impedanz-Transformation wird in verteilter Schaltungstechnik realisiert, wie in Abb. 1 dargestellt. Verteilte Schaltungstechnik bedeutet, dass die elektrischen Elemente (Kondensatoren und Spulen) nicht durch konzentrierte Bauteile (z.B. SMD) realisiert werden, sondern durch äquivalente mechanische Komponenten. Dieser in der Optimierung komplexe, aber in der Herstellung sehr einfache und preiswerte HF-Transformator verträgt größte Leistungen.

Abb.1: HF-Transformator in verteilter Schaltungstechnik

Mit dieser Transformation werden Feldstärken von rund 200kVm^{-1} im Lampenkolben (s. Abb. 2) erreicht, die zur sicheren Zündung des Plasmas ausreichen. Sobald das Plasma gezündet ist, ändert sich die Abschlussimpedanz Z_{Out} und hat eine Änderung der Reflexionseigenschaften zur Folge.

Neben der ersten Bedingung, dass eine entsprechend hohe elektrische Feldstärke zur Zündung des Plasmas notwendig ist, muss das Netzwerk für eine Leistungsanpassung ausgelegt werden. Damit lässt sich das HF-Signal möglichst effizient in das Plasma einkoppeln. Daher wird das Netzwerk so dimensioniert, dass die Impedanz des Plasmas bei einer niedrigeren Frequenz im ISM-Band (2,40 – 2,4835 GHz) angepasst ist. Das Verfahren zur Realisierung dieser zwei statischen Zustände wird Bistatic-Matching genannt.

Die zwei Frequenzen zur Zündung und zum Betrieb der Lampe erfordern eine entsprechende Regelung, die auf der Messung der hin- und rücklaufenden HF-Welle basiert. Diese skalare Reflexionsmessung dient der Analog Locked Loop (Abk.: ALL) als Regelgröße, indem die Frequenz ermittelt wird, bei der die geringsten Reflexionen des Systems auftreten. Neben der Ermittlung der Zünd- und Betriebsfrequenz gleicht die ALL auch auftretende Umgebungseinflüsse, wie z.B. Temperaturschwankungen, aus.

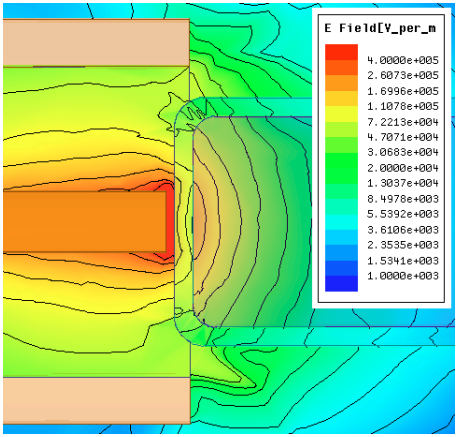


Abb. 2: Simulationsergebnisse der elektrischen Feldstärke im Lampenfußpunkt zur Zündung der Lampe mit dem entwickelten HF-Transformator (Simuliert mit der Software HFSS der Firma ANSYS für eine HF-Leistung von P_{el}=10W)

Die ALL beinhaltet einen Voltage Controlled Oscillator (Abk.: VCO), der das Hochfrequenzsignal generiert, das wiederum über eine effiziente Verstärkerkette auf die notwendige Ausgangsleistung zwischen 5 W und 25 W verstärkt wird. Zur Versorgung der Hochfrequenzelektronik wird ein AC/DC-Wandler eingesetzt, der eine Betriebsspannung von + 28V und + 5V DC bereitgestellt.

3 Lampenkonzepte

Das Ziel dieser Forschung ist die vollständige Entfernung des Quecksilbers aus der Lampe. Allerdings wurden auch die Erfordernisse der industriellen Lampenhersteller berücksichtigt. Es wurden im Rahmen dieser Entwicklung sowohl quecksilberfreie als auch quecksilberhaltige Füllungen mit niederdosiertem Quecksilber untersucht. Alle Lampen wurden am Lichttechnischen Institut hergestellt und vermessen, die Musterlampen werden aus Quarzglas gefertigt.

Um die Nachteile von Quecksilber möglichst stark abzuschwächen, wurde die Quecksilbermenge in der Lampe unter 100 µg reduziert (s. Abb. 3). Das reine Quecksilber mit einer optimalen Betriebstemperatur von 40 °C wurde für die niedrigen Leistungen und die Quecksilber-Amalgam-Verbindungen für Leistungsklassen über 10 W eingesetzt, um die optimale Betriebstemperatur über 100 °C auszudehnen. Als Puffergas wurde Argon mit einem Startgasdruck von 2 mbar verwendet. Die Quecksilber UV Strahlung wird mittels Dreibanden Phosphor in den sichtbaren Spektralbereich transferiert.

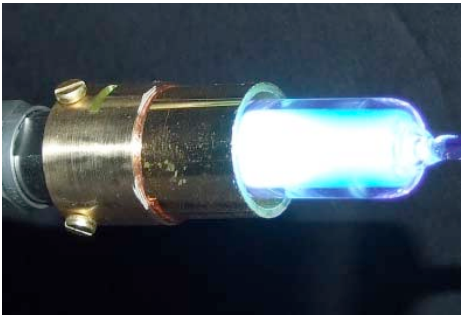


Abb. 3: Quecksilberhaltige Lampe (BiSnInHg Amalgam) mit dem HF-Koppler im Betrieb (P_{el}=3,5W)

Quecksilber weist mehrere lampentechnische Eigenschaften auf, wie hohe Dampfdrücke bei geringen Temperaturen, starke Emissionslinien im UV-Bereich, eine optimale Leitfähigkeit im Betrieb der Lampe usw., die für die Lampentechnik von außerordentlicher Bedeutung sind. Als Ersatzmaterial für Quecksilber wurden mehrere Metall-Halogen-Verbindungen untersucht, da sie vergleichbares Dampfdruck-Temperatur-Verhalten wie Quecksilber aufweisen. Es wurde aber festgestellt, dass kein Material die alle oben benannten Eigenschaften von Quecksilber alleine ersetzen kann. Darum wurde ein Füllsystem aus mehreren Salzen, wie die Halogenverbindungen von Indium und Thallium verwendet, die starke Emissionslinien sowohl im langwelligen UV- als auch im sichtbaren Bereich besitzen (s. Abb. 4 a)). Im Rahmen dieser Untersuchung wurde eine Variation des Puffergasdrucks, der HF-Leistung und Coldspot-Temperatur durchgeführt, um den optimalen Arbeitspunkt des Füllsystems zu finden [4]. Die Leitfähigkeit des Plasmas lässt sich durch Halogenide entsprechend anpassen [5], um die Eindringtiefe der Mikrowellen in das Plasma zu erhöhen.

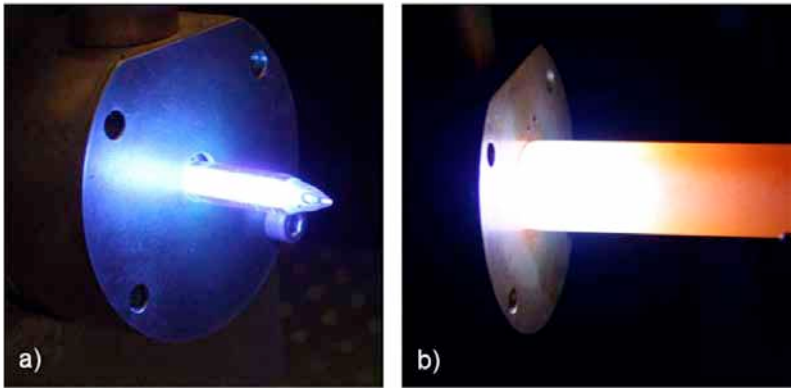


Abb. 4: a) Quecksilberfreie Lampe (mit Thallium- und Indiumjodid Füllung) betrieben mit dem Testkoppler „Surfatron“ bei einer HF-Leistung von P_{el}=20 W b) Quecksilberfreie Lampe im Betrieb mit Leuchtstoffzylinder

Eine neue Leuchtstoffbeschichtung wurde für das quecksilberfreie Füllsystem entwickelt, die sowohl die Emissionslinien im UV-Bereich als auch ein Teil der kurzwelligen sichtbaren Emissionslinien breitbandig in sichtbare Strahlung umsetzt. Das Mischverhältnis zwischen dem Phosphor-, Binde- und Vernetzungsmittel wurde so optimiert, dass der sichtbare Anteil der Strahlung möglichst gering abgeschwächt wird, während die UV-Strahlung vollständig absorbiert wird. Durch das Variieren des Mischverhältnisses und der Schichtdicke lässt sich die Farbtemperatur der Lampe einstellen. Um die Handhabung des Mischprozesses zu erleichtern und gleichzeitig die Haftung der Mischung auf dem Glassubstrat zu erhöhen, wurden die Leuchtstoffe nach einer am LTI entwickelten Technik in Polymere emulgiert. Auf dieser Weise sind praktische, kratz- und temperaturbeständige Beschichtungen realisierbar (s. Abb. 4 b)).

Sowohl für das quecksilberfreie Füllsystem als auch für die niederdosierte Quecksilberfüllung ist eine transparente Schutzschicht auf der Innenseite des Lampenkörpers von größter Bedeutung, da eine solche Beschichtung die Diffusion der Emissionsmaterialien in das Glas verhindert und die Lebensdauer der Lampe verlängert. Ein praktischer Beschichtungsprozess für Schutzschichten basierend auf Metalloxiden wurde am LTI entwickelt.

Eine neue Lampengeometrie wurde für den elektrodenlosen Betrieb gestaltet, die eine möglichst homogene Leistungszufuhr in die Lampe und eine homogene Temperaturverteilung in der Lampe ermöglicht. Dadurch ist eine deutliche Erhöhung der Plasmaeffizienz erzielt.

4 Fazit

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde ein elektrodenloses Lampenkonzept entwickelt und realisiert. Die Lampen wurden mittels Mikrowellen innerhalb des 2,4 GHz ISM-Bandes betrieben. Ein HF-Transformator, Mikrowellenvorschaltgerät mit geeigneter Ansteuerelektronik und ein HF-Koppler, entwickelt seitens der FH Aachen, versorgen und speisen die HF-Leistung in die Lampe ein. Parallel zu der Entwicklung der Leistungselektronik wurde am LTI des KIT eine neue Lampengeometrie für den elektrodenlosen Betrieb entwickelt, die eine homogene Temperaturverteilung und Leistungszufuhr ermöglicht. Die Lampenkörper wurden mittels eines am LTI entwickelten Fertigungsprozesses mit einer

Abb. 5: Prototyp der ersten Hg-freien Energiesparlampe, präsentiert auf der Light&Building 2012 in Frankfurt

Metalloxid-basierten Schutzschicht beschichtet, die die Emissionsmaterialdiffusion in das Glas stark abschwächt. Als quecksilberfreie Füllung wurde ein System aus Metall-Halogen-Verbindungen eingesetzt. Eine Leuchtstoffbeschichtung entsprechend der Strahlcharakteristik der neuen Füllung wurde ebenso entwickelt. Außerdem wurde eine Lampenfüllung mit einer Quecksilbermenge weniger als 100µm getestet.

Es können mit dieser Technologie Kompaktleuchtstofflampen mit und ohne Quecksilber gefertigt werden (s. Abb. 5). Die Plasmaeffizienz bezogen auf die eingespeiste HF-Leistung liegt typisch bei η_{Plasma}=0,4. Mit einem Leuchtstoffkonversionsfaktor von η_{Leucht}=180 lm/W und einer HF-Vorschaltgeräteffizienz von η_{MVG}=0,65 ergibt eine Lichtausbeute von η=46 lm/W bei einer netzseitigen Leistungsaufnahme von P_{Netz}=20 W. Das Ziel des Projekts bis zum Anfang 2013 ist das Erreichen der Effizienzklasse A, indem die MVG-Effizienz auf 0,7 und die Plasmaeffizienz auf 0.5 erhöht wird. Die elektrodenlosen Lampen weisen Eigenschaften wie hohe Lebensdauer und Schnellstart auf. Sowohl die quecksilberfreie als auch die quecksilberhaltige Variante mit niederdosiertem Quecksilber erweisen sich als nicht gesundheitsschädlich und ermöglichen eine einfache Entsorgung der Lampe.

5 Literaturverzeichnis

[1] Y. Hu und H. Cheng, „Mercury risk from fluorescent lamps in China: Current status and future perspective," *Environment International,* Nr. 44, pp. 141-150, February 2012.

[2] C. Dunmire, C. Calwell, A. Jacob, M. Ton, T. Reeder und V. Fulbright, „Mercury in fluorescent lamps: environmental consequences and policy implications for NRDC," 2003.

[3] V. Godyak, „Bright Idea: Radio Frequency Light Sources," *IEEE Industry Applications Magazine,* pp. 42-49, June 2002.

[4] C. M. Ögün, Ch. Kaiser und R. Kling, „Sequentially emission line addressing by microwave driven mercury free low pressure lamps," in *American Physical Society, 64th Annual Gaseous Electronics Conference*, Salt Lake City, USA, 2011.

[5] Ch. Kaiser, C. M. Ögün und R. Kling, „Betrieb von elektrodenlosen HID-Lampen durch plasmageführte Mikrowellen," in *DPG Frühjahrstagung, Fachverband Plasmaphysik*, Stuttgart, Germany, 2012.

Präzise Bestimmung der thermischen und elektrischen Daten verschiedener Hochleistungs-LED-Typen mit verschiedenen Leiterplatten- und Kühlungssystemen

M.Sc.Trinh Quang Vinh, Dipl.-Ing. Andreas Groh, Dipl.-Ing. Nils Haferkemper, Prof. Tran Quoc Khanh, TU Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik

1 Problemstellung, Ziel des Vorhabens

Die Entwicklung der LED-Bauelemente erreicht den Stand von 130-140 lm/W unter der realen Bedingung von 60°C und 350 mA. Um auf dieser Basis eine zuverlässige, energieeffiziente und langzeitstabile LED-Leuchte zu entwickeln, muss man die gesamten optischen, elektrischen und thermischen Aspekte berücksichtigen und die gesamte Leuchte als System betrachten. Selbst bei einer weißen LED mit 130 lm/W beträgt der optische Wirkungsgrad nur ca. 40%, so dass etwa 60% der elektrischen Eingangsleistung in thermische Leistung umgesetzt wird, welche von der LED und ihrer unmittelbaren Umgebung schnell und zuverlässig abgeführt werden muss. Insgesamt ist die thermische Belastung der Hochleistung-LED sehr hoch (siehe Abb. 1) und etwa zehn Mal so groß wie die thermische Belastung einer Herdplatte.

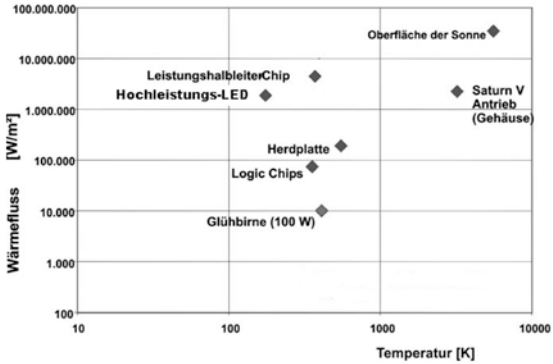


Abb. 1: Thermische Belastung von LED, Sonne und anderen elektrischen Systemen (Quelle: Lutz: Halbleiter-Leistungsbauelemente)

Diese thermische Belastung beeinflusst vor allem die Lebensdauer der LEDs. Eine Faustregel besagt, dass eine Erhöhung um 10 Kelvin die LED-Lebensdauer um 12.000 Stunden reduziert. Daher sind die Auswahl der LEDs, des Leuchtstoffsystems, der Leiterplattenmaterialien (FR4, Keramik, Metallkernleiterplatten), Leiterplatten-Konfiguration, Lüftungssysteme, Kühlkörper, Wärmeleitpaste und Lötpaste und ganz besonders die gesamte Architektur des Systems wichtig (siehe Abb. 2).

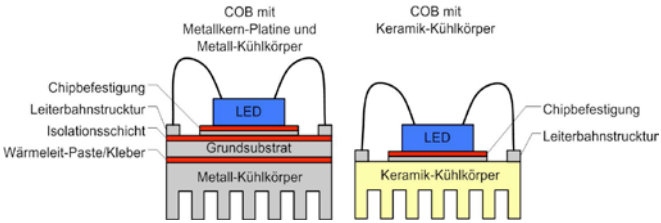


Abb. 2: Kühlsysteme für HL-LEDs mit unterschiedlicher Anzahl an Systemschichten

Die Kenngrößen zur Beschreibung der thermischen Eigenschaften eines LED-Systems sind die thermische Kapazität, die thermische Leistung und der thermische Widerstand sowie vor allem die Temperatur des pn-Übergangs des LED-Halbleiters. Die Kenngrößen zur Beschreibung der elektrischen Eigenschaften sind die I-U-Kennlinie und die elektrische Leistung. Das Ziel der Forschung an der TU Darmstadt ist, folgende Fragen zu beantworten:

1. Wie groß ist die Differenz zwischen realen thermischen und elektrischen Eigenschaften der LEDs und den Standardwerten im Datenblatt der LED-Hersteller? Wie schnell verändern sich die thermischen Eigenschaften bei verschiedenen Montagearten (Kleben, Löten, dünne Paste, dicke Paste, keine Paste) und Kühlkörpern (Leiterplatten, Aluminiumblock-Formen)?
2. Wie groß ist die Streubreite der thermischen und elektrischen Eigenschaften der LEDs verschiedener LED-Hersteller und LED-Module? Diese Kenntnisse sind wichtig, um dem Anwender eine sachliche Basis an Auswahlkriterien und -möglichkeiten zu bieten. Es gibt zurzeit eine breite Diskussion über die Zhaga-Module und die Austauschbarkeit dieser Module zwischen verschiedenen Modulherstellern. Die Module sollen ähnliche photometrische, elektrische und thermische Leistungsparameter aufweisen, was durch die Messung u.a. des thermischen Widerstands und der elektrischen Kennlinien nachzuweisen sind.
3. In einigen Testinstituten und Universitäten in Europa, Asien und Amerika werden zurzeit LEDs und LED-Module gealtert und die Alterungsrate als Funktion der Betriebsbedingungen (Strom, DC oder PWM, Temperatur, Packaging) analysiert. Es ist dabei sinnvoll, den thermischen Widerstand der LEDs und LED-Module über die Alterungsdauer aufzunehmen und auf diese Weise die Ursachen für die Alterung zielführend zu analysieren.

2 Struktur des Messsystems

An der TU Darmstadt wurde ein Messplatz aufgebaut, der wie folgt strukturiert ist.

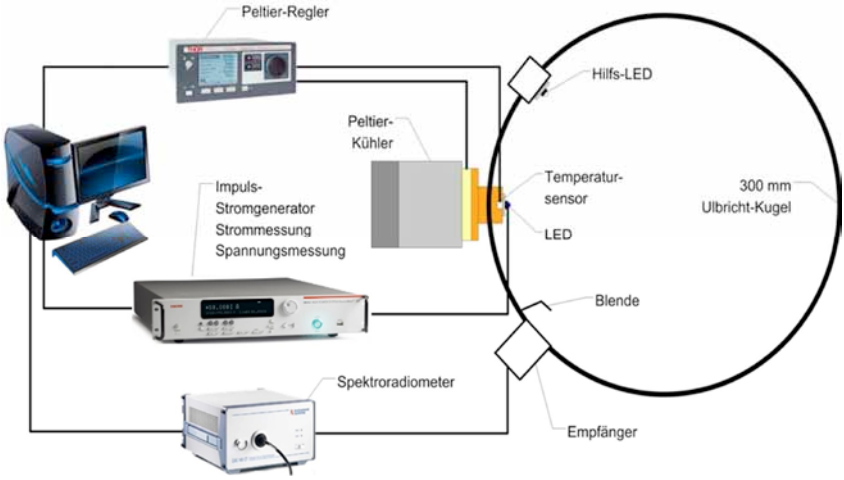


Abb. 3: Schematischer Aufbau des LED-Messplatzes

Die spektroradiometrische Messeinheit besteht aus einer Ulbricht-Kugel mit einem Durchmesser von 300 mm, einer Hilfs-LED mit Schatter und Öffnungen zur Einkopplung der zu messenden LED-Einheit sowie Auskopplung in eine Eingangsoptik für das angeschlossenes Spektroradiometer (Typ CAS 140B von der Fa. Instrument Systems). Das Messsystem wird mit einer DKD-kalibrierten FEL-Normallampe (120 V, 8A) für spektrale Bestrahlungsstärke (in W/(nm m^2)) auf den absoluten spektralen Strahlungsfluss (W/nm) im sichtbaren Bereich von 380 nm bis 780 nm kalibriert. Aus den Daten des spektralen Strahlungsflusses können der Lichtstrom (in lm), die Farbtemperatur, der Farbort, die optische Leistung P_{opt} (in W) und bei bekannter elektrischen Leistung P_e der LED auch die thermische Leistung P_{th} (in W) nach (Gl.1) berechnet werden. Die Messung und Kalibrierung der spektralradiometrischen Einheit ist nicht Gegenstand dieser Arbeit und wird in den Arbeiten /1, 2, 3/ ausführlich beschrieben.

Die zu messende LED auf einer Leiterplatte wird auf einen Kupferkörper aufgebracht, der mit Hilfe einer Peltier-Einheit bei einer Temperatur zwischen 10° und 90°C mit einer Regelgenauigkeit von 0,01° C konstant gehalten wird. Der Temperatursensor für die Einheit befindet sich direkt unter der Leiterplatte der LED.

Eine Quelle vom Typ Keithley 2651A, welche die Funktion von einer Versorgungseinheit, Stromquelle, und Digitalmultimeter mit einer Stromauflösung von 1 pA und mit einer Abtastzeit von 1 µs übernimmt.

Ein Host-Rechner steuert die o.g. Einheiten an und berechnet die Endergebnisse.

$$P_{th} = P_e - P_{opt} \qquad (Gl.1)$$

3 Grundlagen

Es gibt drei Arten der Wärmeübertragung: die Strahlung, die Konvektion und die Wärmeleitung, welche bei den LED-Systemen die dominierende Form der Wärmeübertragung bedeutet. Als Wärmeleitung ist der Wärmefluss in Folge eines Temperaturunterschieds in einem Festkörper oder in einem ruhenden Fluid definiert. Entsprechend dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik fließt die Wärme von der Stelle der höheren zu der Stelle der niedrigeren Temperatur, wobei basierend auf dem Energieerhaltungssatz keine Wärme verloren geht. Nach dem Wärmeleitungsgesetz von Fourier 1822 (Jean Baptiste Joseph Fourier, 1768-1830, Französischer Wissenschaftler, s. /4/) kann man schreiben:

$$P_{th} = \lambda \cdot A \cdot (T_1 - T_2) / d \qquad (Gl.2)$$

Mit (s. Abb. 4):

P_{th} - die Wärmeleistung in Watt (W)

A - die Fläche, durch welche die Wärme fließt

d - die Dicke des durchflossenen Körpers

λ - die Wärmeleitfähigkeit des Stoffes

T_1 - die Temperatur der warmen Stelle

T_2 - die Temperatur der kälteren Stelle

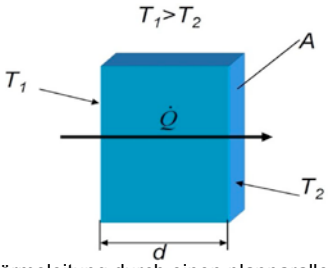


Abb. 4: Wärmeleitung durch einen planparallelen Körper

Der thermische Widerstand R_{th} wird dabei wie folgt definiert:

$$R_{th}= d/(\lambda.A)= (T_1 – T_2)/ P_{th} \qquad (Gl.3)$$

Die Wärmeleitfähigkeit λ des betrachteten Stoffes (z.B. Kupfer, Keramik, Aluminium…) ist eine temperaturabhängige Kenngröße. Eine LED-Einheit besteht in der Regel nicht nur aus einem homogenen Stoff, sondern aus dem mehrschichtigen Chip, dessen Unterlage, aus der primären Wärmesenke, Wärmeleitpaste, Leiterplatte und Kühlkörper, so dass der thermische Widerstand der LED-Einheit aus der Kombination der einzelnen thermischen Widerstände der o.g. Komponenten besteht. In der heutigen LED-Praxis benutzt man häufig zur Charakterisierung des Temperaturverhaltens der LED-Einheit die Temperatur des LED-Halbleiter-Übergangs (T_j - junction Temperature) sowie die Temperatur eines Temperatursensors an einer wohl-definierten Stelle der LED-Einheit (z.B. direkt unterhalb der LED, auf der Leiterplatte, im Kühlkörper, T_S – solder point Temperature). Somit kann man den thermischen Widerstand der ganzen LED-Einheit bestimmen, wenn man die Temperatur des Halbleiter-Übergangs T_j (=T_1 in der Gl.2) und des Temperatursensors T_s (= T_2 in der Gl.2) kennt und die Wärmeleistung P_{th} bestimmen kann.

4 Messungen der thermischen Daten

Zur Messung der thermischen Daten einer LED wird diese mit dem Betriebsstrom (z.B. 350 mA, 700 mA,…) beaufschlagt. Nachdem sich die LED vollständig erwärmt hat und somit ein thermisches Gleichgewicht hergestellt ist (stabile Vorwärtsspannung), wird der Strom innerhalb einer Millisekunde auf einen Messstrom von 10 mA reduziert. Wie in Abb. 5 zu erkennen ist, fließt bei einer Spannung von 2,6V ein Strom von 10mA, so dass eine elektrische Leistung von 26 mW umgesetzt wird. Vernachlässigt man als Worst Case Abschätzung die emittierte optische Leistung, erhält man mit einer LED mit einem thermischen Widerstand von 10K/W entsteht eine Temperaturdifferenz von 26mW*10K/W= 0,26K zwischen dem pn-Übergang und dem Lötpunkt (Solder point). Diese Erhöhung ist ausreichend gering, um einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Messung der thermischen Daten zu haben.

Eine genauere Beschreibung des Messverfahren und die Theorie zur Messung der p-n-Übergangstemperatur und des thermischen Widerstands wird in /5, 6/ gegeben.

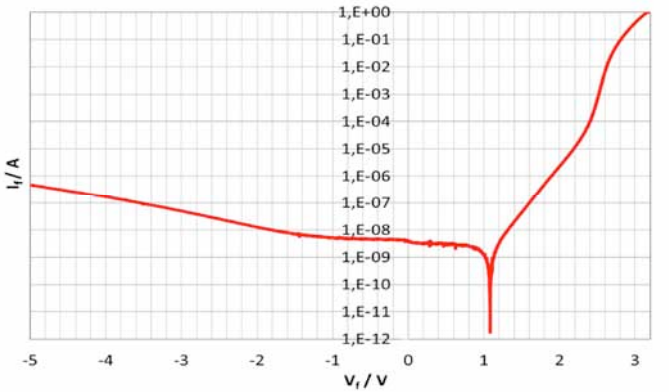


Abb. 5: die I-U-Kennlinie einer HP-LED bei T_j= 25°C

5 Aspekte der thermischen Messungen

Im Rahmen der Verifikation für das Messsystem wurden jeweils vier LEDs mit der Farbtemperatur 2700 K (warmweiß) und 5000 K (kaltweiß) messtechnisch analysiert, wobei die T_j-und T_s-Werte, P_e und P_{opt} bei unterschiedlichen Strömen von 350 mA bis 1000 mA bestimmt wurden. Die mittleren Ergebnisse der vier LEDs werden in der Abb. 6 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen:

- Je größer die Stromstärken, desto höher ist die p-n-Übergangstemperatur bei gleichen Sensortemperaturen T_s.
- Bei der gleichen Sensortemperatur T_s und gleichem Strom sind die T_j-Werte der kaltweißen LEDs kleiner als die der warmweißen LEDs.

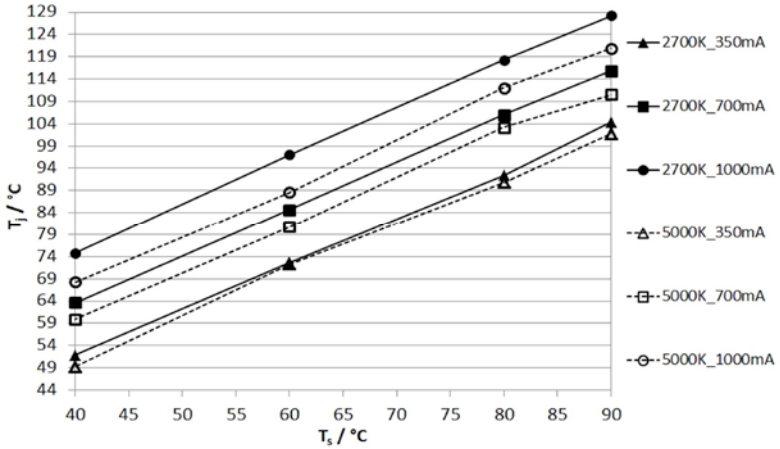


Abb. 6: Zusammenhang zwischen T_j-und T_s von warm-und kaltweißen bei unterschiedlichen Stromstärken

Aus Abb. 6, die den Zusammenhang zwischen den T_j-und T_s-Temperaturwerten für LEDs bei verschiedenen Stromstärken zeigt, kann man die Differenz $\Delta T = T_j - T_s$ bilden und für jeden Messpunkt die thermische Leistung P_{th} (in Watt) nach Gl.1 berechnen. Somit kann

man den thermischen Widerstand R_{th} nach der Gl.(3) ermitteln und in Abb. 7 als Funktion der Temperatur darstellen. Betrachtet man den Verlauf des Diagramms in der Abb. 7, stellt man fest, dass der thermische Widerstand von der Temperatur nicht unabhängig ist. Mit steigender LED-Temperatur erhöht sich der thermische Widerstand. Eine Erhöhung des thermischen Widerstands bedeutet in diesem Zusammenhang, dass eine höhere Temperatur die Wärmeleitung erschwert. Es entsteht ein Wärmestau, welcher thermisch sowohl den Chip als auch die Kontaktstellen (Lötstellen, Wärmeleitklebstellen, Schnittstellen zwischen Leuchtstoff und dem LED-Chip) belastet. Diese thermische Belastung beschleunigt auch die chemischen Vorgänge im Leuchtstoff, im Silikon als Bindemittel für den Leuchtstoff sowie die Oxidationsvorgänge z.B. an den Bonddrähten. Dies sind Mechanismen, die zu einer beschleunigten Alterung der LED-Einheit führen können.

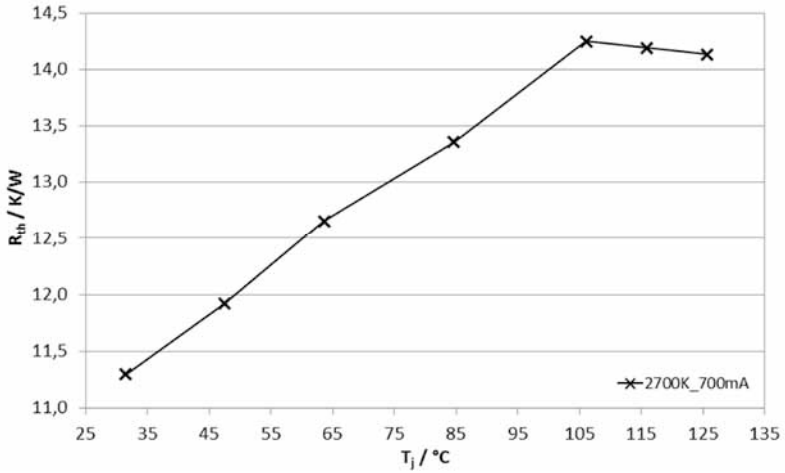


Abb. 7: Thermische Widerstände der LEDs als Funktion der Temperatur

Bisher gibt es in den LED-Herstellern Binning-Prozesse (Selektion/Sortierung) von LEDs bezüglich Farbort, Vorwärtsspannung und Lichtstrom. Das geschieht bei einer untypischen Messbedingung wie 350mA, 25°C und 20ms. Die Werte für den Farbort, Lichtstrom oder Vorwärtsspannung gelten selbstverständlich für den Anfang der Lebenszeit eines LED-Bauelements. Wie sich diese Daten im Laufe der Zeit verhalten, wird derzeit noch von den LED-Herstellern und einigen wenigen universitären Laboren untersucht. Ein anderer sehr wichtiger Aspekt muss an dieser Stelle beleuchtet werden. In einer noch unsystematischen Untersuchung des Lichtlabors der TU Darmstadt wurden für vier weiße LEDs der thermische Widerstand gemessen. Die Messung erfolgte bei 60°C und jeweils bei 350 mA und 700 mA (s. Tab. 1und Tab. 2). Die Δ-Werte des thermischen Widerstandes R_{th} und der Sperrschichttemperatur T_j sind in Tab.1 und Tab.2 jeweils auf die LED2 bezogen.

LED_2700K	LED1	***LED2***	LED3	LED4
R_{th}_350mA_60°C	14,23	***13,89***	16,78	16,30
ΔR_{th} / K/W	0,34	***0***	2,89	2,41
P_{th} / W	0,86	*0,84*	0,85	0,83
ΔT_j / K	**0,29**	***0***	**2,44**	**1,99**

Tab. 1: Thermische Widerstände und Temperaturdifferenz der vier untersuchten LEDs bei 350 mA und 60°C

LED_2700K	LED1	***LED2***	LED3	LED4
R_{th}_700mA_60°C	12,93	***12,81***	14,67	13,03
ΔR_{th} / K/W	0,12	***0***	1,86	0,22
P_{th} / W	1,92	*1,88*	1,89	1,84
$\Delta \mathbf{T_j}$ **/ K**	0,23	***0***	**3,52**	**0,41**

Tab. 2: Thermische Widerstände und Temperaturdifferenz der vier untersuchten LEDs bei 700 mA und 60°C

Diese Tabellen besagen, dass vier weiße LEDs z.B. in Reihenschaltung auf einer gemeinsamen LED-Leiterplatte mit annähernd gleicher Leiterplattentemperatur T_s bei 350mA bzw. 700 mA untereinander eine Temperaturdifferenz bis 3,52K haben werden. Diese Unterschiede verursachen möglicherweise auch eine unterschiedliche Lebensdauer bzw. Geschwindigkeit der Alterung der LEDs innerhalb der gleichen Schaltung und sollten genauer untersucht werden.

Literaturverzeichnis

/1/ C.Singer, S.Brückner, Tran Quoc Khanh: Methods and techniques for the absolute and accurate determination of the luminous efficiency of today high power LEDs, Proceedings (Herausgeber: Tran Quoc Khanh) of the International Symposium for Automotive Lighting, Darmstadt 25-26. September 2007, p.642-648

/2/ A.Groh, S.Brückner, Tran Quoc Khanh: the temperature-dependent changes of the photometrical and colorimetrical parameters of today high power LEDs, Proceedings (Herausgeber: Tran Quoc Khanh) of the International Symposium for Automotive Lighting, Darmstadt 25-26. September 2007, p.634-641

/3/ C.Singer, S.Brückner, Tran Quoc Khanh: Messung von Lichtstrom und Lichtausbeute an modernen Hochleistungsleuchtdioden, Zeitschrift Licht, Pflaum Verlag (München), Heft 9, 2007, S. 714-718

/4/ / http://de.wikipedia.org/wiki/Jean_Baptiste_Joseph_Fourier

/5/ Trinh Quang Vinh, Stefan Brückner, Tran Quoc Khanh: Accurate measurement of the p-n-Junction Temperature of HP-LEDs-methods and results, Proceedings (Herausgeber: Khanh Tran Quoc) of the International Symposium for Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt 28-29. September 2011, S.809-827

/6/ N.Narendran, Y.Gu, R.Hosseinzadeh: Estimating junction temperature of high-flux white LEDs, Proceedings of SPIE, 5366: 158-160, 2004

Neue Hochdrucklampen für die Industriebeleuchtung

Martin Tüshaus, Michael Beau, OSRAM AG, Nonnendammallee 44, 13629 Berlin

1 Einführung

In bestehenden älteren Industriebeleuchtungsanlagen werden insgesamt zu etwa gleichen Anteilen **Leuchtstofflampe**n und **Hochdruckentladungslampen** eingesetzt; der 50%-ige Anteil der Hochdrucklampen setzt sich zusammen aus etwa 30% **Quecksilberhochdrucklampen** und etwa 20% **Halogen-Metalldampflampen** mit Entladungsgefäßen aus Quarzglas /1/. Dabei werden in Anlagen mit hohen Deckenhöhen (> 8m) meist Hochdruckentladungslampen eingesetzt. Wird eine Anlage dagegen neu geplant, entscheiden sich die Nutzer heute in fast allen Fällen dazu, Leuchtstofflampen des Typs T5 einzusetzen; das betrifft insbesondere das obere Marktsegment. Es hat sich ein starker Trend etabliert, Hochdrucklampen durch Leuchtstofflampen zu substituieren /1/; oft werden dabei Leuchten mit je einer 400W Halogenmetalldampflampe ersetzt durch Leuchten mit vier 80W T5 „High Output" Lampen, die einen ähnlichen Lichtstrom aufweisen. In diesem Beitrag wird zunächst der Grund für den Trend erläutert, der sich zurückführen lässt auf gesetzliche Anforderungen sowie auf den Gesamtkostenvorteil einer Beleuchtung mit T5-Systemen gegenüber einer Beleuchtung mit klassischen Hochdruckentladungslampen. Danach wird ein neues Lampensystem aus einer Halogen-Metalldampflampe und einem keramischen Entladungsgefäß und einem elektronischen Vorschaltgerät vorgestellt, das wiederum einen deutlichen Gesamtkostenvorteil gegenüber den aktuell dominierenden T5-Leuchtstofflampen bietet.

2 Anforderungen an eine Industrie-Beleuchtungsanlage

Neue Beleuchtungsanlagen in der Industrie werden professionell geplant. Die Planer müssen dabei neben der Arbeitstättenrichtlinie, mehrere Normen und Vorschriften berücksichtigen. Für Arbeitsstätten sind die Anforderungen an die Beleuchtung, d.h. Niveau, Gleichmäßigkeit, Blendwirkung, Farbtemperatur, Farbwiedergabe etc., festgelegt in der **DIN EN 12464-1 2011** (Beleuchtung von Arbeitsstätten - Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen), welche für die verschiedensten Industriezweige teilweise recht unterschiedliche Anforderungen spezifiziert. Wichtig für die Lampenauswahl ist dabei, dass für viele Industrieanwendungen ein Farbwiedergabeindex von Ra ≥ 60 nicht ausreicht, sondern dass oft Ra ≥ 80 gefordert wird. Das schließt die Verwendung von Halogen-Metalldampflampen mit Natrium-Scandium- und Natrium-Thallium-Indium-Füllungssystemen aus, welche mit mehr als 80% die Masse der weltweit produzierten Halogen-Metalldampflampen im Bereich 250-1000 W bilden.

Ebenso muss der Planer die europäische **Energieeinsparverordnung** (EnEV 2009) berücksichtigen, die in Deutschland in der **DIN V 18599-4:2011** umgesetzt ist. Diese Norm schreibt Obergrenzen für den maximalen Energieverbrauch eines Gebäudes vor und „zwingt" praktisch dazu, dimmbare Leuchtmittel einzusetzen! Die weitere Verschärfung in der EnEV 2012 impliziert für die Beleuchtung eines Gebäudes den Einsatz von Lichtsteuerungssystemen, da nur so die weiter abgesenkten Verbrauchswerte zu erreichen sind. Die europäische **ErP-Direktive** (EG Verordnung Nr 245/2009), die Teil der langfristigen EU-Strategie ist, die CO_2-Emission zu reduzieren, verbietet u.a. den Vertrieb der in der Indust-

riebeleuchtung noch stark verbreiteten Quecksilberhochdrucklampen ab April 2015 und den Vertrieb von Halophosphat-Leuchtstofflampen (T8 seit 4/2010; T10, T12 seit 4/2012).

Außer der Einhaltung der gesetzlichen Bestimmungen sind für den Nutzer die Gesamtkosten einer Beleuchtungsanlage entscheidend. Neben den Investitionskosten für die Errichtung der Anlage, sind das die Betriebskosten, d.h. die Energiekosten sowie die Wartungs- und Auswechselkosten. Zwar dominieren in der Regel die Energiekosten in **Gesamtkostenrechnungen** den sogenannten „TCO-Rechnungen", aber gerade bei großen Deckenhöhen in Industriehallen kann der Aufwand für Leuchtenwartung und Leuchtmitteltausch beträchtlich sein. Der charakteristische Parameter, mit dem Lichtplaner bezüglich des Austausches der Leuchtmittel arbeiten, ist die **Nutzlebensdauer** der Lampen. Das ist in der Regel die Zeit, in der der Gesamtlichtstrom einer (unverschmutzten) Anlage aufgrund von Lichtstromrückgang der Lampen und Ausfall einzelner Lampen auf 80% des Anfangslichtstromes abgefallen ist. Für die in der Industriebeleuchtung verwendeten Leuchtmittel müssen die Hersteller aufgrund der europäischen ErP-Direktive die für die Berechnung der Nutzlebensdauer benötigten Parameter Lampenlichtstrom-Maintenancefaktoren und Lampenüberlebensfaktoren publizieren, was bei den großen Herstellern über entsprechende Internetseiten realisiert wird.

Die in Gesamtkostenrechnungen dominierenden Energiekosten werden dabei nicht nur durch die Effizienzen von Lampe, Vorschaltgerät und Leuchte bestimmt, sondern auch durch die Dimm- und Schaltfähigkeit der Leuchtmittel. Denn in Zeiten, in denen das Beleuchtungsniveau abgesenkt werden kann oder in denen aufgrund eines ausreichenden Tageslichtniveaus Leuchtmittel abgeschaltet werden können, wird natürlich Energie eingespart. Das geschieht in der Praxis heute über die Regelung und Steuerung der Beleuchtungsanlage durch ein **Lichtmanagementsystem**, welches mit Präsenzmeldern und Lichtsensoren ausgestattet ist.

3 Vergleich existierender Lösungen

In Tabelle 1 sind die Eigenschaften typischer, in der Industriebeleuchtung verwendeter Leuchtmittel dargestellt. Dabei sind gegenübergestellt eine technologisch alte, aber immer noch oft verwendete Quecksilberhochdrucklampe, zwei klassische (seit ca. 30 Jahren erhältliche) Halogen-Metalldampflampen mit Entladungsgefäßen aus Quarzglas und eine moderne T5-Leuchstofflampe. Als Leuchtstofflampe wurde die LUMINUX® 80W/840 T5 HO CONSTANT gewählt, die aufgrund ihres hohen Lichtstroms, ihrer sehr guten Lichtausbeute, ihrer neutralweißen Farbe, ihrer guten Farbwiedergabe und ihres relativ stabilen Temperaturverhaltens (Lichtstrom ≥ 90% des Maximalwertes in einem Umgebungstemperaturbereich von 5 ℃ bis 70 ℃) in der Industriebe leuchtung oft verwendet wird.

In der Tabelle ist die Effizienz einer hochwertigen T5-Leuchte mit 90 % angegeben. Da von den Leuchtenherstellern teilweise deutlich höhere Effizienzwerte publiziert werden, soll diese Zahl näher begründet werden. Der Leuchtenbetriebswirkungsgrad wird im Labor ermittelt durch eine Messung des Gesamtlichtstromes der Leuchte dividiert durch den Gesamtlichtstrom der Lampe, wobei beide Messungen bei einer Umgebungstemperatur von 25℃ durchgeführt werden. Da T5-Lampen ihr Effizien zoptimum bei höheren Temperaturen erreichen, was in der Leuchte der Fall ist, wird durch die Messmethodik die errechnete Effizienz der Leuchte erhöht. In Industriebeleuchtungsanwendungen werden Leuchtstofflampen jedoch in aller der Regel bei Temperaturen oberhalb ihres Effizienzmaximums betrieben, nach den Erfahrungen von Osram bei 60-70 °C selbst in guten Leuchten /4/. Bei diesen Bedingungen ist die Effizienz der Lampe geringer und es errechnet sich folglich ein kleinerer Leuchtenbetriebswirkungsgrad. Bei Hochdrucklampen ist dagegen die Abhängig-

keit des Lichtstroms von der Umgebungstemperatur viel geringer, hier kann der entsprechende Temperatureffekt weitgehend vernachlässigt werden. Die in der achten Zeile berechnete Systemeffizienz bezeichnet die Gesamteffizienz aus Lampe, Vorschaltgerät und Leuchte. Aus der Tabelle 1 lässt sich ableiten:

- Die Effizienz von Beleuchtungsanlagen mit Quecksilberhochdrucklampen ist viel niedriger als die mit Halogen-Metalldampf- oder Leuchtstofflampen und das bei erheblich schlechterer Farbwiedergabe. Allerdings ist die Nutzlebensdauer mehr als dreifach höher als die der Halogen-Metalldampflampen, was neben ihrem günstigen Preis deren noch weite Verbreitung in der Industriebeleuchtung erklärt.
- Moderne T5-Leuchtstofflampen haben (bei T = 25℃) ähnliche Effizienzen wie klassische Halogen-Metalldampflampen, infolge der höheren EVG- und Leuchteneffizienzen ergeben sich aber deutliche Effizienzvorteile bei T5-Lösungen.
- T5-Lösungen haben wesentlich höhere Nutzlebensdauern als Anlagen mit Halogen-Metalldampflampen. Die Lampen können fast fünfmal so lange betrieben werden.
- Nur Anlagen mit Leuchtstofflampen sind dimmbar und können damit in Lichtregelsysteme eingebunden werden.

Lampe	HQL 400 /2/	MASTER HPI-T Plus 400W/645 /3/	HQI-T 400W/D	LUMINUX® T5 HO CONSTANT /2/
Technologie	Quecksilber-hochdruck	Halogen-Metall-dampflampe (Quarzbrenner)	Halogen-Metall-dampflampe (Quarzbrenner)	Leuchtstoff-Lampe
Lampenleistung	400 W	400 W	420W	80 W
Lampeneffizienz	57 lm/W	84 lm/W	81 lm/W	85 lm/W
Farbwiedergabeindex Ra	39	65	92	≥ 80
Typ und Effizienz hochwertiger Vorschaltgeräte	KVG 92%	KVG 92%	KVG 92%	EVG 95%
Effizienzen typischer / hochwertiger Leuchten	65%	65% / 82%	65% / 82%	80 / 90 %
Systemeffizienz für typ./hochwertigeLeuchte	34 lm/W	50 lm/W / 63lm/W	48 lm/W / 61lm/W	65 lm/W / 73lm/W
Dimmbar	Nein	Nein	Nein	Ja (100% - 1%)
Heißwiederzündfähig	Nein	Nein	Nein	Ja
Nutzlebensdauer	14.000 h	4.000 h	4.000 h	18.000 h

Tab. 1: Kenngrößen für vier typische Lampen (plus Leuchten) in der Industriebeleuchtung

Nur mit Leuchtstofflampen können also die gesetzlichen Anforderungen eingehalten werden. Zudem sind die Auswechselkosten aufgrund der mehrfach höheren Nutzlebensdauer wesentlich niedriger und die Energiekosten geringer, vor allem wenn die Leistung reduziert wird. Zusammen mit den vergleichsweise geringen Anschaffungskosten einer T5-Installation erklärt das den starken Trend zu diesen Lampen und die Verdrängung der Hochdrucklampen.

4 Verbesserte Hochdrucklampen für die Industriebeleuchtung

Selbst moderne Leuchtstofflampen haben keine höheren Effizienzen als die vergleichsweise alten Halogen-Metalldampflampen mit Brennern aus Quarzglas (siehe die Werte in Tab. 1). Grund dafür sind im Wesentlichen die prinzipiell unvermeidbaren Konversionsverluste bei der Lichterzeugung im Leuchtstoff. Die Entwicklung bei Halogen-Metalldampflampen hat aber in den letzten 15 Jahren durch die Verwendung keramischer Entladungsgefäße erhebliche Fortschritte gemacht; die neuen Lampen haben höhere Effizienzen, bessere Farbwiedergaben, geringere Farbtemperaturstreuungen und längere Lebensdauern. Es wurden zunächst zylinderförmige Entladungsgefäße verwendet, danach realisierte man, dass mit runden (Osram: Kugelförmig, Philips: Rugbyförmig) Brennern noch bessere Eigenschaften zu erzielen sind. Allerdings hat sich die Entwicklung auf kleinwattige Lampen von 20W bis 150W konzentriert, die in der Verkaufsraumbeleuchtung eingesetzt werden, da in diesem Anwendungsfeld die größten Stückzahlen umgesetzt werden und vor allem, da der qualitative Vorteil gegenüber Lampen mit Quarzbrennern hier am größten ist. Die Entwicklung entsprechender mittelwattiger Lampen im Bereich 200W bis 400W für die Industriebeleuchtung wurde von allen Herstellern dagegen recht stiefmütterlich behandelt.

Dies hat sich nun aber geändert. Philips bietet seit 2008/09 eine Lampenfamilie für Industriebeleuchtungsanwendungen an, die MASTERColour CDM-T Elite MW. Es handelt sich um insgesamt vier Halogen-Metalldampflampen mit rugbyförmigen keramischen Entladungsgefäßen mit den Leistungen 210 W und 315 W erhältlich in warmweißer und neutralweißer Farbtemperatur, die an entsprechenden elektronischen Vorschaltgeräten zu betreiben sind /3/. Die neutralweiße 315 W Lampe beispielsweise hat einen Lichtstrom von 35.500 lm und eine Lichtausbeute von **113 lm/W**, sie hat somit eine um knapp **40%** höhere Effizienz als die klassischen 400W Halogen-Metalldampflampen in Tabelle 1. Sie hat einen Farbwiedergabeindex von Ra 93, bei einer mittleren Lebensdauer (B_{50}-Wert) von 30.000 h /3/. Aus den entsprechenden Angaben errechnet sich eine Nutzlebensdauer der Lampe von ca. **13.000 h**, ein Wert der mehr als dreifach höher ist als der der klassischen Halogen-Metalldampflampen und der den Werten von T5-Lampen fast entspricht. Außerdem ist die Lampe an dem entsprechenden EVG bis auf 50% der Nennleistung dimmbar und erfüllt somit die impliziten Vorgaben der Energieeinsparverordnung.

Die im Folgenden vorgestellte 250W Lampe von Osram ist ebenfalls eine weiter entwickelte Halogen-Metalldampflampen mit keramischem Entladungsgefäß, die stärker als die Elite-Lampe auf die Anforderungen der Industriebeleuchtung optimiert ist. Ziel der Entwicklung sind sehr hohe Effizienz und lange Nutzlebensdauer bei Betrieb an einem Standard EVG, d.h. einem Vorschaltgerät mit rechteckförmigem Betriebsstrom. Die Lampe hat folgende Eigenschaften:

- Lichtstrom 32.500 lm, Leistung 250W
- Lampeneffizienz 130 lm/W

- Farbwiedergabe Ra ≥ 80
- Farbtemperatur 4200 K
- Mittlere Lebensdauer B_{50} 30.000 h, Nutzlebensdauer 16.000 h
- Dimmbar bis 50% der Nennleistung am EVG (Dimmung bis 30% wird untersucht)

Aufgrund der hohen Effizienz ist es möglich, das Lumenpaket einer klassischen 400W Halogen-Metalldampflampe in etwa mit 250W zu erreichen, was eine erhebliche Energieeinsparung ermöglicht.

Die um 15% höhere Effizienz im Vergleich zur Elite wird erreicht durch die Verwendung eines Entladungsgefäßes mit einem hohen Aspektverhältnis, da diese Form höhere Lichtausbeuten ermöglicht /5/, /6/; das Aspektverhältnis bezeichnet das Verhältnis von Länge zu Durchmesser des Entladungsgefäßes. Der Nachteil ist die um etwa zehn Punkte niedrigere Farbwiedergabe. Allerdings wird die exzellente Farbwiedergabe der PHILIPS Lampen nur wenigen Industriebeleuchtungsapplikationen benötigt (siehe DIN EN 12464-1:2011). Zur Veranschaulichung zeigt Bild 1 zwei keramische Entladungsgefäße für 250W Lampenleistung und zwar eine „Powerball"-Geometrie mit einem Aspektverhältnis von etwa eins für Farbwiedergaben Ra ≥ 90 und einen langgestreckten Brenner mit einem Aspektverhältnis von etwa fünf für Ra ≥ 80.

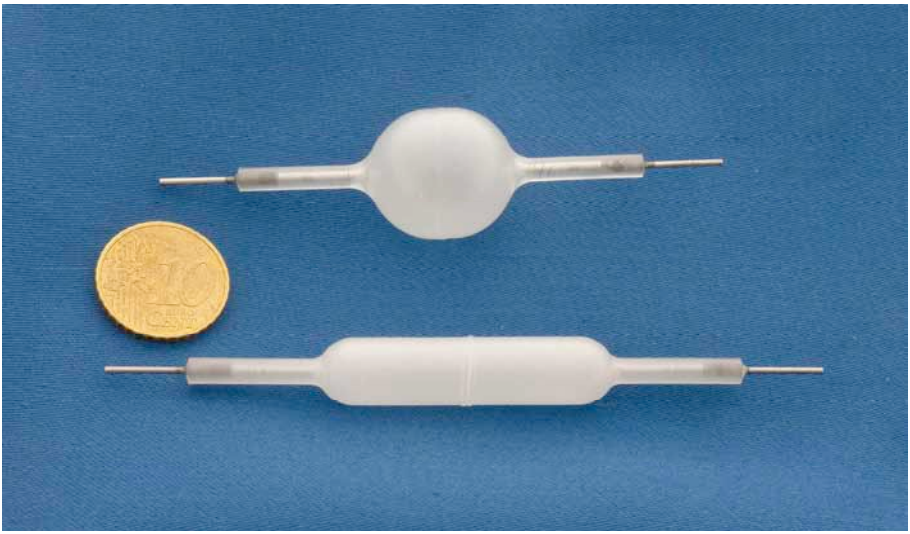


Abb. 1: Keramikgeometrien für hohe Effizienz (unten) bzw. hohe Farbwiedergabe (oben)

Die komplette Lampe ist in Abbildung 2 dargestellt. Um den Einsatz in vorhandenen Leuchten zu ermöglichen, wird ein klassischer Röhrenkolben mit einem E40-Schraubsockel verwendet. Das Entladungsgefäß lässt sich aber auch in andere Kolben mit anderen Sockeln einbauen, falls dies zu Effizienzsteigerung der Leuchte erforderlich ist. Die Lampe ist noch in der Entwicklung. Vor allem das Lebensdauerverhalten muss

noch abgesichert werden, die angegebenen Werte sind erfahrungsgeleitete Abschätzungen. Es ist geplant, entsprechende 150W- und 400W-Lampen zu entwickeln, mit Lichtströmen von etwa 19.000 lm bzw. 54.000 lm. Die 150W-Lampe wird damit ein ähnliches Lumenpaket wie heutige 250W Halogen-Metalldampflampen mit Quarzbrennern bzw. 400W Quecksilberhochdrucklampen aufweisen.

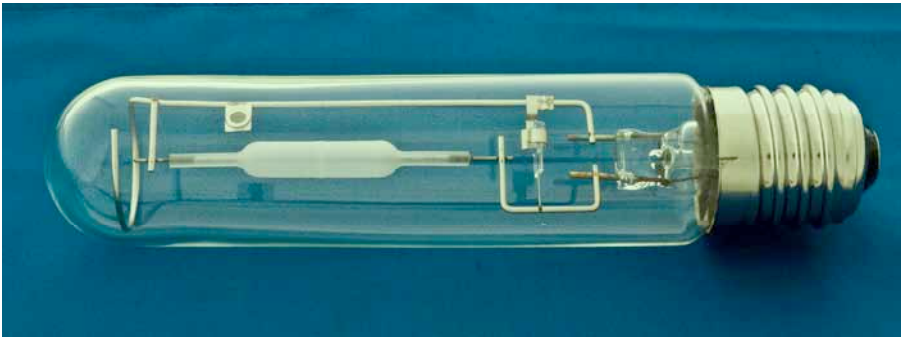


Abb.2: HCI-T 250W High Efficient

Von Osram wird auch ein 250W Vorschaltgerät entwickelt, das die Leistung bis mindestens 50% absenken kann. Das EVG wird auch andere 250W Hochdruckrucklampen betreiben können und hat eine Effizienz von 93%.

Leuchte ausgestattet mit	1 x HCI 250W High Efficient	4 x 80W LUMINUX® T5 HO CONSTANT
Technologie	Halogen-Metalldampflampe	Leuchtstofflampe
Lampenleistung(en)	250 W	320 W
Nennlichtstrom der Lampe(n)	32.500 lm	27.200 lm
Lampeneffizienz	130 lm/W	85 lm/W
Farbwiedergabeindex Ra	≥ 80	≥ 80
Effizienz des elektronischen Vorschaltgerätes	93 %	95 %
Effizienz einer hochwertigen Leuchte	82 %	90 %
Systemeffizienz	99 lm/W	73 lm/W
Dimmbarkeit	100% - 50% (evt. 30%)	100% - 1%
Nutzlebensdauer	16.000 h	18.000 h

Tab. 2: Leuchte ausgerüstet mit der neuen Hochdrucklampe verglichen mit einer Leuchte mit vier T5 Leuchtstofflampen

5 Vergleich der neuen Lampe mit Leuchtstofflampen

In Tabelle 2 sind die Eigenschaften einer Beleuchtungsanlage mit den neuen hocheffizienten 250 W Lampen denen einer Anlage mit T5-Leuchten gegenübergestellt. Als Leuchteneffizienz für die Hochdrucklampe ist 82% angesetzt; das ist Wert der effizientesten uns bekannten Leuchte für eine solche Lampe. Hier ist aber noch Optimierungspotential vorhanden, denn für die Verkaufsraumbeleuchtung gibt es Leuchten für Hochdrucklampen mit Reflektoren hohen Wirkungsgrades und vergüteten Abdeckscheiben, die Effizienzen über 90% aufweisen, der höchster erreichte Wert beträgt 96% /7/. Aber selbst mit heute vorhandenen Leuchten werden Systemeffizienzen von knapp **100 lm/W** erreicht und der entsprechende Wert von „High Output" T5 Leuchtstofflampen um 36 % übertroffen! Die Nutzlebensdauer der neuen Lampe ist dabei nur um ca. 10% geringer als die der Leuchtstofflampe. Bei Einsatz dieser Lampe kann somit erheblich Energie gegenüber Leuchtstofflampen eingespart werden.

Wie hoch diese Energieeinsparung im Groben ist, wird in Tabelle 3 auf Basis der Systemeffizienzwerte in Tabelle 2 für einige Szenarien mit und ohne Lichtmanagementsystem abgeschätzt. In eine genaue Berechnung müssten für die zu planende Anlage u.a. die Lichtverteilungskurven der zu vergleichenden Leuchten und daraus abgeleitet die Zahl der erforderlichen Leuchten eingehen. Zur Vereinfachung ist angenommen, dass die Lampeneffizienzen nicht von den Lampenleistungen abhängen, was nur näherungsweise zutrifft. Der Energieverbrauch einer Anlage mit T5-Lampen, die bei Nennleistung betrieben werden, ist mit 100% angesetzt. Da die Hochdrucklampe nur bis 50% der Nennleistung gedimmt werden kann, wird in den Szenarien 3-7 der Tabelle für diese Lampe bei 30% und 10% des Volllast-Beleuchtungsniveaus ein Energieverbrauch von 50% angesetzt, während bei der Leuchtstofflampe die volle Einsparung umgesetzt ist.

Beleuchtungsszenario	1 x HCI 250W High Efficient (η_{System} = 99,1 lm/W)	4 x 80W LUMINUX® T5 HO CONSTANT (η_{System} = 72,7 lm/W)
1. Ohne Lichtmanagement: permanenter Volllast-Betrieb	73 %	100 %
2. Mit Lichtmanagement: 50% der Zeit Volllast; 50% der Zeit auf 50% der Nennleistung reduziert	55 %	75 %
3. Mit Lichtmanagement: 50% der Zeit Volllast; 50% auf 30% der Nennleistung reduziert	55 %	65 %
4. Mit Lichtmanagement: 50% der Zeit Volllast; 50% auf 10% der Nennleistung reduziert	55 %	55 %
5. Mit Lichtmanagement: 30% der Zeit Volllast; 30% auf 50%; 30% auf 30%, 10% auf 10% der Nennleistung reduziert	48 %	55 %
6. Mit Lichtmanagement: 20% der Zeit Volllast; 80% auf 30% der Nennleistung reduziert	44 %	44 %
7. Mit Lichtmanagement: 20% der Zeit Volllast; 80% auf 10% der Nennleistung reduziert	44 %	28 %

Tab. 3: Szenarienvergleich des relativen Energieverbrauchs zweier Beleuchtungsanlagen

Das Ergebnis des Vergleichs ist, dass mit der neuen Halogen-Metalldampflampe aufgrund der deutlich höheren Lampeneffizienz trotz des eingeschränkten Dimmbereiches in vier von sieben Szenarien Energie eingespart wird. Bemerkenswert ist, dass auch in Szenario vier, in dem das Beleuchtungsniveau in 30% der Zeit auf 30% und in 10% der Zeit sogar auf 10% abgesenkt wird, die Hochdrucklampe günstiger ist. Nur in Szenario 7, in dem die Leistung über lange Zeit extrem reduziert wird, sind T5-Leuchtstofflampen energieeffizienter, da sie unbeschränkt gedimmt werden können.

6. Fazit

Neue Halogen-Metalldampflampen mit keramischen Entladungsgefäßen, die für die Industriebeleuchtung optimiert sind, erreichen sehr hohe Effizienzen und können aufgrund ihrer Leistungsregelbarkeit in Lichtmanagementsysteme eingebunden werden. Beleuchtungslösungen mit diesen Lampen verbrauchen weniger Energie als moderne Anlagen mit Leuchtstofflampen. Eine weitere Reduktion des Energieverbrauchs kann realisiert werden durch Effizienzsteigerungen der entsprechenden Leuchten und durch eine Absenkung der Untergrenze des Leistungsregelbereiches.

7. Literatur

/1/ Matthias Nagel, Osram Lighting Services, persönliche Mitteilung

/2/ Osram, elektronischer Produktkatalog im Internet, 30. Mai 2012

/3/ Philips, elektronischer Produktkatalog im Internet, 7. Juni 2012

/4/ Christian Daelman, Osram Applikationsingenieur, persönliche Mitteilung

/5/ Herremans H., Etman J. und Keijser R., Patent, WO 200045419, Publiziert am 3.8.2000

/6/ Geitenbeck j. und van Vliet A., Patent, DE 69718460 T2, Publiziert am 23.10.2003

/7/ Arclite Lichtvertrieb GmbH, Leuchtenserie Energy Mind Plus, elektronischer Produktkatalog im Internet, 2012

Neuartige Hocheffiziente Metallhalogenidlampen-Systeme

Dr. Klaus Stockwald, OSRAM AG , Werner-von-Siemens-Straße 6, 86159 Augsburg

1 Einleitung

Keramische Metallhalogenidlampen-Systeme stellen heute die kompaktesten Hochleistungslichtquellen mit den höchsten Konversionswirkungsgraden bei der direkten Umwandlung von elektrischer Leistung in visuelle Lichtstrahlung dar.
Diese Klasse von Plasma-Lichtquellen höchster Leistungsdichte ist neben ihrer Kompaktheit sehr robust und temperaturunempfindlich und erlaubt die effiziente Erzeugung von hochqualitativem Licht für die unterschiedlichen Anwendungen der Allgemeinbeleuchtung insbesondere im höheren Lichtstrombereich von 6 – 50 klm bei verschiedenen Farbtemperaturen und hohen Farbwiedergaben bis zu Ra >95.
Mit den sich in ihrer Leistungsfähigkeit und Effizienz rapide entwickelnden LED-Lichtquellen gehören sie zu den Lichtquellen-Systemen, die im kommenden Jahrzehnt für professionelle Lichtlösungen eingesetzt werden.
Dieser Beitrag stellt eine Forschungsstudie vor, welche daher der Fragestellung folgt: Inwiefern lässt sich die Energieeffizienz von keramischen Metallhalogenidlampen-Systemen für Allgemeinbeleuchtungszwecke noch deutlich steigern und welche Maßnahmen erlauben hierbei eine weitere Verbesserung des Maintenance-Verhaltens.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Heutige Metallhalogenidlampen-Systeme in Keramik-Technologie im Niederwattbereich erreichen typische System-Lichtausbeuten von 90-110 lm/W bei guter Farbwiedergabe Ra > 80..90 und haben einen Konversions-Wirkungsgrad von ca. 36%-40% von elektrischer Leistung in visuelle Lichtstrahlung.
Im Vergleich hierzu erreichen kommerzielle LED Systeme im Segment niedriger Leistungen heute bereits Lichtausbeuten von bis zu 170 lm / W bei kaltweißer Lichtfarbe und geringen Farbwiedergaben von ca. 60-65. Die Konversions-Wirkungsgrade von elektrischer Leistung in durch Phosphor-Konversion erzeugte Lichtstrahlung erreicht hierbei ebenfalls ca. 35-40 %.

Die Betriebs-Parameter heutiger technischer Hochdruck-Lampen-Systeme beschränken sich allerdings dabei in ihrer Konzeption auf einen universellen Systemansatz, der sich an der Kompatibilität der Entladungslampeneinheiten in Bezug auf mögliche Versorgungsgeräte der jeweiligen Leitungsklasse orientiert. Dies bedeutet, dass das Design der Hochdruck-Lampen im Wesentlichen für den optimalen und sicheren Betrieb an Standard-Vorschaltgeräten, wie z.B. solche mit Rechteckstromeinprägung- bzw. konventionellen magnetischen Vorschaltgeräten mit Netzstromeinprägung konzipiert sind.
Kürzlich berichtete Forschungsuntersuchungen, welche geschlossene System-Lösungen von Hochdruckentladungslampen zur Reduktion von Verlustmechanismen in Hochdruckentladungslampen in Betracht ziehen zeigen, dass angepasste Hochfrequenz-Betriebsverfahren mit kostengünstig erzeugtem sinusförmigem Stromformen in Betriebs-Parameter–Bereichen möglich sind, die von den bisherigen Designkonzepten nicht erreicht werden konnten /1, 2/.

3 Forschungshypothesen

Mittels neuer Hochfrequenz-Betriebsverfahren und spezifisch angepassten Keramiklampenformen lassen sich Metallhalogenidlampensysteme höchster Effizienz bei guter Farbwidergabe realisieren.
In diesem Beitrag werden hocheffiziente Keramik-Hochdrucklampensysteme vorgestellt, welche auf der Anwendung von akustisch induzierter Konvektion basieren, welche gleichzeitig Bogenbegradigung, erhöhte Plasmadurchmischung und effektive Unterdrückung von Segregation erzeugt.
Hiermit können hervorragende Eigenschaften von Hochdrucklampen in einem deutlich erhöhten Effizienz-Bereich von bis zu 150 lm/W für hochqualitatives weißes Licht realisiert werden.
Verschiedene neuartige Metallhalogenid-Füllungssysteme mit besonders hoher visueller Effizienz, welche gleichzeitig starke Bogeneinschnürungen /4/ zeigen, können in stabilisierten Betriebsmoden in jeder Betriebslage sicher betrieben werden.
Keramische Hochdrucklampen Konfigurationen werden hierbei in Kombination mit intelligenten Hochfrequenz-Vorschaltgeräten beschrieben, welche durch integrierte Kontrollprozeduren einen langzeitstabilen Betrieb ermöglichen.
Es wird ein Systemansatz bestehend aus keramischen Brennersystemen und angepassten intelligenten elektronischen Vorschaltgeräten untersucht und vorgestellt.

4 Forschungsmethode

Untersuchungen zu akustischen Resonanzfrequenz-Spektren von keramischen Hochdrucklampen haben gezeigt, dass Entladungsbrenner mit erhöhtem Aspekt-Verhältnis und angepasster Formgebung zu einer ausgezeichneten Selektivität verschiedener akustischer Moden führt, welche es ermöglicht, deren spezifische Anregung zur Bogenstabilisierung zu nutzen.

Im Konvektions-dominierten Betriebsbereich zeigen Metallhalogenid-Lampen mit hohem Aspekt-Verhältnis relative starke Plasmaentmischung verursacht durch Elemententmischung (bzw. Segregation) speziell in vertikaler Betriebsorientierung /2,3/. Durch diese Eigenschaft, die im Wesentlichen auf einem Zusammenspiel der natürlichen Konvektion mit gleichzeitig auftretenden Diffusionsprozessen der strahlungsaktiven Plasma-Komponenten zurückzuführen ist, wurden bisher derartige Systeme nur in einem relativ niedereffizienten diffusionsbestimmten Betriebsregime für technische Anwendungen entwickelt /2,3/. Derartige Systeme werden heute u.a. für die Straßenbeleuchtung kommerziell angeboten und liefern bei System-Lichtausbeuten von 110 lm/W Farbwiedergaben von 65-70 bei warmweißer Farbtemperatur.
Die Unterdrückung von Segregation in konvektionsdominierten Plasmabedingungen kann prinzipiell bei weiter erhöhten Gasdrücken erfolgen, allerdings treten dabei verstärkt erhöhte Einschnürungsgrade und durch magnetische Kompressionen erzeugte Plasmainstabilitäten /4/ auf, die diesen Betriebsbereich für die Anwendung in technischen Lampenplasmen und insbesondere in keramischen Hochdrucklampen bisher nicht zugänglich macht.

5 Untersuchungen

Neue Verfahren der akustischen Anregung wurden durch die Anwendung von intelligen-

ten elektronischen Abstimmverfahren des elektrischen Leistungsspektrums für den Lampenbetrieb ermöglicht /1/.
In diesem Falle führt die kombinierte Anregung von bzgl. der Plasmaausdehnung symmetrischen azimutalen und longitudinalen akustischen Moden zu einer stabilen geschichteten Multizellen-Konvektionsströmungsstruktur im Plasma, welche signifikant die Bogenstabilität, thermische Verluste und die Lichtausbeute verbessert. Hierdurch kann langzeitstabil eine Bogenbegradigung in Kombination mit einer Plasmadurchmischung eingestellt werden, wobei die Entmischung der strahlungsaktiven Plasmakomponenten stark unterdrückt wird. (vgl. Abbildung 1 und 2)

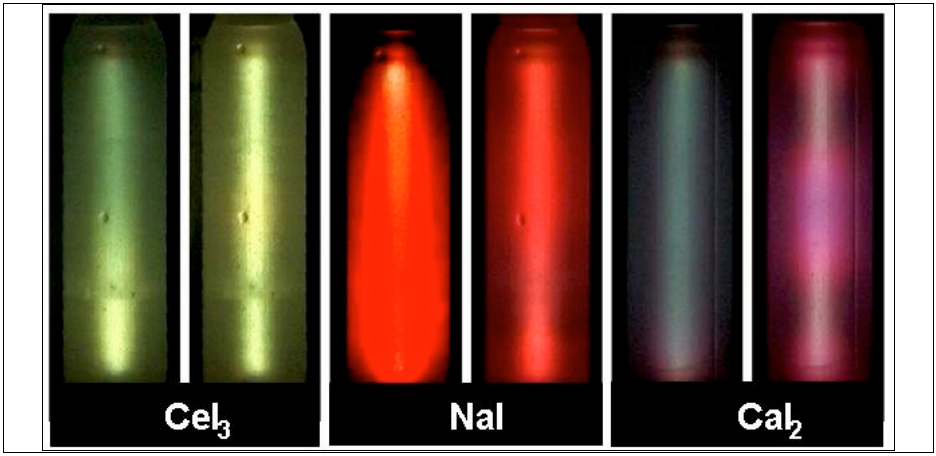


Abb. 1: Akustisch stabilisierte Multi-Zellen Konvektion in Hochaspekt Verhältnis Entladungsröhren welche vertikaler und radialer Segregation bei verschiedenen Metall-Halgonid Füllungs-Systemen entgegenwirken (links ohne, rechts mit Multizellen-Konvektion))

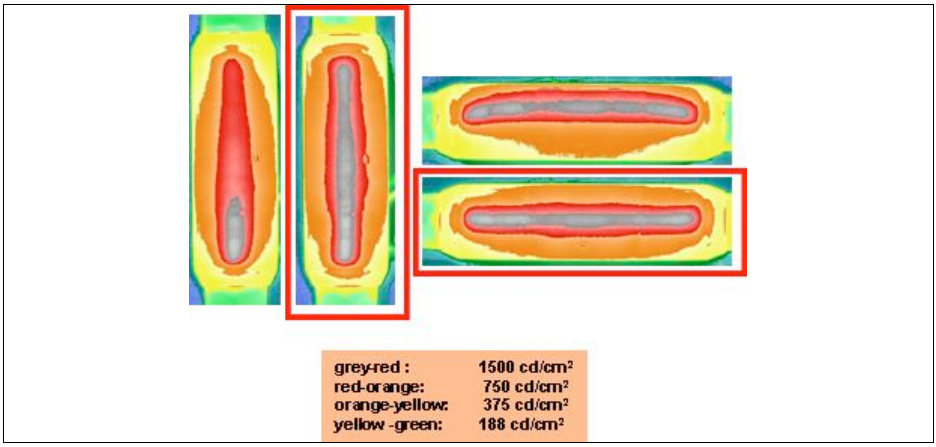


Abb. 2: Vergleich der Leuchtdichteverteilung von vertikal und horizontal betriebenen Lampen ohne und (rot umrahmt) mit Multizellen-Konvektion, welche eine verbesserte Betriebs-Homogenität im Falle von Multizellen-Konvektion in jeder Betriebslage zeigt.

Neue Ergebnisse zur Simulation von derartiger akustisch induzierter Gasströmung in Hochdruck-Entladungslampen konnten die Bildung von stabiler Konvektionszellen-Schichtung dieser Art bestätigen /5/. Dies führt zusätzlich zu Bogeneinschnürungen an den Positionen der Druck-Knoten der longitudinalen stehenden Druckwellen, verursacht durch Gasströmungen in Richtung des Bogenkerns.

Neue optimierte Abstimmverfahren /6/ des elektrischen Hochfrequenz-Leistungs-spektrums werden dabei für die Bogenbegradigung und die stabile Einstellung einer symmetrisch geschichteten Konvektionszellenstruktur angewandt. Durch eine kontrollierte Verschiebung der Hochfrequenz-Komponente, welche die Plasmamischung in der Nähe der 2ten longitudinalen Eigenfrequenz anregt, wird eine stabile Schichtungs-Konfiguration von gegensinnig rotierenden Konvektionszellen für jede Lampen-orientierung eingestellt. Zusammen mit einer geeigneten Formgebung der Endbereiche der Entladungsröhre wird dieses Strömungsmuster langzeitstabilisiert.
Durch die Wahl eines geeigneten Aspekt-Verhältnisses (Innenlänge / Innendurchmesser) der keramischen Lampengefäßes können bevorzugt Konvektionszellen mit annähernd gleicher Längen- wie Breitenausdehnung eingestellt werden, was zu einer deutlich erhöhten Konversionseffizienz des Bogenplasmas führen kann.
Die Erhöhungen der Lichtausbeute von entmischten im Vergleich zu akustisch gemischten Plasmabedingungen liegen bei bis zu 25% (vgl. Abbildung 3)

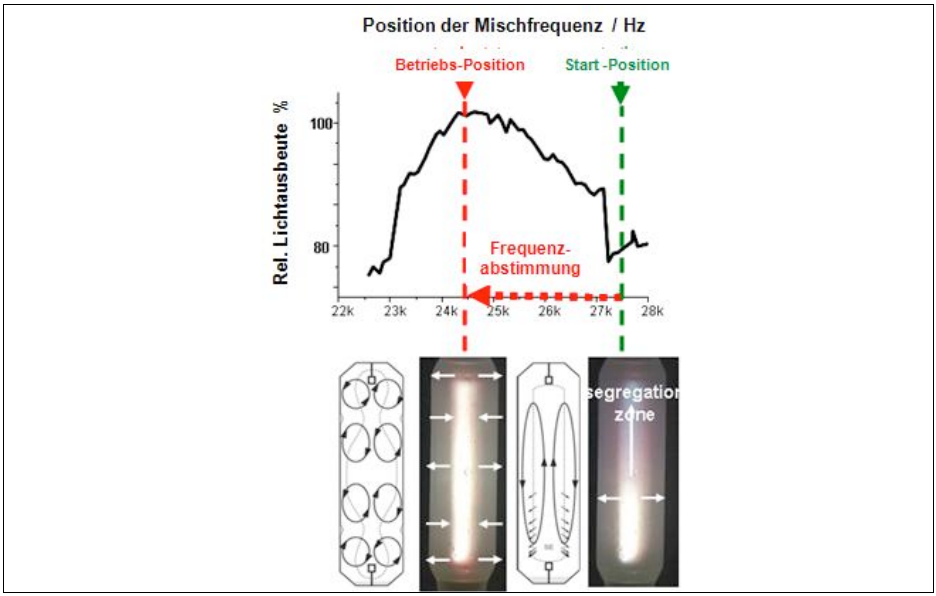


Abb. 3: Einstellung einer geschichteten Multizellen-Konvektions- Konfiguration durch eine Ab stimm-Prozedur der mischenden Leistungsfrequenz und die relative Änderung der Lichtausbeute

6 Ergebnisse

6.1 System-Charakteristika

Aufgrund der hervorragenden Plasmabogenstabilisierung können neue Füllungssysteme mit hoher Strahlungskonversionseffizienz und erhöhtem Einschnürungsgrad verwendet werden, was zur Realisierung hocheffizienter Metallhalogenid-Lampensystemen führt.

Verschiedene Füllungssysteme basierend auf Na- / Ce- / Ca-Jodid-Mischungen erlauben sehr hohe Konversions-Wirkungsgrade von elektrischer Leistung in visuelles Licht von bis zu 50%, insbesondere auch für niedrige Leistungsbereiche (z.B. für 100W Systeme). Lampen mit weißer Lichtfarbe von 3000K - 3750K zeigen Lichtausbeuten im Bereich von 150 lm / W bei gutem Farbwiedergabeindex von 80-90.

Ein typisches Lampenspektrum einer 90W Lampe (Systemleistung mit Vorschaltgerät 98W) zeigt Abbildung 4. Die visuelle Emissions-Charakteristik mit einer Farbtemperatur von 3250K und gutem Farbwiedergabeindex von 85 kommt der von hochbelasteten Halogenglühlampen nahe, allerdings hier mit einer bedeutend höheren Lichtausbeute von 141 lm/W.

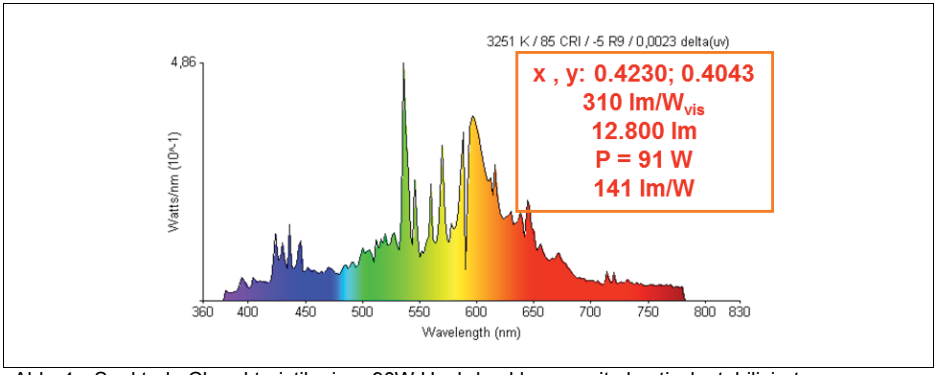


Abb. 4: Spektrale Charakteristik einer 90W Hochdrucklampe mit akustisch stabilisierter Multizellen-Konvektion (HE HCI) mit Lichtausbeute von 141 lm/W bei einer Farbtemperatur von 3250 K und Farbwiedergabe von 85.

Dimmbetriebsverfahren, welche die stabilisierte Multi-Zellen-Konvektion aufrechterhalten erlauben energieeffiziente Dimmung bis ca. 50%.

Diese neuen Hochdrucklampen, kombiniert mit geeignet konfigurierten und intelligent programmierten elektronischen Vorschaltgeräten, welche auf kostengünstigen und verlustarmen Halbbrücken-Schaltungs-Topologien beruhen, stellen neue hocheffiziente energiesparende Hochdrucklampen-Systeme für Allgemeinbeleuchtungszwecke dar.

Einige der im Rahmen dieser Studie untersuchten Systemleistungsstufen, angepasst für die Erzielung von typischen Lichtströmen, wie sie bei heutigen Beleuchtungsinstallationen genutzt werden sind in Tabelle 1 angegeben. Die Konversionswirkungsgrade von elektrischer Leistung in sichtbare Strahlung beträgt dabei zwischen 44 und 50%.

System-Leistungsstufe	55 W	100 W	120 W	160 W
Lampenleistung	50 W	91 W	110 W	148 W
Lichtstrom	**6.800 lm**	**12.800 lm**	**15.700 lm**	**22.400 lm**
Lichtausbeute	136 lm/W	141 lm/W	143 lm/W	151 lm/W
Farbtemperatur	3250 K	3250 K	3300 K	3450 K
Farbwiedergabe / Ra	85	85	83	85
System-Ausbeute	**124 lm/W**	**130 lm/W**	**131 lm/W**	**140 lm/W**

Tab.1 : Untersuchte Beispiele der Skalierung der System-Leistungsstufen von Hocheffizienten Keramik-Metallhalogenidlampen-Systemen basierend auf akustisch stabilisierter Multizellen-Konvektion

6.2 Maintenance-Verhalten

Bei den hier verwendeten Metallhalogenid-Füllungssystemen, die auf Na-/Ce-Jodid Mischungen beruhen, werden bereits sehr gute Maintenance-Verhalten erzielt, welche 80% Maintenance bei 16.000h Brenndauer erreichen können.
Die hier dargestellten 100W-Systeme erreichen bei durchgeführten Lebensdauerversuchen 97% Lichtstrom-Maintenance bei 2500h und Lebensdauern >12000h.

Durch weitere Plasma-Zusätze, die sich aufgrund des verwendeten HF- Hochvolt-Betriebsverfahrens elektrisch unkritisch auswirken, können weitere Maintenance-Verbesserungen durch einen noch weiter verbesserten Wolframtransport in den Lampen eingestellt werden. Die Bogenstabilisierung auf die Lampenachse erzeugt ein gleichmäßiges Temperaturprofil des Keramikbrenners in jeder Brennlage, was sich günstig durch verringerte thermische Wechselbelastungen während des Lampenbetriebs auswirkt.

7 Zusammenfassung

Der vorgestellte Systemansatz hat das Potential der Steigerung der System - Lichtausbeute um ca. 37% gegenüber heutigen Keramik-Lampen-Systemen von ca. 95 auf 130 lm/W, wobei durch weitere naheliegende Optimierungsschritte die Marke von 150 lm/W bei guter Farbwiedergabe Ra > 80 bei Leistungsklassen im Bereich von 50 -250W erreichbar erscheint.
Durch die Nutzung derartiger Systeme bei Hochdrucklampen-Beleuchtungsanwendungen mit mittlerem und hohem Lichtstrombedarf von warm-weißer bis brillant-weißer Lichtfarbe kann die Energie- und CO_2 Bilanz gegenüber heutigen kommerziellen Systemen deutlich verbessert und dabei Energiebedarf und CO_2 Ausstoß bis zu 30% gesenkt werden. (vgl. Abb.5).

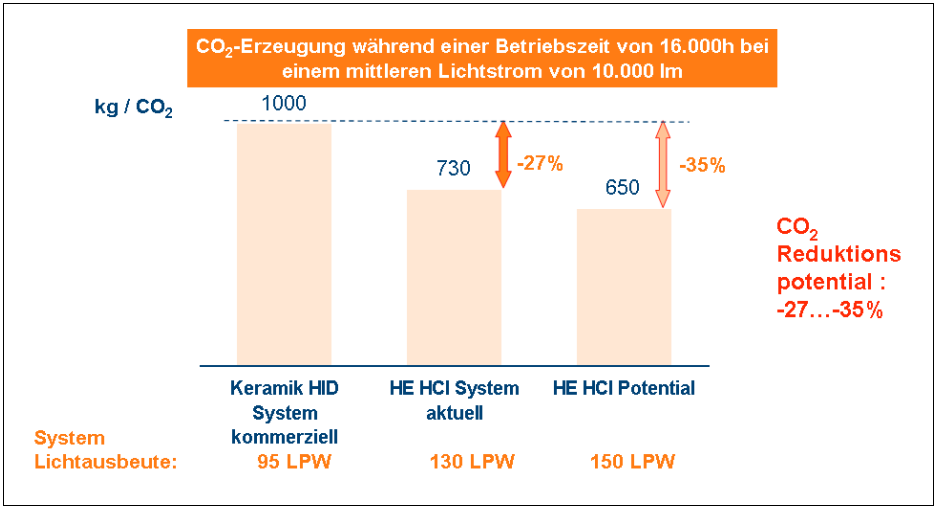


Abb. 5: Potential der mit Energieeinsparungen verbundenen CO_2 Reduktion bei Nutzung von Metallhalogenidentladungslampen mit akustisch stabilisierter Multizellen-Konvektion (HE HCI)

8 Danksagung

Diese Studie wurde in der Forschungsabteilung der OSRAM AG R&D R EU in enger Zusammenarbeit mit den Kollegen der Entwicklungsabteilung in Berlin und den Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen in Beverly und Exeter U.S.A. durchgeführt.
In diesem Zusammenhang möchte der Autor allen beteiligten Kolleginnen und Kollegen für die Erarbeitung der Grundlagen für diesen Beitrag danken:

9 Referenzen

/1/ K. Stockwald et al.,"Significant efficacy enhancement of low wattage metal halide HID lamp systems by acoustically induced convection configuration"; Proc. IEEE ICOPS, Karlsruhe , Germany 2008; 6C7, p.421
/2/ A. J. Flikweert et al.,"Axial segregation in a metal halide lamp at 1-10g measured by emission spectroscopy" Proc. IEEE ICOPS, Karlsruhe , Germany 2008;; 6C6, p.421
/3/ A. J. Flikweert et al., "Emission spectroscopy for characterizing metal halide lamps" J. Phys. D: Appl. Phys. **41** (2008), 195203 (11p)
/4/ W.W. Stoffels et al.;"Helical instability in metal halide lamps under micro-and hypergravity conditions", Appl. Phys. Lett. **88**, 091502 (2006)
/5/ T. D. Dreeben, G. P. Chini, " Two-dimensional streaming flows in high intensity discharge lamps", Phys. Fluids **23**, 056101 (2011)
/6/ H. Kaestle, K. Stockwald, "Betriebsverfahren und System für den Resonanzbetrieb von Hochdrucklampen im longitudinalen Mode", EP Patentschrift EP 1 422 980 B1, 06.09.2006 / Patentblatt 2006/36

Keramische HID-Lampen für den Halogenlampenersatz in professionellen Anwendungen

S. Lankes, B. Koch, OSRAM AG, Nonnendammallee 44, 13629 Berlin

1 Einführung

Im März 2009 haben sich die europäischen Regierungen auf einen verbindlichen Zeitplan zum Ausstieg aus der Nutzung von Glühlampen geeinigt. Danach sollen klassische Glühlampen bis 2012 effizienteren Lampentypen Platz gemacht haben. Alle Lichtquellen müssen ab 2012 der Energieeffizienzklasse C des EU-Label-Systems entsprechen. Das schließt praktisch traditionelle Glühlampen und weniger effiziente Typen der Halogenlampen vom Markt aus.

Technologien, wie z.B. Metallhalogenid-Hochdruck-Lampen mit keramischem Entladungsgefäß (im folgenden als HID-Lampen bezeichnet) haben das Potential die Effizienz von Lichtsystemen gegenüber Halogenglühlampen bis zu einen Faktor 5 zu steigern. Leider erfüllen HID-Lampen heute jedoch noch nicht alle typischen Anforderungen der Allgemeinbeleuchtung. Sie haben zwar eine exzellente Lichtqualität, sind aber nur bedingt dimmbar, haben kein Sofortlicht, sind nicht kompakt genug und ihre Anschaffungskosten sind vergleichsweise hoch. Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projektes SEEL („Solutions for energy efficient lighting“)sollen diese Eigenschaften nun jedoch in einer HID-Lampe vereinigt werden.

HID-Lampen sind Gasentladungslampen. Beim Start der Lampe muss zunächst das Füllgas der Lampe durch einen Hochspannungszündfunken in ein leitfähiges Plasma überführt werden. Es bildet sich eine selbstständige Gasentladung mit einer Betriebsspannung zwischen 20 und 250 V aus. Dadurch verdampfen während einer Aufheizphase die flüssigen und festen Füllungsbestandteile, Quecksilber und Metallhalogenide. Erst wenn die Lampe ihre Betriebstemperatur von etwa 1000°C an der kältesten Stelle des Brennerinnenraums (cold spot) erreicht hat, sind auch der Betriebsdruck von etwa 10 bar sowie die nominellen lichttechnischen und elektrischen Daten der Lampe erreicht. Das Quecksilber erzeugt dabei vor allem den Druck und dominiert den Widerstand des Plasmas, ohne wesentlich zur optischen Emission beizutragen, die Metallhalogenide bestimmen über ihre Emission die lichttechnischen Parameter.

Hieraus ergeben sich die typischen Nachteile einer HID-Lampe: hohe Zündspannung bei Wiederzündung einer heißen Lampe aufgrund des hohen Betriebsdrucks, Hochlaufphase mit geringerer Lichtintensität und Abhängigkeit der lichttechnischen und elektrischen Daten von der umgesetzten elektrischen Leistung beim Dimmen.

2 Heißzündfähigkeit

Als Füllgas der Lampen in der Allgemeinbeleuchtung dient üblicherweise Argon mit einem Fülldruck zwischen 50 und 500 mbar. Dadurch beträgt die Zündspannung einer solchen Lampe im kalten Zustand 3 – 5 kV. Wird eine Lampe abgeschaltet, so erlischt das Entladungsplasma sofort. Wegen ihrer thermischen Masse kühlt die Lampe jedoch nur langsam ab. Ebenso bleibt der hohe Druck innerhalb der Lampe erhalten, bis das Quecksilber wieder kondensiert ist. Zündspannungen üblicher Systeme mit sofortiger Wiederzündung liegen daher zwischen 25 und 100 kV. Die Verwendung so hoher Spannungen ist mit großem Isolationsaufwand verbunden. Solche Systeme sind praktisch

nur durch Verwendung zweiseitig gesockelter Lampen (z.B. TS- oder FC-Sockel) bzw. Lampen mit verhältnismäßig großen Sockeln (z.B. G22) möglich.

Für die Reduktion der Heißzündspannung sind im Wesentlichen drei Faktoren relevant: Erstens die Quecksilberfüllmenge bezogen auf das Volumen des Brenners. Sie bestimmt den Druck der heißen Lampe. Zweitens der Abstand der Elektroden, er bestimmt die elektrische Feldstärke, die bei einer bestimmten Spannung erreicht wird. Drittens die Zusammensetzung der verdampften Metallhalogenide. Unglücklicherweise sind jedoch alle diese Faktoren bereits durch die elektrischen und lichttechnischen Zielparameter bestimmt. Möglich ist jedoch eine Erhöhung der elektrischen Feldstärke im Bereich einer Elektrode (Scholzsche Zündhilfe). Hierdurch kann die Heißzündspannung praktisch halbiert werden. Realistisch können so für Lampen bis 150W Zündspannungen von knapp unter 10 kV realisiert werden (siehe Abb. 1).

Ein weiterer Einfluss ergibt sich aus der Art und dem Fülldruck des Startgases: Eine Erhöhung des Startgasdruckes (zum Beispiel zur Realisierung eines hohen Anfangslichtstromes) führt ebenfalls zu einer deutlichen Erhöhung der Heißzündspannung (siehe Abb.2).

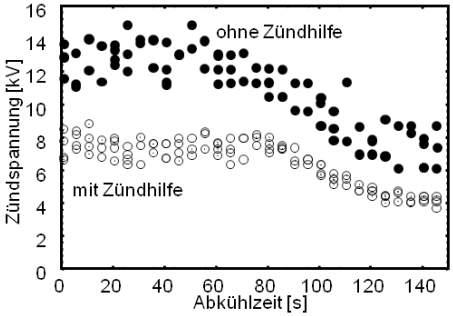


Abb. 1: Heißzündspannung für keramische 35 W Brenner, mit und ohne Zündhilfe.

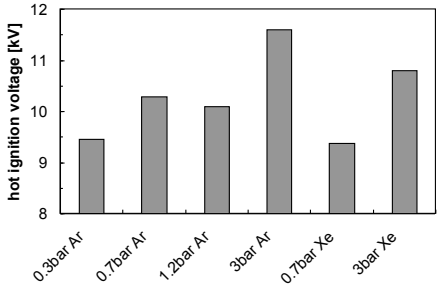


Abb. 2: Auswirkung der Gasart und des Kaltfülldrucks des Füllgases auf die Heißzündspannung.

3 Dimmbarkeit

Idealerweise zeigen Lampen für die Allgemeinbeleuchtung einen neutral weißen Farbeindruck. Diese Anforderung wird von heutigen HID-Lampen bei Nennleistung gut

erfüllt. Während sich der Farbeindruck von Halogenlampen beim Dimmen aufgrund der Absenkung der Wendeltemperatur ins Rote verschiebt, tendieren HID-Lampen eher zum Grünen. Dies wird hervorgerufen durch eine Änderung der Gaszusammensetzung in der Entladung aufgrund der unterschiedlichen Kondensationstemperaturen der einzelnen Füllungsbestandteile.

Weißes Licht wird meist durch seine Farbtemperatur beschrieben, der Farbeindruck entspricht dem eines Planck'schen Strahlers bei der entsprechenden Temperatur. Alternativ kann weißes Licht einer bestimmten Farbtemperatur durch die entsprechenden Koordinaten im Farbraum dargestellt werden. Ein Farbstich ist dann durch die Abweichung des gemessenen Farborts von dem eines Planck'schen Strahlers gleicher Farbtemperatur charakterisiert. Allerdings können nicht beliebig kleine Abweichungen von einem Beobachter wahrgenommen werden. Farborte, die von einem Standard-Beobachter nicht unterschieden werden können, liegen innerhalb einer sogenannten MacAdam-Ellipse. In den meisten Anwendungen sind viermal so große Bereiche ausreichend (4 SWE = Schwellwerteinheiten), die amerikanische Energy Star Zertifizierung erlaubt sogar 7 SWE. Sollen in einer Anwendung Lampen unterschiedlicher Leistung betrieben werden, so ist zu fordern, dass sich der Farbort auch beim Dimmen nur innerhalb dieser Ellipsen ändert.

Für die Entwicklung dimmbarer HID-Lampen gibt es im wesentlichen zwei Wege. Bei dem einen Ansatz wird die Temperatur überall im Brenner so hoch gehalten, dass auch bei Leistungsreduktion immer alle Füllungsbestandteile vollständig verdampft sind. Dies benötigt eine neue, aufwändige Verschlußtechnologie, die mit sehr hohen Investitionen verbunden ist /1/. Der zweite Ansatz, der von OSRAM verfolgt wird, ist, nur noch Füllungsbestandteile mit ähnlichen Kondensationstemperaturen zu verwenden. Ändert sich dabei die geringste Temperatur im Brennerinnenraum (Cold-Spot-Temperatur), so hat das nur einen geringen Einfluß auf die Gaszusammensetzung im Bogen. In Abbildung 4 ist gezeigt, wie mit diesem Ansatz die Drift des Farbortes einer Keramikversuchslampe mit Nennleistung 70W beim Dimmen auf 30W innerhalb einer MacAdam-Ellipse mit 4 SWE gehalten wurde. Zum Vergleich ist auch das Verhalten einer dem Stand der Technik entsprechenden Lampe gezeigt.

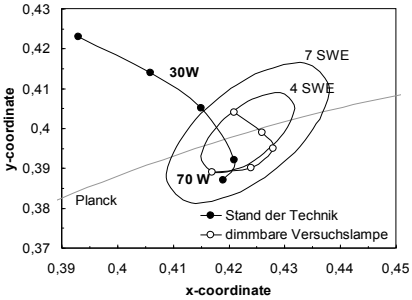


Abb. 4: Änderung des Farbortes beim Dimmen.

Neben einer guten Farbkonsistenz beim Dimmen ist bei Lampen für die Allgemeinbeleuchtung eine hohe Effizienz und für viele Anwendungen auch ein Farbwiedergabeindex Ra>90 gefordert. Beides ist auch von der dimmbaren Versuchslampe erfüllt (siehe Abbildung 5).

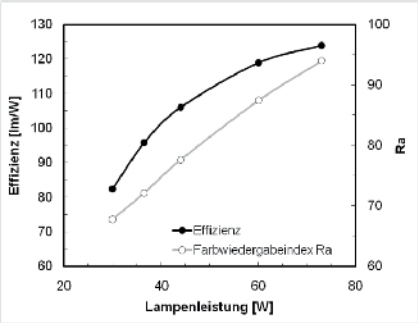


Abb. 4: Änderung der Effizienz und des Farbwiedergabeindex beim Dimmen der Versuchslampe

4 Fazit

HID-Lampen besitzen eine deutlich höhere Effizienz als Glühlampen und sind somit eine interessante Alternative zur Energieeinsparung. Der Nachteil von heutigen Lampen sind fehlende Heißzündfähigkeit und Dimmbarkeit. Dies kann durch die hier aufgezeigten Technologieschritte überwunden werden. Vor der erfolgreichen Markteinführung dieser Technologie sind jedoch noch weitere Fragen zu bearbeiten. So muß die Spannungsfestigkeit des Sockel-Fassungs-Systems an die erhöhten Anforderungen angepaßt werden. Auch die häufig beobachtete Flickerneigung von gedimmten Lampen muß eliminiert werden. Laufende Untersuchungen bieten hier vielversprechende Ansätze.

Diese Arbeit wurde gefördert durch das BMBF im Rahmen des CATRENE-Projekts.

Literatur

/1/ J. Hendricx, et al., 12th International Symposium on the Sciences and Technology of Light Sources (LS-12)
Unsaturated ceramic metal halide lamps, A new generation of HID lamps

Radioaktivitätsfreie HID Lampen

Dr. Stefan Lichtenberg, OSRAM AG, Nonnendammallee 44, 13625 Berlin

1 Einleitung

Halogen-Metalldampflampen für die Allgemeinbeleuchtung in Quarz und Keramiktechnologie enthielten bisher radioaktive Inhaltsstoffe wie Thorium und ^{85}Krypton.

Zur Gefügestabilisierung des Elektrodenmaterials wurde Thoriumdioxid in der Größenordnung von ca. 1 % dem Wolfram zugesetzt. Ein weiterer Effekt des Thoriums ist eine Reduktion der Austrittsarbeit an der Elektrode (Atomfilmkathode) was zu geringeren Elektrodentemperaturen führt /1/. Beide Effekte wirken sich positiv auf die Lichtstrommaintenance der Lampen aus.

Für die Zündung einer Halogen-Metalldampflampe werden sogenannte Primärelektronen im Entladungsgefäß benötigt. Die Bereitstellung von Primärelektronen wurde mit Hilfe des ^{85}Krypton (Betastrahler) als Beimischung zum Startgas Argon realisiert. Das Anlegen einer Zündspannung führt zur Beschleunigung der Primärelektronen, die durch Stoßprozesse mit Argon-Atomen weitere freie Ladungsträger generieren. Es kommt zu einem Lawinendurchbruch aus dem sich dann ein Entladungskanal ausbildet.

2 Gesetzliche Bestimmungen

Die Verwendung von radioaktiven Substanzen in Produkten ist strengen Regeln für den Import/Vertrieb und den Transport unterworfen. Die folgenden Absätze beschreiben die wesentlichen gesetzlichen Bestimmungen und die Konsequenzen für die Lampen.

Zu den grundlegenden Anforderungen der International Atomic Energy Agency (IAEA) Sicherheitsstandards /2, 3/ gehört, dass jeder Staat eine Instanz einsetzt, die für die Einhaltung von Bestimmungen für den Umgang mit Radioaktivität verantwortlich ist. Die internationalen Richtlinien der IAEA oder auch der EU /4/ zum Import/Vertrieb von Produkten mit radioaktiven Inhaltsstoffen sehen vor, dass folgende Grundlagen erfüllt werden:

a) Rechtfertigung: Radioaktive Substanzen dürfen nur dann genutzt werden, wenn der Nutzen größer ist als der Schaden für Mensch und Umwelt.
b) Optimierung: Die Zugabe von Radionukliden darf nicht größer sein als unbedingt notwendig.
c) Limitierung: Die Strahlenbelastung für den Kunden darf nicht größer sein als eine bestimmte Grenze.

Die Gesetze in den einzelnen Staaten orientieren sich zwar an den internationalen Richtlinien, weichen aber voneinander ab. Für den Vertrieb von Produkten mit radioaktiven Inhaltsstoffen ist es aktuell notwendig, von jedem einzelnen Staat eine Autorisierung zum Import/Vertrieb von Produkten mit radioaktiven Inhaltsstoffen einzuholen.

Es gibt daher Bestrebungen, die Bestimmungen in den einzelnen Ländern zu vereinheitlichen und für Produkte mit radioaktiven Inhaltsstoffen, die nachweislich keine Gefährdung für Mensch und Umwelt darstellen, eine Befreiung zu erwirken /5/. Für Lampen wird dies in Europa durch die European Lamp Companies Federation (ELCFED) vorangetrieben, die auf www.lamp-regulations.org über das Thema informiert.

Bezüglich des Transports von Produkten mit radioaktiven Inhaltsstoffen ist der IAEA Safety Standard No. TS-R-1 /6/ international anerkannt. Eine detaillierte Betrachtung der Strahlenbe-

lastung beim Transport in /7/ erfasst dazu neben Lampen weitere Produkte, während /8/ ausschließlich auf Lampen eingeht aber neben dem Transport auch die Entsorgung behandelt. Bei der Überschreitung von Grenzwerten für die spezifische Aktivität der radioaktiven Inhaltsstoffe kommt es zur Limitierung der Losgröße für deklarationsfreie Lieferungen auf eine maximale Aktivität. Die spezifische Aktivität des Startgasgemisches aus ^{85}Krypton und Argon darf einen Wert von 100 kBq/g nicht überschreiten, um in Bezug auf ^{85}Krypton deklarationsfrei zu bleiben. Bei Thorium liegt der spezifische Grenzwert für das langlebige Th-232 bei 10 Bq/g und für Th-228 bei 1 Bq/g. Beide Isotope treten in der Elektrode auf. Für eine typische Beimengung von 1% ThO_2 zum Wolfram wird eine spezifische Aktivität des Elektrodenmaterials von 71 Bq/g erzielt und die Grenzwerte somit überschritten. Die Folge ist, dass beim Versand von Lampen mit thoriumhaltigen Elektroden eine Losgröße die maximale Aktivität von 10 kBq nicht überschreiten darf, da es sonst zu einer Klassifizierung als Gefahrentransport (UN 2911) kommt.

Abbildung 1 zeigt einen Entscheidungsbaum für die gesetzlichen Bestimmungen zum Import/Vertrieb und zum Transport von HID-Lampen. Aus der Grafik geht hervor, dass ein weltweiter Vertrieb und der Transport ohne zusätzliche Maßnahmen nur für radioaktivitätsfreie Lampen möglich ist.

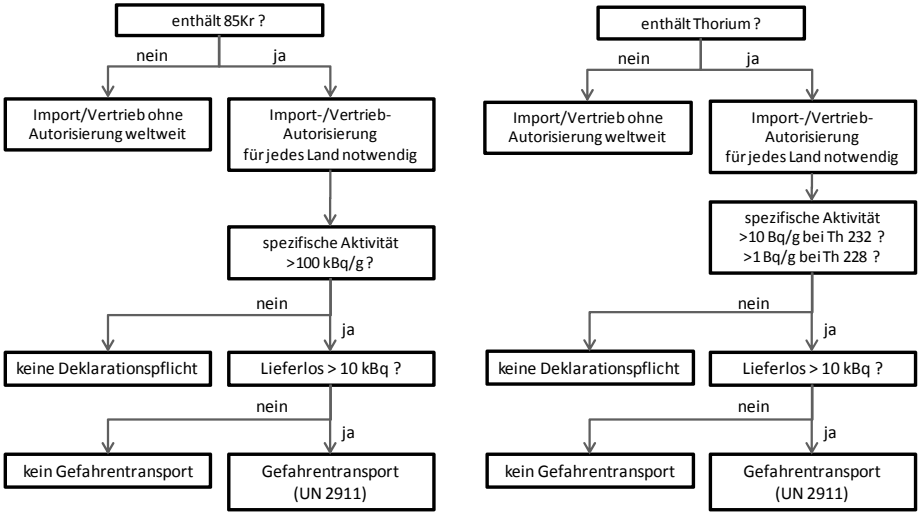


Abb. 1: Schematische Darstellung der gesetzlichen Bestimmungen für Lampen mit ^{85}Kr und/oder Thorium.

Osram hat die Themen Umweltschutz und die Einhaltung von Bestimmungen (Compliance) in den Unternehmensgrundsätzen verankert. Es wird intensiv an der Eliminierung von radioaktiven Inhaltsstoffen gearbeitet, denn nur umweltfreundliche Produkte ohne Radioaktivität dürfen in Länder vertrieben werden, von denen keine Autorisierung erteilt wurde.

3 Eliminierung von Thorium

Die Elektroden von HID-Lampen in Keramiktechnologie wurden von Beginn an aus Wolfram mit Zusätzen von Aluminium, Kalium und Silizium im ppm-Bereich gefertigt, so dass hier kei-

ne Maßnahmen ergriffen werden mussten, um Thorium zu eliminieren. Für HID-Lampen in Quarztechnologie (70-400 W) wurden fast ausschließlich thorierte Elektroden eingesetzt. Bei den Untersuchungen zum Ersatz des thorierten Elektrodenmaterials hat sich ebenfalls Wolfram mit Zusätzen von Aluminium, Kalium und Silizium durchgesetzt. Wegen der geänderten Austrittsarbeit des Elektrodenmaterials war einer Optimierung der Elektrodengeometrie notwendig. Mit dem thoriumfreien Design wird eine Lichtstrommaintenance erzielt, die fast der Qualität der Lampen mit thorierten Elektroden entspricht. Osram Lampen in HCI und HQI Ausführung, die in Europa gefertigt werden, sind daher thoriumfrei.

4 Eliminierung von ^{85}Krypton

Für eine Eliminierung von ^{85}Krypton aus den HID-Lampen musste ein Ersatz zur Erzeugung von Primärladungsträgern im Entladungsgefäß gefunden werden. Alternativ zur direkten Erzeugung von Elektronen als Betastrahlung kann durch die metallischen Elektroden die Feldemission oder die Photoemission genutzt werden.

Ein Ansatz über die Feldemission ist z.B. die nach Ihrem Erfinder benannte Scholz'sche Zündhilfe /9/ für HCI-Lampen. Durch eine Drahtschleife um die Kapillare von HCI-Lampen werden wegen der unterschiedlichen Polung der Drahtschleife und des Elektrodensystems in der Kapillare sehr hohe elektrische Feldstärken im Gasraum in der Kapillare erzeugt. Aus dem Elektrodensystem treten bei hinreichend großer Feldstärke Elektronen durch Feldemission aus und erzeugen so eine dielektrisch behinderte Vorentladung in der Kapillare, die dann zum Durchschlag der eigentlichen Gasstrecke zwischen den Elektroden führt. Neben der Scholz'schen Zündhilfe gibt es verschiedene andere patentierte Lösungen, die das gleiche Prinzip nutzen. Das Problem bei allen diesen Lösungen ist, dass es im Markt eine Vielzahl von elektronischen Vorschaltgeräten (EVG) gibt, die uneinheitliche Zündspannungen aufweisen. Für EVGs mit geringen Zündspannungen reicht die resultierende elektrische Feldstärke jedoch häufig nicht aus, um die Lampen zuverlässig zu zünden.

Die andere Alternative ist die Photoemission von Elektronen. Für diese Lösung muss Licht mit hinreichend großer Energie (>4,5 eV) auf die Elektroden fallen, um Photoelektronen zu emittieren. Grundlagen zur Wirksamkeit von UV-Strahlung auf die Zündung von Lampen wurden in /10/ veröffentlicht. Die Evolutionsschritte von der Erzeugung von UV-Strahlung mit Außenkolbenentladungen über elektrodenlose ignition-enhancer (IE) hin zum quecksilberhaltigen IE mit einer Elektrode werden in /11/ vorgestellt. Für die Erzeugung von UV-Strahlung in anderen Entladungsgefäßen als dem Brenner gibt es auch eine Reihe von patentierten Lösungen, die teilweise aber lampenspezifisch sind.

Quecksilberfreie IE in Quarztechnologie /12/ stellen eine kostenoptimierte Lösung dar, die in fast allen Halogen-Metalldampflampen für die Allgemeinbeleuchtung eingesetzt werden können. Die Anordnung externe Elektrode/Quarzglas/Gasraum/innere Elektrode führt zur Ausbildung einer dielektrisch behinderten Entladung (DBE) zum Zeitpunkt des Zündimpulses. Die in der DBE auftretenden kurzen Stromimpulse stellen keine Belastung für die Zündspannung dar, sodass die extern anliegende Zündspannung vollständig über dem Brenner anliegt. Eine Erzeugung der Entladung im IE erfolgt genau wie die Ansätze zum Lampenstart über hohe elektrische Feldstärken (Feldemission). Dies wird durch eine eng über dem IE sitzende externe Elektrode und eine scharfkantige Molybdän-Folie als innere Elektrode verursacht. Der Unterschied bei der Anwendung des IEs zur Scholz'schen Zündhilfe ist aber, dass der IE als eigenständiges Bauteil gezielt auf eine geringe Zündspannung hin optimiert werden kann. Es ist daher mit IEs nach /12/ möglich, eine Zündung der Lampen für die Vielzahl von elektronischen Vorschaltgeräten zu ermöglichen. Die Gasart, der Fülldruck und die Geometrie des IEs

wurden hinsichtlich der zu emittierenden Strahlung, einer möglichst geringen Durchschlagspannung und dem Schwärzungsverhalten über der Lebensdauer des IEs optimiert. Der Einsatz eines Inertgases verhindert chemische Reaktionen, die die Lebensdauer reduzieren könnten. Argon zeichnet sich unter den Inertgasen durch hohe industrielle Verfügbarkeit und geringe Durchschlagspannungen aus /13/. Die dielektrisch behinderte Entladung bei ca. 40 mbar führt zur Emission von Argon-Excimer-Strahlung bei einer Wellenlänge von ca. 190 nm /14/, bei der sowohl Quarzglas als auch Al_2O_3-Keramik eine hinreichend große Transmission haben.

Im Vergleich zu Lampen mit ^{85}Krypton, die eine spezifische Aktivität von 185 kBq/g im Füllgas haben, erfolgt der Lampenstart mit Lösungen basierend auf UV-Strahlung deutlich schneller. Für einen zuverlässigen Lampenstart ist es erforderlich, dass ein Primärelektron und ein Zündimpuls gleichzeitig auftreten. Für Lampen mit ^{85}Krypton ist insbesondere bei einem kleinen Brennervolumen die absolute Aktivität gering und damit auch die Wahrscheinlichkeit, dass ein radioaktiver Zerfall und ein Zündimpuls gemeinsam auftreten. Der Lampenstart erfolgt daher im Mittel verzögert und kann in Einzelfällen mehrere 10 s betragen. Bei den Lampen mit UV-Zündhilfen wird die UV-Strahlung durch den Zündimpuls erzeugt und die Primärlelektronen stehen damit exakt bei Anliegen der Zündspannung zur Verfügung. Die Folge sind sehr kurze Startzeiten.

4.1 Applikation des UV-enhancers in HID-Lampen mit Keramikbrenner

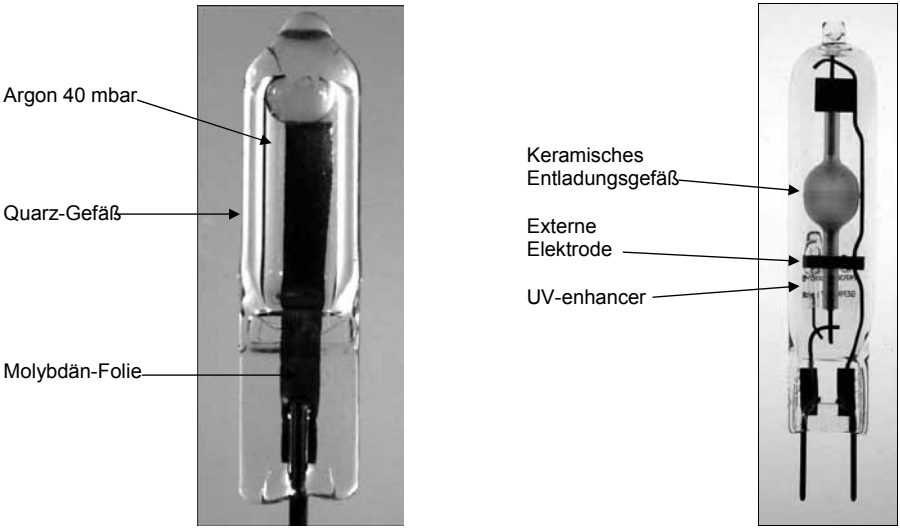


Abb. 2: UV-enhancer (links) und radioaktivitätsfreie HCI-TC 70W/830 (rechts).

Die Verwendung des UV-enhancers in HID-Lampen mit Keramikbrenner (HCI-Lampen) erforderte vor allem eine hinreichend kleine Zündspannung des UV-enhancers aber auch kleine geometrische Abmessungen, um neben dem Brenner im Außenkolben Platz zu finden. Geringe Kosten und leichte Umsetzbarkeit in der Fertigung waren die Gründe, eine Molybdänfolie als externe Elektrode für den UV-enhancer bei einseitig gesockelten Lampen einzusetzen. In Abbildung 2 werden der UV-Enhancer und eine radioaktivitätsfreie HCI-TC 70W/830 dar-

gestellt. Eine Gesamtlänge der Lampe von 80 mm verdeutlicht die Anforderung an die Miniaturisierung des UV-enhancers. Das Design der externen Elektrode für den UV-enhancer wurde durch Patente geschützt.

4.2 Applikation des UV-enhancers in HID-Lampen mit Quarzbrenner

Für HID-Lampen mit Quarzbrenner (HQI-Lampen) ist eine Unterscheidung notwendig. Die Leistungsstufen 250W/400W mit Schraubsockel werden mit einem UV-enhancer aufgebaut, bei dem die externe Elektrode durch einen über ein Patent geschützten Metallclip realisiert wurde. Abbildung 3 zeigt eine radioaktivitätsfreie HQI-T 400 W/D. Die Position des UV-enhancers in der Lampe befindet sich zwischen den Stromzuführungen in der Nähe des Schraubsockels.

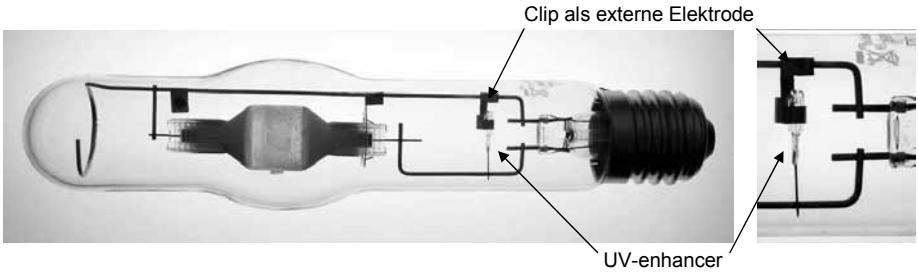


Abb. 3: Radioaktivitätsfreie HQI-TS 400 W/D (links) und Detailausschnitt des montierten UV-enhancers (rechts).

Für zweiseitig gesockelte HQI Lampen in den Leistungsstufen 250W/400W ist der Einbau des UV-enhancers mit zusätzlichen Maßnahmen verbunden. Das Problem bei diesen Lampen ist, dass zum Einbau des UV-enhancers eine Stromzuführung am Brenner vorbei laufen muss, um den UV-enhancer mit der Zündspannung zu versorgen. Wenn die Metallhalogenid-Füllung Natrium enthält, kommt es in diesem Fall zu Natriumaustritt. Der physikalische Hintergrund ist, dass die Entladung im Brenner UV-Strahlung emittiert, die Photoelektronen aus der Stromzuführung im Außenkolben erzeugen. Diese können sich an der Außenwand des Brenners anlagern. Die Elektronen erzeugen eine Feldkraft auf Ionen im Brenner. Da Natriumionen durch heißes Quarz diffundieren können, wandern sie aus dem Brenner. Die Folge ist eine Farbortverschiebung der Lampen und eine stark verminderte Lebensdauer. Es ist daher gängige Praxis, Stromzuführungen sehr weit vom Brenner entfernt zu führen oder Abschirmungen zu verwenden (siehe z.B. /15/). Beides war in den HQI-TS Lampen nicht anwendbar.

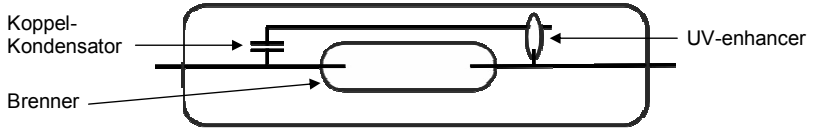


Abb. 4: Schematische Darstellung der kapazitiven Kopplung von UV-enhancern in HQI-TS 250W/400W Lampen.

Eine alternative Lösung ist die kapazitive Ankopplung des UV-enhancers, zu der ein Patent eingereicht wurde. Abbildung 4 zeigt eine schematische Darstellung dazu. Die kapazitive Kopplung führt dazu, dass hochfrequente Zündimpulse auf die externe Elektrode des UV-enhancers übertragen werden. Weiterhin gibt es keine direkte leitende Verbindung des Drah-

tes entlang des Brenners zu den Lampenkontakten und damit zur Versorgungsspannung. Die Folge ist, dass aus dem Draht austretende Photoelektronen eine Spiegelladung im Draht hinterlassen und die Diffusion der Photoelektronen zur Außenwand des Brenners so verhindert wird. Auf diese Weise kann der Natriumaustritt zuverlässig unterbunden werden.

Abbildung 5 zeigt eine radioaktivitätsfreie HQI-TS 250W/D mit kapazitiver Kopplung. Der Koppel-Kondensator wurde durch zwei Metallbleche realisiert, die im Bereich der Quetschung parallel zur eingequetschten Molybdän-Folie liegen. Der Draht, der das Potenzial für die externe Elektrode am Brenner vorbeiführt, hat einen vernachlässigbar kleinen Einfluss auf die Abstrahlcharakteristik der Lampe.

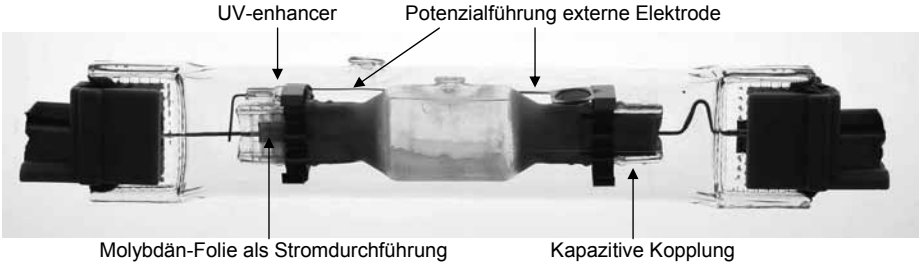


Abb. 5: Radioaktivitätsfreie HQI-TS 250W/D mit kapazitiver Kopplung durch beidseitiges Metallblech im Quetschungsbereich.

4.3 Applikation einer Zündhilfe im Außenkolben einer HQI-TS Excellence Lampe

Einen Spezialfall für eine radioaktivitätsfreie Lampe stellt die HQI-TS 70W/150W Excellence Lampenfamilie dar. Aus konstruktiven Gründen ist es nicht möglich, einen UV-enhancer in den Lampen zu verbauen, da die Stromzuführungen im Außenkolben nicht kontaktiert werden können. Das Design der Lampe ermöglicht aber, eine dielektrisch behinderte Entladung im Außenkolben zu zünden, die genau wie der UV-enhancer UV-Strahlung erzeugt. Der Außenkolben der Excellence Lampen wird dazu mit ca. 7 mbar Argon gefüllt und ein Zündhilfsdraht wird von einem Schaft über den Brenner um den zweiten Schaft geführt. In Abbildung 6 ist eine radioaktivitätsfreie HQI-TS Excellence Lampe und ein Detailbild des Zündhilfsdrahtes gezeigt. Das Design der Zündhilfe wurde durch mehrere Patente abgesichert. Die Funktion des Zündhilfsdrahtes ist, die Zündspannung der Außenkolbenentladung so weit abzusenken, dass die Lampen mit im Markt verbreiteten Zündgeräten zuverlässig gestartet werden können. Der Außenkolbenfülldruck, die Wicklung des Zündhilfsdrahtes um den Brenner und die Geometrie des Zündhilfsdrahtes wurden hinsichtlich der Zündspannung der Lampe optimiert. Eine Beeinträchtigung der Abstrahlcharakteristik der Lampe durch den Zündhilfsdraht ist vernachlässigbar.

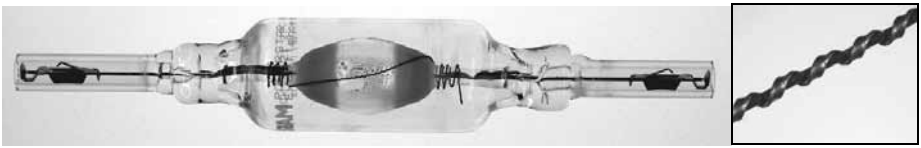


Abb. 6: Radioaktivitätsfreie HQI-TS Excellence Lampe (links) und Detailbild des Zündhilfsdrahtes (rechts).

5 Literatur

/1/ J. Eichmeier, Moderne Vakuumelektronik, Springer Verlag Berlin 1981

/2/ Governmental, Legal and Regulatory Framework for Safety, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 1, IAEA, Vienna, 2010

/3/ Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards - Interim Edition, IAEA Safety Standards Series GSR Part 3 (Interim), IAEA, Vienna, 2011

/4/ Euratom Council Directive 96/29, 1996

/5/ Exemption from Regulatory Control of Manufactured Items Containing Small Amounts of Radioactive Substances, IAEA TECDOC 1679

/6/ Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, Safety Requirements No. TS-R-1, IAEA, Vienna, 2009

/7/ Transport of Consumer Goods containing Small Quantities of Radioactive Materials, EC Contract Number: 4.1020/D/99-006 (DG TREN), May 2001

/8/ M P Harvey et. al., Assessment of the Radiological Impact of the Transport and Disposal of Light Bulbs Containing Tritium, Krypton-85 and Radioisotopes of Thorium, HPA-CRCE-008, Health Protection Agency, November 2010

/9/ J. Scholz, Capacitive glow starting of ceramic high intensity discharge devices, patent US 6,198,223 B1, March 2001

/10/ W. W. Byszewski und A. B. Budinger, Enhanced starting of HID-lamps, Journal of the Illuminating Engineering Society, pp. 70-75, 1990

/11/ G. Zaslavsky et al., Improved Starting of the 100-W Metal Halide Lamp, Journal of the Illuminating Engineering Society, pp. 76-83, 1990

/12/ G. Zaslavsky et Al., Ultraviolet radiation starting source and method of manufacture, Patent US 5,397,259

/13/ J.M. Meek und J.D. Craggs, Electrical Breakdown of gases, John Wiley & Sons, 1977

/14/ A. Lissovski, Pulsed high-pressure discharge in argon: spectroscopic diagnostics, modeling and development, PhD Thesis University of Tartu, 2012

/15/ N. Tillman et al., Electric lamp having screens for reducing photo electron emission, United States Patent 5,272,407A

Keramische Elektroden als Ersatz für Wolfram-Elektroden in Hochdruck-Entladungslampen

T. Hartmann, C. Schulze, T. Wichmann; OSRAM AG, Nonnendammallee 44, 13629 Berlin
A. Kloss; OSRAM AG, Werner-von-Siemens-Straße 6, 86159 Augsburg

1 Stand der Technik

Elektroden in Hochdruck-Entladungslampen (HID - High Intensity Discharge) werden bisher ausschließlich aus Wolfram (W) gefertigt. Die Gründe hierfür liegen in der hohen Schmelztemperatur, der guten elektrischen Leitfähigkeit und der hohen chemischen Stabilität dieses Metalls.
Es gibt jedoch weitere Anforderungen an Lampenelektroden, die durch Wolfram nicht optimal erfüllt werden. So wäre beispielsweise eine geringere Elektronenaustrittsarbeit für diese thermisch emittierenden Elektroden vorteilhaft, um die z.T. sehr hohen Elektrodentemperaturen absenken zu können. Auch die Stabilität der Verbindung zwischen Elektrodensystem und Entladungsgefäß wird infolge unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten der Verbindungspartner limitiert.
In der Vergangenheit wurden bereits verschiedene Anstrengungen unternommen, um die Eigenschaften von Elektroden für Hochdruck-Entladungslampen zu optimieren /1, 2/.
Lösungen zur Absenkung der Elektronenaustrittsarbeit und damit der Elektrodentemperatur beruhen auf Zugabe einzelner Stoffe zum Elektrodenmaterial (Dotierung von Wolfram) oder Anlagerung von Materialien an die Elektrodenoberfläche, die die Austrittsarbeit senken (Bepastung der Elektroden; Ablagerungen aus der Gasphase). Durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten im Lampenbetrieb hervorgerufene thermo-mechanischen Spannungen werden durch die Auswahl geeigneter Materialien minimiert.
Das betrifft insbesondere die Kontaktstelle zwischen metallischer Stromzuführung bzw. Elektrode und dem Brennergefäß, da hier eine hermetische Abdichtung bei hohen Temperaturen und oft aggressiver Atmosphäre notwendig ist. Als Resultat entstanden vielfach komplizierte, mehrteilige Elektrodensysteme, deren Komplexität und Kosten sich im Lampenbau jedoch nachteilig auswirken (Abb. 1).

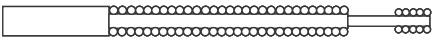


Abb. 1: Schematische Darstellung eines mehrteiligen Elektrodensystems für HID-Lampen keramischer Bauform /3/

2 Alternative Materialien

Intensive Forschung und Entwicklungsarbeit seitens der Lampenhersteller ist nötig, um den ständig wachsenden Anforderungen an moderne Lichtquellen (z.B. Erhöhung von Energieeffizienz, Lebensdauer, etc.) auch weiterhin gerecht zu werden. Dabei spielt die Suche und Anprobe neuer Materialien eine entscheidende Rolle.
Hinsichtlich der komplexen Aufgaben einer Lampenelektrode in HID-Lampen konnte Wolfram bisher von keinem anderen Material ersetzt werden. Im Rahmen eines Forschungsprojektes der OSRAM AG wurden in jüngster Vergangenheit erfolgreiche Tests mit elektrisch leitfähigen, keramischen Werkstoffen durchgeführt /4, 5/.

Aus der Literatur /6/ ist bekannt, dass verschiedene Boride, wie z.B. CeB_6, LaB_6, YB_6, günstige Eigenschaften, d.h. eine niedrige Austrittsarbeit verbunden mit einer hohen Schmelztemperatur besitzen.
Insbesondere Lanthanhexaborid (LaB_6) zeichnet sich neben der sehr geringen Elektronenaustrittsarbeit durch eine beherrschbare Verarbeitbarkeit aus, weshalb LaB_6 bereits in anderen Bereichen der Plasmatechnik und Elektronenmikroskopie als Elektronenquelle zum Einsatz kommt.
Zusätzlich besitzt das elektrisch leitfähige Material eine sehr ähnliche thermische Ausdehnung wie die keramischen Brennergefäße aus Abb. 1. Somit werden nicht nur die Anforderungen an eine thermisch emittierende Elektrode erfüllt, sondern gleichermaßen die Ansprüche an einen weitgehend spannungsfreien Verbund zwischen Elektrodensystem und Brennergefäß. So erscheint es möglich, das in Abb. 1 gezeigte komplexe Bauteil stark zu vereinfachen (Abb. 2).

Abb. 2: Konzept eines Elektrodensystems mit keramischer Elektrode aus LaB_6 (schraffiert)

In Tabelle 1 werden die physikalischen Eigenschaften von Wolfram und Lanthanhexaborid gegenübergestellt.

	W	LaB6
Elektronenaustrittsarbeit φ [eV]	4,55	2,7
Schmelztemperatur T_S [K]	3695	2483
Thermische Leitfähigkeit κ [W m^{-1} K^{-1}]	170	47
Thermischer Ausdehnungskoeffizient α [10^{-6} K^{-1}]	4.7	8.0
Elektrische Leitfähigkeit σ [10^6 S m^{-1}]	18,4	10,9

Tab. 1: Vergleich wichtiger physikalischer Eigenschaften von Wolfram und Lanthanhexaborid

Die geringere thermische Leitfähigkeit von Lanthanhexaborid verspricht ebenfalls Vorteile für HID-Lampen. Der so entstehende steilere Temperaturgradient entlang des Elektrodensystems ermöglicht eine kürzere Bauform von derartigen Lampen.

3 Modellrechnungen

Zum prinzipiellen Nachweis der Funktion keramischer Elektroden in HID-Lampen sind Simulationsrechnungen mit einem eindimensionalen Elektrodenmodell durchgeführt worden. Das Modell beruht auf den Arbeiten von Bade und Yos /7/ unter Beachtung der Erniedrigung der Austrittsarbeit durch den Schottky-Effekt. Es beschreibt die Vorgänge an der Kathode durch zwei Leistungsgleichgewichte. Das erste besteht in der Ionisationsschicht vor der Kathode und das zweite auf der Kathodenoberfläche. Bei bekannten geometrischen Bedingungen und bekannten Materialgrößen wie Austrittsarbeit, Wärmeleitfähigkeit, totale optische Emissivität und Ionisationsspannung des Entladungsgases können aus der Bedingung zur Erfüllung beider Leistungsgleichgewichte der Kathodenfall und das Temperaturprofil entlang der Elektrode berechnet werden.
Abb. 3 zeigt im Vergleich die modellierten Elektrodenspitzentemperaturen und die Kathodenfälle für eine 70 W Standard-Wolframelektrode und eine 1 mm x 5 mm LaB_6-Stift-Elektrode für verschiedene Ströme (50 Hz, Rechteck-Wechselstrom).

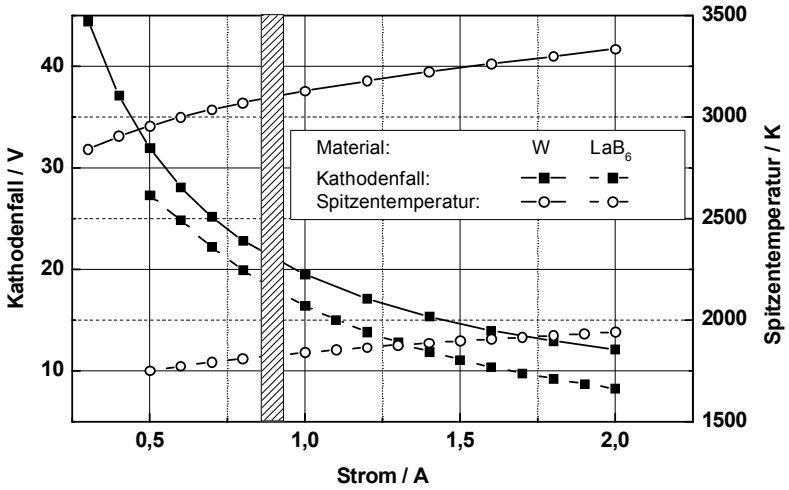


Abb. 3:Modellierter Vergleich zwischen W- und LaB_6-Elektrode

Für die Berechnung des Leistungseintrags im Anodenbetrieb wurde der Lampenstrom mit der Summe von Austrittsarbeit und einem angepassten Anodenfall von 1 V multipliziert. Für den typischen Lampenstrom von ca. 0.9 A wurde für LaB_6 ein um 3 V niedrigerer Kathodenfall und, was für die Dimensionierung der Elektrode entscheidend ist, eine Spitzentemperatur von 1830 K errechnet. Dies liegt hinreichend weit unter der Schmelztemperatur von LaB_6 von 2483 K, um einen stabilen Elektrodenbetrieb zu ermöglichen.

4 Versuchslampen

Abbildung 4 zeigt das Realisierungsbeispiel eines keramischen Elektrodensystems.

Abb. 4: Elektrodensystem mit LaB6-Stift

Dabei dient der zylindrische, keramische Stift (Abb. 4 rechts) sowohl als Lampenelektrode, als auch als Durchführungsbauteil, d.h. zur gasdichten und weitgehend spannungsfreien Anbindung der innen liegenden, thermisch emittierenden Elektrode an den äußeren elektrischen Stromkreis. Die Abdichtung des Elektrodensystems zum Brennerkörper geschieht typischerweise durch Einkleben des Elektrodensystems mit einem Glaslot (Abb. 5).

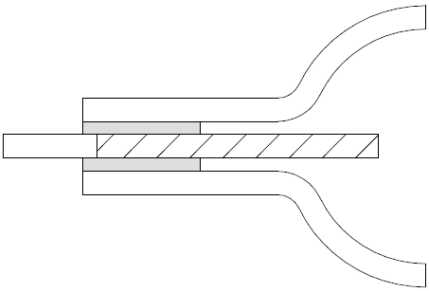


Abb.5: Schematische Darstellung der Verschlusstechnik keramischer HID-Lampen mit Glaslot (grau) und keramischer Elektrode (schraffiert)

Der metallische Teil des Elektrodensystems (Abb. 4 links) erlaubt einen einfachen Einbau des fertigen Lampenbrenners in den Außenkolben wie in Abbildung 6 anhand von Röntgenbildern dargestellt.

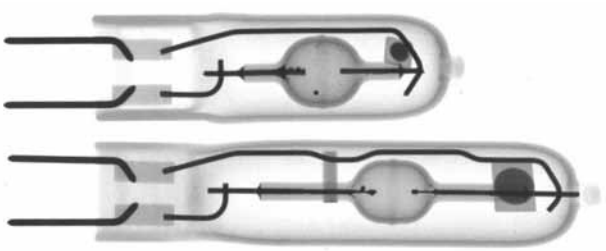


Abb. 6: Röntgenbild einer verkürzten HID-Lampe mit keramischen Elektroden im Vergleich zu einer Standardlampe gleicher Wattage

Der Vergleich einer Lampe mit keramischen Elektroden (Abb. 6 oben) mit einer handelsüblichen Lampe gleicher Wattage (Abb. 6 unten) demonstriert die mögliche Miniaturisierung von HID-Lampen mit keramischen Elektroden.

5 Messungen

Die in Abbildung 6 gezeigten Versuchslampen mit keramischen Elektroden wurden mit identischen Füllungssystemen wie handelsübliche Lampen gleicher Wattage aufgebaut und ersten Messungen unterzogen. Bezüglich der Zündung, des stationären Betriebs, wie auch der spektralen Verteilung des ausgesandten Lichtes werden keine Unterschiede festgestellt. Abbildung 7 zeigt exemplarisch die Brennspannung am Elektronischen Vorschaltgerät (EVG) einer Standardlampe und einer Versuchslampe mit keramischen Elektroden. Hinsichtlich des Anlaufverhaltens zeigt die Miniaturisierung der Lampen mit keramischen Elektroden Vorteile. Während die vergleichbare Standardlampe erst nach ca. 80 Sekunden den vollen Lichtstrom erreicht, benötigt die miniaturisierte Lampe mit keramischen Elektroden nur ca. 40 Sekunden bis zum Erreichen der vollen Lichtleistung (Abb. 8).

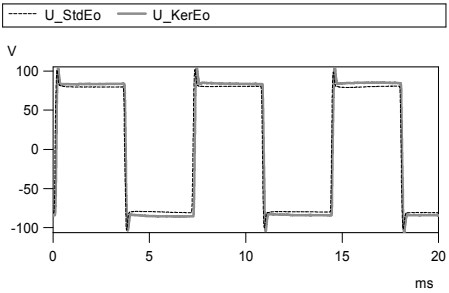


Abb. 7:Vergleichende Darstellung der Brennspannung am EVG

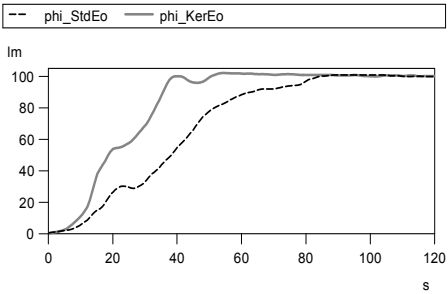


Abb. 8: Vergleichende Darstellung des Lichtanlaufes am EVG

Mit ersten Versuchslampen in der Leistungsstufe 70 W lassen sich bereits Lichtausbeuten von 94 lm/W erreichen. Durch naheliegende Optimierungsschritte werden letztlich Werte um 115 lm/W erwartet. Diese Effizienzsteigerung resultiert zum einen aus einer geringeren Elektrodenverlustleistung, zum anderen aus der Möglichkeit derartige Lampen mit verbesserten Füllungssystemen bei deutlich reduzierter Menge der Metallsalze zu betreiben. Es wird erwartet, dass sich auf diese Weise Lampen für den ungesättigten Betrieb, d.h. mit vollständig verdampfter Füllung, herstellen lassen, deren Maintenance und Lebensdauer herkömmlichen Lampen überlegen ist.
Ihr volles Potential schöpfen keramische Elektroden beim Einsatz in HID-Lampen keramischer Bauform aus. Das transluzente Entladungsgefäß schränkt dabei allerdings die diagnostischen Möglichkeiten zur Optimierung der Elektroden ein (Abb. 9).

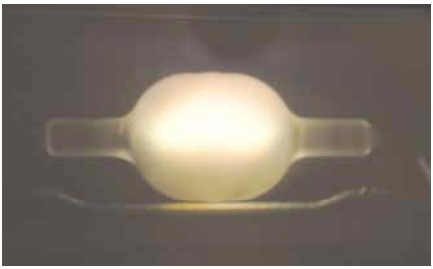


Abb. 9:miniaturisierte keramische HID-Lampe mit keramischen Elektroden im Betrieb

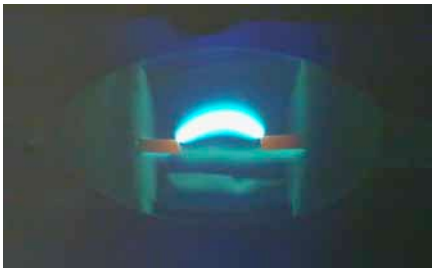


Abb. 10: Versuchslampe mit keramischen Elektroden und Brenner aus Quarzglas im Betrieb

Um möglichst detaillierte Einsicht in das Verhalten dieses neuen Materials zu erhalten, wurden auch Brennergefäße aus transparenter Keramik bzw. Quarzglas mit keramischen Elektroden aufgebaut (Abb. 10). Neben der direkten Beobachtung von Lichtbogenansatz und Elektrodenspitze, werden so z.B. auch pyrometrische Temperaturmessungen der Elektroden möglich.

6 Fazit

Die grundsätzliche Machbarkeit von Hochdruck-Entladungslampen mit keramischen Elektroden konnte nachgewiesen werden. Im speziellen fand dabei Lanthanhexaborid Verwendung. Die Vorteile dieses Materials gegenüber Wolfram bestehen aus der geringeren Elektronenaustrittsarbeit verbunden mit einer vergleichsweise hohen Schmelztemperatur, niedriger thermischer Leitfähigkeit sowie einem zum (keramischen) Entladungsgefäß sehr ähnlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten.
Neben der Miniaturisierung der HID-Lampen konnte ein positiver Einfluss auf den Lampenstart und den Thermohaushalt der Lampe gezeigt werden. Die Anpassung des Ausdehnungskoeffizienten von Elektrode und Entladungsgefäß verspricht Vorteile in Maintenance und Lebensdauer.
Erste Versuchslampen erreichen Lichtausbeuten von 94 lm/W.
Aktueller Gegenstand der Arbeiten ist die weitere Optimierung des keramischen Elektrodenwerkstoffs und die damit verbundenen Anpassungen des Lampendesigns.
Nach dem erfolgreichen Abschluss von Lebensdauertests kann daraufhin eine Überführung in die maschinelle Fertigung erfolgen.

7 Quellen

/1/ Günther, K., Grundlagenuntersuchungen an thermisch emittierenden Kathoden, Abschlussbericht zum BMBF-Verbundvorhaben, Förderkennzeichen 13N6895, 2001

/2/ Schade, P., Grundlegende Charakterisierung von Elektroden für die zeitveränderliche Energieeinkopplung in umweltfreundlichen Hochdruck-Plasmalampen, Abschlussbericht zum BMBF-Verbundvorhaben, Förderkennzeichen 13N7763, 2004

/3/ Dambacher, A. et al., Elektrodensystem für eine Hochdruckentladungslampe, Patentschrift DE102004012242, 2004

/4/ Kloss, A. et al., Ceramic Electrode for a High-Pressure Discharge Lamp, Patentschrift WO2011085839A3, 2011

/5/ Kloss, A. et al., Ceramic Bushing for a High-Pressure Discharge Lamp, Patentschrift WO2012052054A1, 2012

/6/ Yada K. et al., Study of refractory carbides, nitrides and borides as the thermionic emitter for electron microscopy, Journal of electron microscopy technique vol. 12 no.3, p. 252-261, 1989

/7/ Bade, W. L. and Yos, J. M., Theoretical and Experimental Investigation of Arc Plasma-Generation Technology. Part II, Vol. 1: A Theoretical and Experimental Study of Thermionic Arc Cathodes, Technical Report No. ASD-TDR-62-729, Avco Corporation, Mass., USA, 1963

Vorbild Natur: Bionische Strukturen zur Entwärmung von LEDs

Christian Herbold, Cornelius Neumann
Karlsruher Institut für Technologie, Lichttechnisches Institut, Engesserstrasse 13, 76131 Karlsruhe

1. Überblick

Die Forderung nach immer leistungsfähigeren LED-Systemen bei gleichzeitig begrenztem Bauraum bedingt steigende Anforderungen an das thermische Management. Neue Methoden sind notwendig um die erhöhte Verlustleistung in solchen Systemen effizient abzuführen. Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Frage, in wieweit die innovative Umsetzung vorbildlicher Strukturen aus der Natur zu effizienten Kühlkörperarchitekturen führen kann, welche herkömmliche Lösungen übertreffen. Dabei steht die Wärmeabfuhr durch freie Konvektion im Vordergrund.
Grundlegende Themen auf dem Gebiet der Wärmeabfuhr nach dem Vorbild der Natur werden mit der Strukturtheorie behandelt /1/. Eine Umsetzung der grundsätzlichen Aspekte in für die LED-Technik anwendbare Formen stellt die, nicht zuletzt produktionstechnische, Herausforderung dar, die meist einfachen Rippenstrukturen in LED-Systemen durch effiziente Geometrien zu ersetzen. Mit Hilfe der mathematischen Beschreibung des Wärmetransports im Kühlkörper können baumartige Strukturen entwickelt werden, die die Wärme wirkungsvoll an die Umgebung übertragen. Aufgrund der Architektur der verzweigten Strukturen wird die Wärme in den gesamten zur Verfügung stehenden Bauraum geleitet und von dort großflächig an die Umgebung übertragen.

Zur Konstruktion der Kühlkörper wird eine aus der Natur abgeleitete Architektur verwendet. Die mathematische Beschreibung der Wärmetransportvorgänge im Kühlkörper ermöglicht die Anpassung im Hinblick auf die Verbesserung der Wärmeabfuhr. Die Bewertung der Lösungen erfolgt rechnergestützt mittels numerischer Strömungsmechanik. Die Strukturen werden als CAD-Modelle erstellt und ihr thermisches Verhalten hochaufgelöst simuliert. Der Vergleich mit herkömmlichen Kühlkörperformen zeigt eine gesteigerte Leistungsfähigkeit.

2. Bioinspiration

Das Nutzen von Impulsen aus der Biologie kann in der Technik vielfach zu erfolgreichen Lösungen führen /2/. Es gilt die beste technische Lösung zu finden, indem man sich von der Natur inspirieren lässt. Die evolutionäre Entwicklung natürlicher Problemlösungen verspricht dabei einen Ansatz, der bereits seit langem optimiert wurde.

2.1 Probleme aus der Technik

Dem Wunsch nach immer effizienteren LED-Systemen in der Lichttechnik kann mit Verbesserungen in den verschiedenen Systemkomponenten begegnet werden. Aufgrund der Temperaturabhängigkeit des Wirkungsgrades der LED ist die Abfuhr der Verlustleistung in Form von Wärme jedoch ein essenzieller Bestandteil für den Aufbau effizienter LED-Anwendungen. Die spezifische Kennzahl für die Fähigkeit eines Bauteils Wärme abzuführen, ist der thermische Widerstand R_{th} mit der Einheit K/W. Je besser die Wärmeableitung durch ein Bauteil ist, umso kleiner ist dessen thermischer Widerstand. Der thermische Widerstand zwischen LED-Chip und Umgebung wird maßgeblich beeinflusst durch die Wärmeleitung im Kühlkörpermaterial und durch die Konvektion an der Kühlkörperoberfläche. Zur Verringerung der LED-Temperatur ist eine Verbesserung des Wärmeübergangs vom

Kühlkörper an die Umgebung notwendig, der durch eine Oberflächenvergrößerung erreicht werden kann. Eine Vergrößerung der Oberfläche darf jedoch durch kleine Strukturen nicht gleichzeitig die Konvektion im Bauteil verringern und die Wärmeleitung an die Oberflächen behindern. Eine geeignete Kühlkörperarchitektur sollte deshalb zum einen große Oberflächen bieten und zum anderen die Wärmeleitung hin zu diesen Oberflächen begünstigen.

2.2 Lösungen aus der Natur

Sparsamkeit und Effizienz sind die Ziele des evolutionären Optimierungsprozesses der Natur. Beständig findet sie für ihre spezifischen Aufgaben einfache Lösungen mit geringem Energie- und Materialaufwand. Diese Ressourceneffizienz ist bei einem begrenzten Angebot an beispielsweise Nährstoffen, Raum oder Licht ein Überlebensvorteil gegenüber ineffizienteren Alternativen. Die Natur mit ihren spezifischen Anforderungen für eine spezielle Funktion eines bestimmten Lebewesens und die Nutzenfunktion der Technik unterscheiden sich jedoch beachtlich. Deshalb kann die Natur innovative Ansätze liefern, um neue Wege zur Lösung technischer Probleme zu erschließen, jedoch müssen die Naturprinzipien zur technologischen Umsetzung abstrahiert und können nicht kopiert werden.

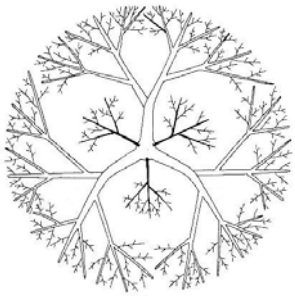


Abb. 1: Wurzelarchitektur des Ameisenbaums (Cecropia obtusa) /3/

Vergleicht man die gestellten technischen Anforderungen an eine effiziente Kühlkörperarchitektur, das heißt große Oberflächen zur Konvektion und eine ausreichende Wärmeleitung hin zu diesen Oberflächen, mit den Anforderungen eines Lebewesens nach Energieaufnahme und den Transport dieser Energie, finden sich offensichtliche Parallelen. Die Ergebnisse des Evolutionsprozesses als effiziente Lösung des Problems zeigen sich in vielerlei natürlicher Strukturen, beispielsweise dem verzweigten System des menschlichen Blutkreislaufs oder der Aderung von Blattnerven. Ebenso erfüllen sowohl das Ast- als auch das Wurzelsystem eines Baumes, wie es Abb. 1 zeigt, den Zweck indem sie eine effiziente Form darstellen um Nährstoffe aufzunehmen und zu transportieren. Daneben bieten sie trotz sparsamem Materialeinsatz eine ausreichende mechanische Stabilität. Auch wenn die Architekturen sich selbst innerhalb derselben Pflanzenart, durch Umwelteinflüsse gelenkt, unterscheiden, sind die grundlegenden Muster die gleichen. Sie zeichnen sich alle durch verzweigte Strukturen aus.
Dass im Hinblick auf die thermodynamischen Eigenschaften die zweifache Verzweigung die höchste Leistungsfähigkeit bietet, zeigt Bejan in /1/. Aus diesem Grund wird mit dem Pflanzen-Architektur-Modell von Schoute ein Vorbild aus der Botanik gewählt, das auf zweifachen Verzweigungen basiert und damit eine für die Entwärmung vielversprechende Struktur aufweist. Abb. 2a verdeutlicht das Modell von Schoute, bei dem mit jeder Verzweigung am Ast zwei neue Äste entstehen. Diese Architektur findet sich beispielsweise bei Doumpalmen wieder (Abb. 2b).

3. Technische Umsetzung

In wieweit sich an verzweigte Strukturen angelehnte Kühlkörper für die effiziente Entwärmung von LED-Systemen eignen, soll beispielhaft anhand einer Aststruktur untersucht werden. Die eingesetzten Methoden lassen sich jedoch grundsätzlich auch für andere Architekturen verwenden, indem die geometrischen Parameter angepasst werden.

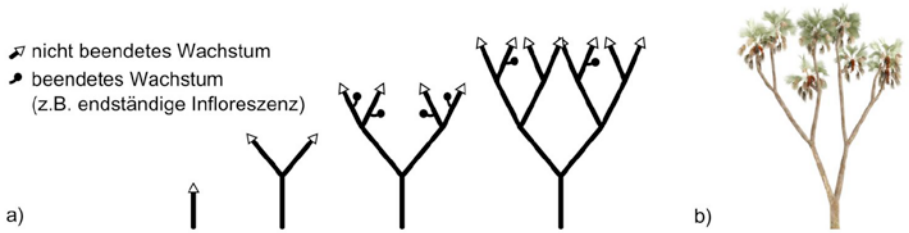


Abb. 2: Pflanzenarchitektur nach dem Modell von Schoute a) Verzweigungsschema (nach /3/) b) Doumpalme (Hyphaene)

3.1 Mathematisches Modell

Zunächst wird die Wärmeübertragung am Ast mathematisch betrachtet, um die geeigneten Parameter für die Kühlköper-Geometrie bestimmen zu können. Dazu werden der Wärmetransport im Ast sowie der Wärmeübergang durch freie Konvektion an die Umgebung in einem nicht verzweigten Ast beschrieben, bevor ein Ast mit mehreren Verzweigungen betrachtet wird.

Ausgehend vom Energieeinsatz für den Festkörper allgemein gemäß /4/, wird der stationäre Fall in einem einzelnen, nicht verzweigten Ast der Länge L betrachtet. Dabei wird der Energieverlust im Ast durch Wärmeleitung gemäß dem Fourierschen Gesetz sowie die durch Konvektion abgeführte Energie berücksichtigt.
Für den Fall, dass die Leistung P_0 am Anfang des Asts gleichmäßig über die Querschnittsfläche eingebracht wird und die Wärmeableitung am Ende des Asts durch den thermischen Widerstand R_{thE} erfolgt, berechnet sich der thermische Widerstand R_{th} am Anfang des Asts aus

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P_0} = \frac{1}{c_2}\frac{sinh(c_1 L) + c_2\, R_{thE}\cosh(c_1 L)}{cosh(c_1 L) + c_2\, R_{thE}\sinh(c_1 L)} \qquad (1)$$

mit $c_1 = \sqrt{\frac{\alpha U}{\lambda A}}$ und $c_2 = \sqrt{\alpha U \lambda A}$.

Darin bezeichnet λ die Wärmeleitfähigkeit des Astmaterials, α den Wärmeübergangskoeffizienten, A die Querschnittsfläche und U den Umfang des Asts. Gleichung (1) drückt somit den Zusammenhang zwischen dem thermischen Widerstand des nicht verzweigten Asts, seiner Geometrie und dem thermischen Widerstand am Astende R_{thE} aus.

Wird der Ast wie in Abb. 3 n-mal verzweigt, so kann mit (1) der thermische Widerstand eines jeden Astabschnitts $R_{th\,i}$ berechnet werden, wenn $R_{thE\,i}$ des Astabschnitts bekannt ist. $R_{thE\,i}$ ist gerade der thermische Widerstand der nachfolgenden Astabschnitte $R_{th\,i+1}$, so dass der thermische Widerstand des gesamten Asts aus der rekursiven Berechnung der thermischen Widerstände der Astabschnitte folgt.

Zur Berechnung des Widerstands des letzten Astabschnitts $R_{th\,n}$ ist es notwendig den thermischen Widerstand am Ende dieses Abschnitts $R_{thE\,n}$ zu kennen. In der Praxis kann dieser Widerstand als sehr groß angenommen werden /4/. Für den thermischen Widerstand des letzten Astabschnitts folgt daher unter der Annahme $R_{thE\,n} \to \infty$ aus (1)

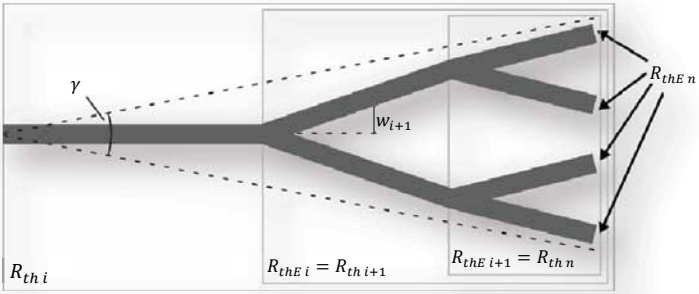


Abb. 3: Rekursive Berechnung des thermischen Widerstands eines mehrfach verzweigten Asts

$$R_{thE\,n} = \frac{1}{c_2\,tanh(nL)} \tag{2}$$

Neben den geometrischen Eigenschaften des Asts gehen in die Berechnung des thermischen Widerstands nach (1) sowohl die thermische Leitfähigkeit des Astmaterials λ als auch der Wärmeübergangskoeffizient α zwischen Astoberfläche und der umgebenden Luft ein. Während die thermische Leitfähigkeit als Stoffwert lediglich vom verwendeten Material abhängig ist, müssen zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten die Lufträume zwischen benachbarten Astabschnitten berücksichtigt werden, die über die Nußelt-Zahl Nu in die Berechnung von α einbezogen werden.

Ausgehend davon, dass die Geometrie des Asts zunächst dadurch entsteht, dass ein zweidimensionaler Längsschnitt (vgl. Abb. 3) in die dritte Dimension extrudiert wird, kann zur Bestimmung der Nußelt-Zahl die Korrelation für vertikale Platten nach /5/ verwendet werden. Als Breite des Luftspalts zwischen den Platten wird der mittlere Abstand zwischen Astabschnitten gleicher Verzweigungstiefe angenommen. Da sich der Abstand für Astabschnitte unterschiedlicher Verzweigungstiefe unterscheidet, muss die Nußelt-Zahl wie auch der Wärmeübergangskoeffizient für jeden Astabschnitt gesondert berechnet werden. Der mittlere Astabstand w folgt dabei aus dem eigenommenen Winkel des gesamten Asts γ, der Position der Verzweigung sowie der Länge des betrachteten Astabschnitts, wie Abb. 3 zeigt. Damit lässt sich Nu und α für jeden Astabschnitt bestimmen.

Für die Berechnung des thermischen Widerstands eines mehrfach verzweigten Asts stehen somit alle notwendigen Werte zur Verfügung. Die Auswirkungen auf den thermischen Widerstand, die sich durch Änderung einzelner Parameter ergeben, können damit direkt untersucht werden. Zur Überprüfung des mathematischen Modells sollen nachfolgend berechnete thermische Widerstände mit den Ergebnissen thermischer Simulationen verglichen werden.

3.2 Simulationsmodell im Vergleich

Für die Durchführung der thermischen Simulationen kommt eine CFD („computational fluid dynamics“) Software zum Einsatz, die mittels numerischer Strömungsmechanik die thermischen Vorgänge im Modell kalkuliert. Für die Simulation eines mehrfach verzweigten Asts wird dieser mit CAD-Werkzeugen modelliert, die thermischen Eigenschaften definiert und das Modell in Finite-Elemente zerlegt. Um den Vergleich mit dem mathematischen

Modell anzustellen, wird auch hierbei zunächst ein zweidimensionaler Längsschnitt eines einzelnen Astes extrudiert. Verglichen werden unterschiedlich tief verzweigte Äste, die jedoch alle denselben Winkel einnehmen und das gleiche Materialvolumen aufweisen, dadurch, dass die Breite eines jeden neuen Astabschnitts mit jeder Verzweigung halbiert wird. Die Ergebnisse sind in Abb. 4 dargestellt.
Mit steigender Anzahl an Verzweigungen ist zunächst ein Rückgang des thermischen Widerstands zu erkennen, der für das berechnete Beispiel bei einer Verzweigungstiefe von drei ein Minimum aufweist, um mit weiteren Verzweigungen wieder anzusteigen. Der Abfall des thermischen Widerstands kann durch die Oberflächenzunahme mit jeder zusätzlichen Verzweigung und die damit verbundene Erhöhung des durch Konvektion abgeführten Wärmestroms erklärt werden. Jede zusätzliche Verzweigung bringt neben einer größeren Oberfläche jedoch auch einen geringeren Abstand zwischen den Astabschnitten mit sich. Dies wiederum verringert den Wärmeübergangskoeffizienten für die neu hinzugekommene Oberfläche. Ist die Erhöhung des abgeführten Wärmestroms durch die Oberflächenzunahme geringer als dessen Verringerung durch die Abstandsabnahme, steigt der thermische Widerstand mit der zusätzlichen Verzweigung an.

Dieser erste Vergleich verdeutlicht bereits die Leistungsfähigkeit verzweigter Strukturen zur Wärmeabfuhr. So kann eine Verringerung des thermischen Widerstands durch das Verzweigen des Asts erreicht werden. Aufgrund der vereinfachenden Annahmen speziell zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten, der den abgeführten Wärmestrom maßgeblich bestimmt, kommt dieser Effekt im mathematischen Modell stärker zum Tragen. Das Minimum ist darin deutlicher ausgeprägt als im Simulationsmodell. Trotz vereinfachender Annahmen ergibt sich für den qualitativen Verlauf des berechneten thermischen Widerstands für eine unterschiedliche Anzahl an Verzweigungen eine ausreichende Übereinstimmung mit den Simulationsergebnissen.

Das Ergebnis wird genutzt, um den Einsatz eines dreifach verzweigten Kühlkörpers im LED-System zu untersuchen. Das mathematische Modell wiederum kann zukünftig verwendet werden, um den Einfluss auf den thermischen Widerstand durch die verschiedenen Parameter der verzweigten Struktur, beispielsweise die Länge oder die Breite der Astabschnitte, zu untersuchen. Im Anschluss wird das thermische Simulationsmodell den genauen thermischen Widerstand ausgewählter Strukturen liefern.

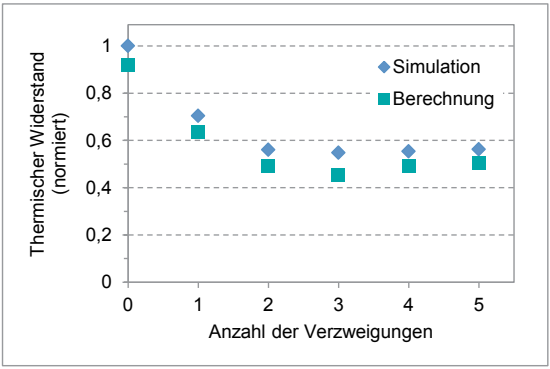


Abb. 4: Thermischer Widerstand für unterschiedliche Anzahl an Verzweigungen: Berechnete Werte und Simulationsergebnisse bei flächiger Einbringung der Verlustleistung und konstantem Materialvolumen der Aststruktur; Normierung auf simulierten thermischen Widerstand der nicht verzweigten Struktur

4. LED-System

Die Umsetzung der beschriebenen Architektur für die Anwendung in LED-Systemen kann auf vielfältige Weise erfolgen. Ein Beispiel ausgehend von einer extrudierten dreifach verzweigten Aststruktur, basierend auf dem Modell von Schoute, wird nachfolgend gezeigt und die Leistungsfähigkeit mit einem nicht verzweigten Kühlkörper verglichen. Die Größe des Kühlkörpers wird dabei auf eine einzelne LED ausgelegt.

4.1 Form des Kühlkörpers

Die Form des Kühlkörpers entsteht durch die kreisförmige Anordnung mehrerer verzweigter Äste. Im Gegensatz zu den bisher modellhaft betrachteten einzelnen Ästen, erfolgt der Leistungseintrag durch die LED nicht flächig über den gesamten Astquerschnitt, sondern annähernd punktförmig. Die LED wird deshalb sowohl im Längs- wie auch im Querschnitt des Kühlkörpers mittig positioniert, so dass der Leistungseintrag am Beginn jedes Asts in der Mitte erfolgt. Dieser zentrale Leistungseintrag bedingt zudem den kugelförmigen Ausschnitt der Äste, der die kugelförmige Ausbreitung des Wärmestroms vom Mittelpunkt berücksichtigt. Abb. 5 veranschaulicht den dreifach verzweigten Kühlkörper für das LED-System. Der Ausschnitt für die Optik und die LED befindet sich auf der Unterseite. Der Radius der einhüllenden Kugel beträgt 23,5 mm. Das Materialvolumen liegt bei 16,0 cm³. Die Simulation mit Aluminium als Kühlkörpermaterial und einem an der Stelle der LED eingebrachten Wärmestrom von 7 W ergibt für den verzweigten Kühlkörper einen thermischen Widerstand von 8,85 K/W.

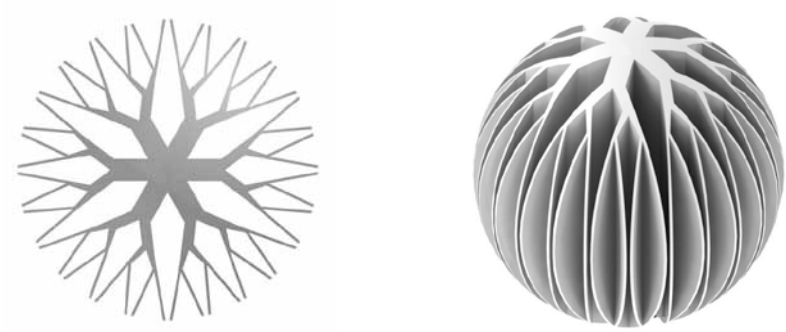


Abb. 5: Dreifach verzweigter LED-Kühlkörper: Draufsicht und isometrische Darstellung

4.2 Bewertung

Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit wird der Vergleich mit nicht verzweigten Kühlkörpern angestellt, die jeweils dasselbe Materialvolumen aufweisen. Durch ihre unterschiedliche Geometrie besitzen sie jedoch unterschiedlich große Oberflächen.

Der direkte Vergleich erfolgt zunächst mit der nicht verzweigten Grundform des Kühlkörpers, die der Anzahl von 0 Verzweigungen entspricht (Variante 1, Abb. 6) und bei der die Größe der Oberfläche lediglich 35 % der des verzweigten Kühlkörpers beträgt. Gemäß den Berechnungen für den vollflächigen Leistungseintrag ist auch beim Eintrag auf kleiner Fläche mit einem größeren thermischen Widerstand für den nicht verzweigten Kühlkörper

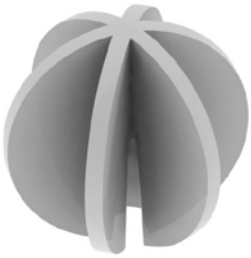


Abb. 6: Variante 1 - nicht verzweigte Grundform mit breiten Rippen

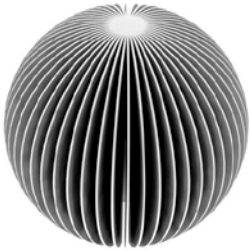


Abb. 7: Variante 2 - vergrößerte Oberfläche: Schmale Rippen des letzten Astabschnitts

Abb. 8: Variante 3 - vergleichbare Oberfläche

zu rechnen. Das Ergebnis der thermischen Simulation zeigt einen um den Faktor 1,35 höheren thermischen Widerstand für den nicht verzweigten Kühlkörper in der Grundform.
Werden anstatt der Grundform und damit der ersten Astabschnitte ausschließlich die letzten Astabschnitte verwendet und entsprechend dem vom verzweigten Kühlkörper eingenommenen Volumen verlängert, folgt ein nicht verzweigter Kühlkörper mit schmalen Rippen (Variante 2, Abb. 7), der eine um den Faktor 2,23 vergrößerte Oberfläche besitzt. Im Vergleich zum verzweigten Kühlkörper ergibt die thermische Simulation einen um den Faktor 1,36 erhöhten thermischen Widerstand, der die Folge einer verschlechterten Konvektion in den engen Luftspalten ist. Die Oberflächenvergrößerung führt deshalb nicht zu einem kleineren thermischen Widerstand.
Die beiden bisher verglichenen nicht verzweigten Kühlkörper bieten eine geringere thermische Leistungsfähigkeit als die dreifach verzweigte Geometrie. Sie leiten sich aus den beiden Extremen der verzweigten Struktur ab mit den wenigen breiten Rippen des ersten Astabschnitts beziehungsweise den vielen schmalen Rippen aus dem letzten Astabschnitt. Dazwischen liegt die Geometrie eines nicht verzweigten Kühlkörpers, der sowohl im Materialvolumen als auch der Oberfläche mit der dreifach verzweigten Struktur übereinstimmt (Abb. 8). Der Vergleich mit diesem Kühlkörper liefert eine geeignete Bewertung der Leistungsfähigkeit der Verzweigung, da der Unterschied lediglich in der Form liegt. Aus der thermischen Simulation folgt gegenüber der verzweigten Struktur ein um den Faktor 1,05 erhöhter thermischen Widerstand und damit auch in diesem Vergleich ein Vorteil für die verzweigte Architektur. Tab. 1 stellt die einzelnen Ergebnisse nochmals im Überblick dar.

Die Gegenüberstellung der Kühlkörper zeigt zum einen den durch die vorangegangenen Berechnungen erwarteten höheren thermischen Widerstand für die nicht verzweigte Grundform. Zum anderen führt auch der nicht verzweigte Kühlkörper mit vergrößerter Oberfläche durch die Rippen des letzten Astabschnitts zu einem höheren thermischen Widerstand. Dass der dreifach verzweigte Kühlkörper gegenüber der nicht verzweigten Variante 3 mit demselben Materialvolumen und derselben Oberfläche einen geringeren thermischen Widerstand ermöglicht, verdeutlicht die Leistungsfähigkeit der verzweigten Architektur.

5. Weitere Ziele

Bereits das einfache Beispiel einer extrudierten Aststruktur hat gezeigt, dass sich verzweigte Architekturen als Kühlkörper in LED-Systemen gewinnbringend einsetzen lassen. Aufwändigere Geometrien, die nicht zwingend auf extrudierten Formen basieren, birgen Potenzial zur weiteren Leistungssteigerung. Gerade bei verzweigten Strukturen sind jedoch durch die Herstellungsverfahren Einschränkungen gegeben, die berücksichtigt wer-

	normierte Werte		
	Material-volumen	Oberfläche	R_{th}
3-fach verzweigt	1,00	1,00	1,00
nicht verzweigt Variante 1	1,00	0,35	1,35
nicht verzweigt Variante 2	1,00	2,23	1,36
nicht verzweigt Variante 3	1,00	1,00	1,05

Tab 1: Geometrische Eigenschaften und thermischer Widerstand der verglichenen LED-Kühlkörper; normiert auf die Werte des dreifach verzweigten Kühlkörpers

den müssen. Mit modernen Verfahren wie beispielsweise dem Pulvermetallspritzgießen können diese Einschränkungen zwar reduziert werden, dennoch bleibt es erforderlich die Kühlkörpergeometrie den Herstellungsmöglichkeiten anzupassen.
Das vorgestellte mathematische Modell bietet die Möglichkeit die thermische Leistungsfähigkeit verzweigter Strukturen sowie die Auswirkungen notwendiger Anpassungen direkt zu bewerten. Sowohl die Parameter der vorgestellten Architektur als auch andere Architekturen sollen weitergehend damit untersucht werden. Simulationen liefern für gefundene Lösungen die genauen thermischen Widerstände und tragen so zur Konstruktion einer Kühlkörpergeometrie bei, die den zur Verfügung stehenden Bauraum optimal nutzt um die Verlustleistung abzuführen. Leistungsfähige LED-Systeme werden damit effizient entwärmt werden können.

Literatur

/1/ Bejan, A.; Lorente, S.: *Design with Constructal Theory*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008. – ISBN 978-0-471-99816-7

/2/ Gleich, A. v.: *Bionik: Ökologische Technik nach dem Vorbild der Natur?* Stuttgart: Teubner, 1998. – ISBN 3-519-06195-3

/3/ Bell, A. D.: *Plant Form – An Illustrated Guide to Flowering Plant Morphology*. Portland: Timber Press, 2008. – ISBN 978-0-88192-850-1

/4/ Wutz M.: *Wärmeabfuhr in der Elektronik*. Braunschweig: Vieweg, 1991. – ISBN 3-528-06392-0

/5/ Bar-Cohen, A.; Rohsenow, W. M.: *Thermally optimum spacing of vertical, natural convection cooled, parallel plates*. J. Heat Transfer 106, 1984.

Leuchten-integrierte Steuerung von LED Leuchten
Luminaire-integrated Control of LED Luminaires

MSc Dipl. Ing. Peter Deixler, Senior SSL System Architect, Philips Lighting, Eindhoven, Netherlands; Peter.Deixler@philips.com

1. Migration of Intelligence into the LED Lamp / Luminaire

The digital world is rapidly entering the LED lightsources and LED drivers. Already for several state-of-the-art LED Drivers and LED Lamps, the control of AC/DC power conversion process is realized by means of a micro-controller or digital IC. Hence any desired digital "value-add" features like DALI interfacing, time-based autonomous dim control or advanced control features (e.g. luminaire-based occupancy sensing) can directly added to the same power-conversion micro-controller, rather than facing the traditional cost-penalty of an extra microcontroller for controls features.

We believe that this will result in a migration of intelligence towards the Luminaire (Fig 1). In other words, the decision-making will increasingly migrate from a centralized lighting controller to individual smart luminaires, enabling novel control behaviours and increased robust fault tolerance of controls. The configuration and management will be still done centrally.

Figure 1 Evolution from *central wired* lighting-controls towards *wireless* controls and ultimately towards *distributed* controls residing within smart luminaires and lamps.

2. Digital Intelligence Residing within Standalone LED Drivers

Major players such as Philips and Osram have introduced a family of intelligent standalone LED Drivers. One example is the Xitanium Programmable LED Driver (Fig 2). Often these drivers are referred to as either “Digital Drivers” or “Programmable Drivers” to distinguish them from the classic analogue driver approach.

Classic Analogue Driver Approach:

- Control of power converter realized with discrete, mostly analogue components.
- Adjustments done via analogue control loops and external resistors/capacitors
- For high volume applications (>5M pcs/yr), typically integration in analogue Application Specific ICs (ASICS), specialized for specific power topologies.
- DALI interfacing or advanced features requires addition of extra micro controller

Digital Driver approach:

- Control of power converter realized by means of a micro-controller with digital control loops (algorithms). Adjustments/tuning via software parameter changes.
- Software configurable uC to allow control of various power converter topologies.
- Software has direct control over lamp; this eases feature & control integration
- All control is integrated in one single piece of silicon, which features both the digital logic and optimized analogue “peripheral” control functionalities.

Figure 2: Full-Digital LED Driver with an onboard micro-controller for the power-conversion control. Hence, the integration of additional lighting controls features is virtually for free. An innovative resonant power topology, for which no analogue control ICs are yet available, enables miniaturization compared to the previous-generation analog LED Driver.

3. Examples of Luminaire-intelligence enabled by Programmable Standalone LED Drivers

The lighting industry can take advantage of the intrinsic digital nature of modern LED drivers by expanding into intelligent luminaire-based lighting controls. One first example is the LumiStep dim method introduced by Philips for easy cost saving in streetlighting applications (Fig 3). For indoor office applications, the digital LED drivers can be use to enable affordable per-fixture occupancy and daylight sensing, combined with personalized controls.

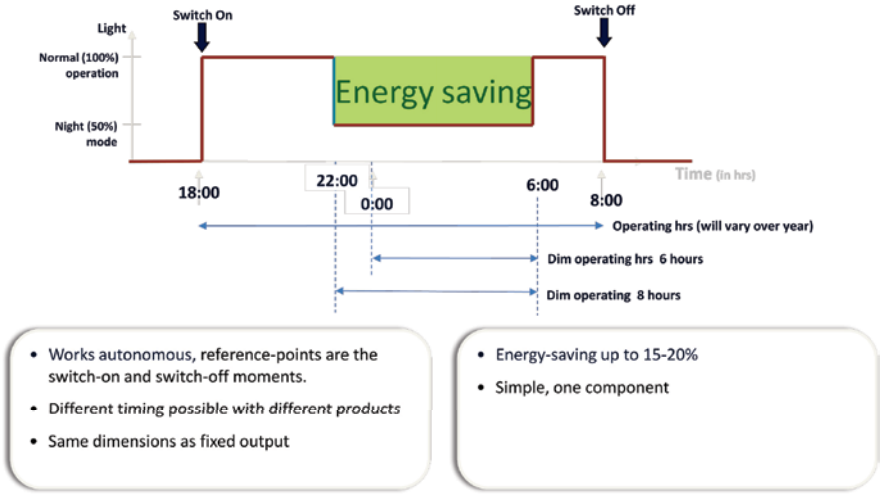


Figure 3 LumiStep dim method for easy cost saving in street lighting applications. The energy-saving autonomous-dimming feature leverages the intrinsic capabilities of digital LED drivers.

Figure 4 Late stage configuration of digital LED driver, either in the factory or field.

Programmable digital LED drivers can also use software for late-stage configuration and diversity management, such as flexibly setting the LED driver output current in factory or even in field (Fig 4). Luminaire makers indicate that programmable LED & HID drivers have helped to reduce their product stocks & obsolescence, which are – due to rapid technology progress -- a top concern for any LED product.
Keeping the edge against the upcoming new competitors in lighting will mandate a fast innovation heartbeat, which points towards frequent software updates rather than keep updating the hardware of the luminaire/lamp or driver. Looking even further into the future, the “Design for Recurring Revenue” lighting solution business models will ask for secure feature upgradability/unlocking in field. This, for example, will enable power-consumption monitoring/metering, which can be –very cost efficiently – directly integrated within each LED luminaire. Hence digital drivers will enable more widespread adoption of energy-saving audit and service business models.

4. Embedded Digital intelligence within LED Lamps and LED tubes

Next to luminaires, also LED lamps and LED tubes are starting to take advantage of digital intelligence. One application example is hassle-free wall-dimming; we believe that for SSL retrofit lamps, one of the first basic functional requirements is the ability for dimming similar to the incandescent/halogen lamps they are intended to replace; hence the SSL retrofit lamps must flawlessly function with the 150M+ legacy wall dimmers already installed in Europe. However, most of the existing wall-mounted dimmers in Europe are designed for >60W loads (=Inefficient incandescent lamps), much higher than CFL and LED lamps which have power consumption as low as 4 W. As a consequence, many CFL and LED lamps do not function at all when used with dimmers. Customers complain frequently about the dimmer compatibility and also light flicker issues they experience when trying to dim CFL and LED.
To live up to this challenge, Philips has recently launched LED lamps with embedded digital intelligence (Fig. 5). Enabled by unique adaptive dimmer compatibility algorithms, the lamps feature best-in-class flicker-free phase dimming across the light spectrum, including “deep dimming” down to near-zero percent of light output.

Leading edge, trailing edge and intelligent wall-dimmers with integrated sensors/remote-controls are all supported without compromises. We believe that a digital approach is the only way to ensure “hassle-free” wall-dimming for the installer and end-user.

Also tubular linear LED lighting (TL retrofit with LED) starts to leverage digital capabilities to ensure a fast and easy upgrade of existing luminaires to LED technology. For instance, the new Philips LED MASTER tube has a micro-controller embedded, which detects the fluorescent ballast-type already present within the luminaire and adjusts its behaviour accordingly. Further smart algorithms are applied to minimize ballast losses and ensure high power-factor of the luminaire after re-lamping the fluorescent tube with a LED tube.

Figure 5: LED Lamp and Tubular LED Lighting with digital capabilities: The embedded intelligence enables for LED lamps "hassle-free" dimming with legacy wall-dimmers (left). For tubular linear LED lighting (right), the microcontroller enables a fast and easy upgrade of existing fluorescent luminaires towards LED technology, irrespective of the fluo ballast type.

5: RF-lamps with Smart & Easy-to-use lighting control designed for consumers

Other examples of intelligent LED light-sources are LED lamps and Consumer Luminaries featuring embedded Radio-Frequency (RF) connectivity. This RF control offers full flexibility for “green-field” lighting applications, way beyond what can be done with wall dimmers or wired connectivity such as DALI. Especially for the professional renovation business and the DIY market, lighting controls requiring “no-new-wires” is a key enabler.

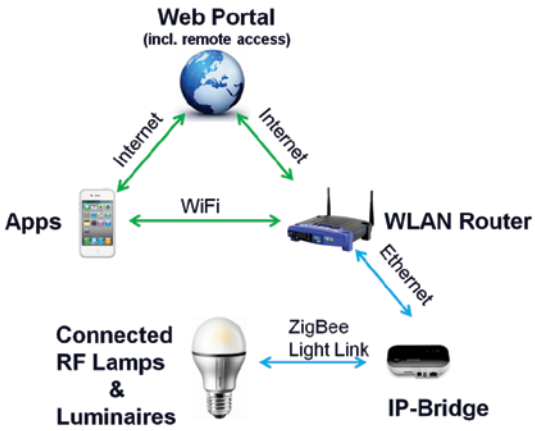


Figure 6 Connected lamps embedded within the ecosystem of ZigBee Light Link, which is an open standard to enable easy-to-use lighting control designed for consumers. The lighting network includes the option of over-the-internet control via smartphones and tablets.

To achieve mass-adoption of connected lamps, a broadly accepted simple and sensible industry specification for RF control is instrumental. Several standards have recently been proposed, probably most relevantly the ZigBee Light Link 1.0 standard, which is backed by home lighting manufacturers such as Osram Sylvania, GE and Philips. Light Link is giving the lighting industry a global standard for interoperable and very easy-to-use over-the-counter consumer lighting and control products. It allows consumers to gain wireless control over all their LED fixtures, light bulbs, timers, remotes and switches. Products using this standard will let consumers change lighting remotely to reflect ambiance, task or season, all while managing energy use and making their homes greener. One key feature of Light Link is that the standard does not require any special devices to coordinate with the lighting network; hence adding or even removing products to the lighting network is quick and easy. If desired, the RF network can be controlled over the internet with a smartphone or tablet (Fig 6).

6. Migration towards All-Internet-Protocol (All-IP) Controls Solutions

Traditionally most lighting controls use centralized controller boxes at room/floor level, with the luminaries merely executing - as slaves - the received control commands (Fig 8).

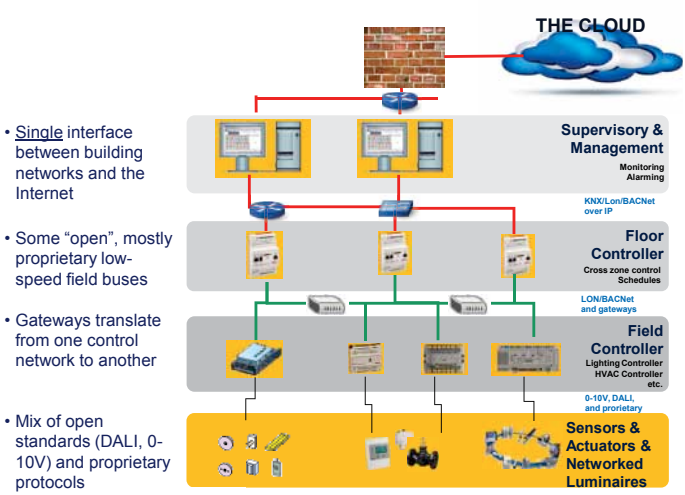


Figure 7: Traditional Controls Architecture: Several different network layers exist in between the "cloud" internet services and the luminaires. A multitude of network gateways are required.

We propose a *distributed-intelligence* approach, where many of the lighting controls decisions are directly taken at the luminaire-level, rather than at a central floor controller. All layers of the new lighting architecture (Fig 9) can also seamlessly connect to the "Internet-of-Things", which a metaphor for the world of whatever Internet Protocol (IP) controlled products. We predict that eventually for most cases the Internet Protocol control will reach down to each individual LED luminaire. The connectivity can be implemented either in wired fashion (ethernet cables) or leverage wireless IP standards (e.g. Wifi / 6LoWPAN). With all-IP, the intelligence is not bound to a specific physical location; for instance algorithms for sensing reside within the luminaire to ensure fast, latency-free sensing response, while others are in the cloud.

In the "all-IP" world the lighting players will be able to buy commodity IT industry components (e.g. routers) and software networking stacks in active development within the IT world. Also it will be possible to leverage existing IP commissioning tools, as well as building upon the end-2-end security framework developed by the IT

world. This will ultimately mean that the lighting industry will be able to focus most of its effort on differentiating applications instead of non-differentiating infrastructure.
The internet-of-things will also ultimately catalyze the convergence of areas beyond lighting, such as easy-to-implement integral energy management services across HVAC and lighting.

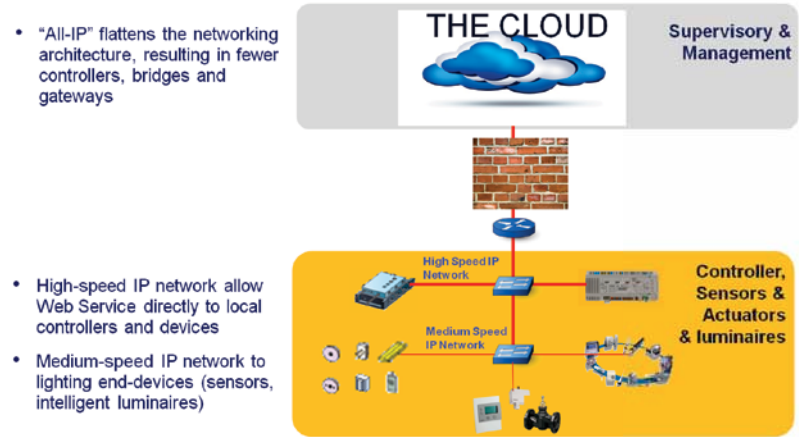


Figure 8 All-*Internet-Protocol* ("All-IP") controls architecture, which features IP-enabled end-devices such as luminaires/lamps/sensors. Both wired IP (Ethernet) and wireless IP (WiFi, 6LoWPAN) are seamlessly supported. No gateways between network layers are required.

First evidence of a transition towards all-IP is the increased popularity of Building Management Systems (BMS) being *tunneled*-over-IP. In this case, the BMS companies are re-using --for the highest network layers within the building-- already IT industry hardware (Ethernet cables, wireless routers), while however still adopting established non-native-IP protocol languages such as KNX or BACNet. In the parallel, much effort is being put into the standardization required for making IP *protocols* suitable for building management, HVAC and even lighting applications.

7. Summary

The digital nature of modern LED drivers and the Internet-of-Things will trigger a migration of intelligence from the traditional central lighting controller boxes directly into the luminaires. Hence, for lighting applications and services, the luminaire itself will increasingly become the strategic spot between end-user and the internet cloud.

Potenziale und Grenzen der LED – Eine wissenschaftliche Standortbestimmung

Dr. Rainer Kling, Leiter Licht- u. Plasmatechnologien am Lichttechnischen Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), Engesserstr.13, 76131 Karlsruhe, rainer.kling@kit.edu

1 Einleitung

Die europäische Energiegesetzgebung und das sukzessive Verbot von Glühlampen fördern stark den Wechsel hin zu effizienteren Leuchtmitteln. Der Artikel gibt einen Überblick von den Grundlagen der LED hin zu deren Potenzialen und Grenzen. In den letzten Jahren hat sich die LED-Entwicklung stärker beschleunigt, was nun auch dazu führt, dass die LED ihren Nischenplatz in der Allgemeinbeleuchtung verlässt.

Der LED Markt wächst deutlich und mit großer Dynamik. Marktforscher schätzen den weltweiten High Brightness (HB) LED Gesamtmarkt auf über 7 Mrd. Euro in 2011 und sagen der Technologie in den verschiedenen Anwendungsfeldern weiterhin zweistellige Wachstumsraten voraus. Vom Gesamtmarkt sind in 2011 alleine für häusliche LED Retrofit Lampen weltweit 1,7 Mrd. Euro umgesetzt worden. Der LED Chip Markt ist geprägt von Überkapazitäten, was die Rendite der LED Hersteller sinken lässt aber den Endkunden freut. Bei den LED Retrofit Lampen soll der Verkaufspreis in den nächsten 5 Jahren um 14% pro Jahr sinken /1//2/.

2 LED Einzel Chip

2.1 Einzel LED Strahlung und Verlustmechanismen

Wie Licht in einer LED entsteht und welche Verluste es gibt wird hier beschrieben. Grundlage ist die unterschiedliche Dotierung von Halbleitermaterialien als n- Typ: Bereich mit Elektronenüberschuss (Donator) und als p- Typ: Bereich mit Elektronenmangel (Löcher/Akzeptor). Bringt man die beiden Halbleiter zusammen entsteht ein pn- Übergang mit wenigen Ladungsträgern an der Kontaktstelle (Junction) Legt man eine Spannung in Flussrichtung (d.h. positive Spannung auf p Seite) an werden die Elektronen und Löcher in der Verarmungszone getrieben und rekombinieren dabei. Abb.1 zeigt das Modell eines pn Übergangs mit Leitungs-und Valenzband sowie mittlerer Verarmungszone, der mit einer Spannung U vorgespannt ist. Mit der Spannung kommt es zu einem Stromfluss, der einen Elektronenfluss im Leitungsband bewirkt. Dadurch Rekombinieren die Elektronen mit Lochern unter Aussendung je eines Photons mit der Energie des Bandabstandes. Dies ist die gewünschte strahlende Rekombination R_s. Steigert man die anliegende Spannung hin zu einen stärkeren Stromfluss, so spricht man von der Flussspannung U_F. Ab hier steigt der Strom I_d exponentiell an /4/. In Abbildung 2 ist die Shockley Gleichung für eine blaue GaN Led mit U_F = 3,2 V gerechnet. Auch treten Verlustprozesse im pn Übergang auf. Dies sind hier durch Störstellen verursachte nichtstrahlende Innerbandübergänge (Shockley-Read-Hall Rekombination R_{srh}) oder werden durch ebenfalls nichtstrahlende Auger- Rekombinationen (R_a) bewirkt. Gerade wenn der Strom durch den pn- Übergang erhöht wird nehmen die nichtstrahlenden Prozesse im Halbleiter stark zu und beeinflussen auch direkt die Lebensdauer des Chips.

Zusätzlich treten Leckströme an der Halbleiteroberfläche auf. Dies beschreibt die wichtigsten grundlegenden Verlustmechanismen des pn- Übergangs. Die Abhängigkeiten werden im Vortrag weiter ausgeführt, auch die Temperaturabhängigkeiten des LED Stromes sowie die Abhängigkeit von U_F von der Temperatur und Stromstärke.

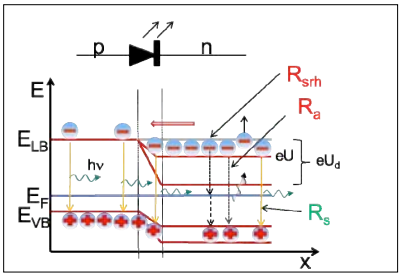


Abb. 1:PN Übergang Bändermodell mit Strahlung und Verlusten bei äußerer Spannung U

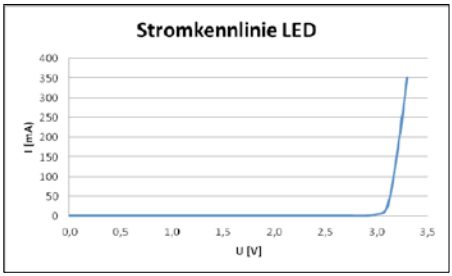


Abb. 2: Stromkennlinie I_d GaN Einzel LED (Shockley Gleichung I_d bei Raumtemperatur)

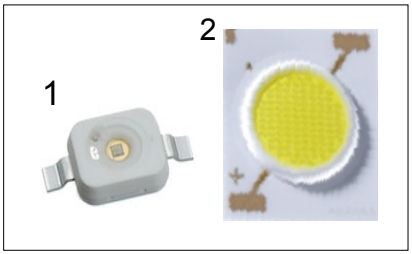


Abb. 3: 1. Chip: 1 Watt Thin Film LED Power LED LW5 WSG (D)
2. Modul: 22 Watt NSBWL110 (Jp)

Wir also die Stromdichte im pn- Übergang erhöht, sinkt der Lichtstrom, weil durch mehr Träger die nichtstrahlenden Verlustprozesse ansteigen und den Übergang erwärmen. Gerade die Temperatur dieses Kontaktes bestimmt die Lebensdauer und Effizienz der LED maßgeblich. Die Temperatur des pn- Übergangs wird auch als Junction Temperatur T_j bezeichnet. Durch eine Montage auf einem Substrat wird der pn- Übergang thermisch und elektrisch mit Bonddrähten kontaktiert. Es entsteht so eine Einzel Chip LED /Abb.3/. Hier ist auch ein LED Modul abgebildet, das hier aus 110 Einzel LED nebeneinander auf einem Substrat besteht. Die oben aufgeführten Erkenntnisse lassen sich auch auf Module übertragen.

2.2 Einzel LED Wärmehaushalt

Der Wärmehaushalt einer Einzel LED wird hier nochmals genauer betrachtet. Die Bestimmung der Junction Temperatur Tj aus abgeleiteten Größen wird im Vortrag vorgestellt, den Tj ist nicht direkt messbar.

Im Innern einer Einzel- Chip LED entsteht viel Licht. Wie kann dieses Licht (hier als P_{str}) nach Außen gelangen? Gleichzeitig entsteht durch den Stromfluss und die nichtstrahlenden Prozesse Wärme (P_{therm}) diese muss durch Wärmeleitung abgeführt

werden. Hier sind die Leitfähigkeiten des Substrates sowie des Kühlkörpers sehr wichtig /Abb. 4/. Die kritischsten Parameter des LED Einzel Chip Betriebes ist die Temperatur! Dieser beeinflusst direkt die Durchlassspannung, den Lichtstrom, den Farbort und die Lebensdauer. Dies wird im Vortrag weiter ausgeführt.

Da es ein wichtiges Ziel ist die LED nicht zu überhitzen und Wärme auch gleich weniger Lebensdauer bedeutet, muss das Thermomanagement sehr gut ausgelegt sein. Da dies von elementarer Wichtigkeit ist, wird die Pyrometrie als Wärmemessmethode vorgestellt und der richtige thermische Aufbau mit optimalen Substratmaterialien, Interface und Kühlkörper am Beispiel eines 120W LTI UV Modules vorgestellt.

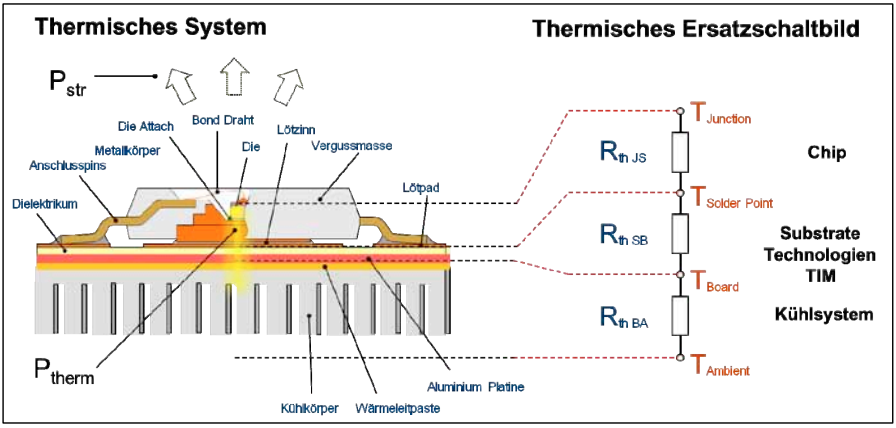


Abb. 4: Querschnitt Dünnfilm Einzel LED mit thermischen Ersatzschaltbild

2.3 Einzel LED Effizienz Steigerungen und Potenziale

Es wird zwischen den LED Einzel -Chips, LED Modulen und LED Leuchten unterschieden /siehe Abb.3/. In diesem Unterkapitel wird nur der Einzelchip betrachtet.

Zur LED Lichtausbeute:
Mit der Aussage einer realen LED Effizienz wird immer der real bestromte LED Chip mit Strömen > 100mA bei einer eingeschwungenen Messung betrachtet. Diese Werte unterscheiden sich deutlich von LED Hersteller Meldungen eines Lichtausbeute Rekordes. Hier wird mit einem sehr kurzen Strompuls ohne den Chip zu erwärmen bei T_j = 25°C gemessen. Das ist unrealistisch und nie nachvollziehbar.

Wo endet die Lichtausbeute der Einzel LED aktuell und wie wird sie erreicht? Die LED wurde in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich weiterentwickelt /5//6//7/. Mit den Halbleitermaterialien InGaAlP sowie InGaN und GaN auf Silizium konnte die Emission bis in den blauen Spektralbereich verschoben werden. Die LED Hersteller verbesserten und verbessern die LED durch die folgenden Maßnahmen:

- Verringern die Absorptionsverluste im Halbleiter z.B. durch reinere Materialien
- Optimieren u.a. weiter die Lichtauskopplung aus dem Halbleiter
    - Geometrien mit größerer Lichtauskopplung (z.B. TIP)
    - Back side mirror
    - Flip Chip LED
    - Oberflächen Strukturierung
    - Dünnfilm LED
    - Oberflächen Emitter
    - Größere Oberflächen
- Phosphor Optimierungen, Remote Phosphor
- Verbessern der Wärmeableitung (thermische Kopplung mit Substrat)
- Herstellkostensenkung und Ausschussreduktion z.B. größere Wafer (6´)

Weitere Neuerungen wie Hochspannungs-LED sowie Optimierungen beim Hochstrom - Betrieb haben die Helligkeit und Lichtausbeute der LED auf 130 lm/W gesteigert. In den nächsten Jahren wird eine Lichtausbeute von 180 lm/W erreicht werden können. Weißes Licht wird dabei verstärkt durch Phosphorkonversion von blauem LED Licht erzeugt. Auch diese Phosphore haben noch Optimierungspotenzial. Ein Phosphor hat nur eine gewisse Effizienz und Verliert durch Absorption eines kurzwelligen Lichtquants und Aussendung eine langwelligeren Lichtes Energie (Stokes Verluste).
Eine Sättigung der Lichtausbeute der Einzel Chip LED wird zukünftig bei einer Lichtausbeute von ca. 240 lm/W für weißes Licht gesehen.

Als Beispiel für konkrete Effizienzwerte und Verlustprozesse soll hier eine ein Watt Dünnfilm LED betrachtet werden mit einer typischen Chip Lichtausbeute von 100 lm/W in kaltweisser Lichtfarbe. Wie sind die internen Verlustprozesse zurzeit und welches Potenzial hat der Chip um die Lichtausbeute zu steigern /Abb.5/?
Wird ein Watt elektrisch in die LED eingekoppelt so gehen durch die elektrischen Kontaktierungsverluste 11% verloren. Die interne Quanteneffizienz ist mit 89% sehr gut. Die Licht -Auskopplung erreicht einen Wert von 82%. Das Gehäuse der LED mit Vergussmasse hat auch 82% Effizienz. So bleiben die internen Phosphorverluste mit 22% und die Stokes Verluste des Phosphors mit 21%. Multipliziert man alle diese Werte so erhält man aus einem Watt elektrischer Eingangsleistung eine Lichtleistung aus dem Einzelchip von 33% d.h. 0,33 W. Dies entspricht einer Lichtausbeute von 100lm/W. Es bedeutet aber auch, dass 66% der eingekoppelten elektrischen Leistung in Wärme umgesetzt werden. Dies geschieht vor allem im pn- Übergang.

Das Potenzial an Verbesserungen für die nächsten Jahre ist hier hoch. Es wird mit einer Steigerung aller Punkte einhergehen, besonders aber mit verbesserter Auskopplung, Aufbau sowie Phosphorverbesserungen. Dies wird in einigen Jahren bei dem betrachteten LED Typ zu einer Effizienzsteigerung führen. Mit einem Watt elektrischer Eingangsleistung wird eine Lichtleistung aus dem Einzelchip von 51% möglich sein. Dies entspricht einer Lichtausbeute von 160lm/W (kaltweiss). Auch dann werden noch 49% der Energie in Wärme umgewandelt und müssen mit gutem Thermomanagement der LED sicher abgeführt werden.

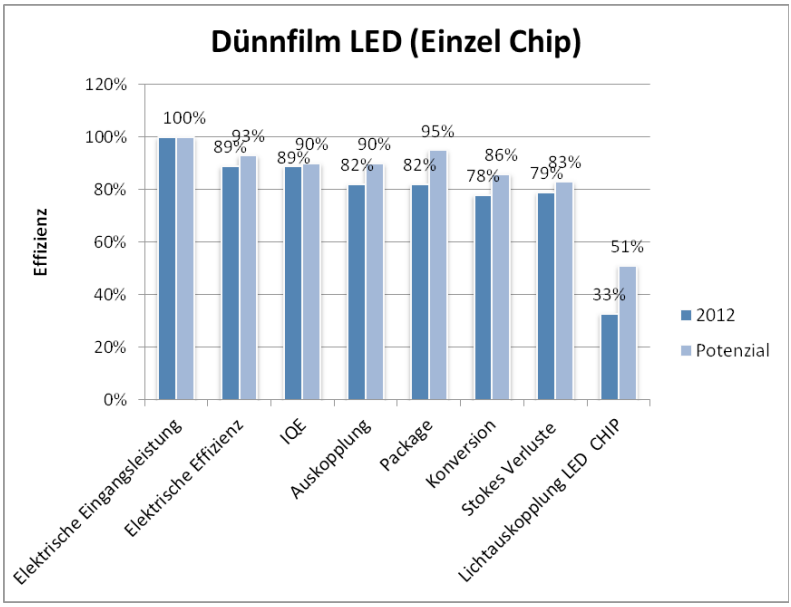


Abb. 5: Effizienzen Einzel Chip in 2012 und Potenzial

3 LED Module

3.1 Thermische Einflüsse

Gerade das Vermessen der Leistungskriterien der LED-Module und Leuchten sowie deren Lebens-Dauer Prognosen stellen Leuchten-Hersteller vor Probleme. Diese Messungen führt das Lichttechnische Institut in Karlsruhe aus. Durch die zunehmende Verwendung von LED-Modulen im Leuchtenbau und einer Schnittstellen Definition wie ZARGA zur Standardisierung der LED-Module wird eine Austauschbarkeit gewährleistet werden.

Wie verhalten sich die LED Module /Abb. 6/ bezüglich Stromerhöhung und höheren Leistungsdichten? Immer höhere Stromstärken (Ampere-Bereich) und Sperr-Schichttemperaturen werden von Modulen bis über 100°C verkraftet. Thermischer Aufbau und resultierendes Thermomanagement ist hier der wichtigste Design Aspekt. Die Punkte Thermomanagement werden bei LED Modulen durch Messungen beleuchtet. Eine höhere Temperatur führt zu einem sinkenden thermischen Widerstand. Auch der Lichtstrom sinkt z.B. um über 10 % bei einer Erhöhung der Umgebungstemperatur von 20°C auf 80°C und der Farbort verschiebt sich sowohl bei der x- Koordinate wie der y-Koordinate, um 2 % zu kleineren Werten.

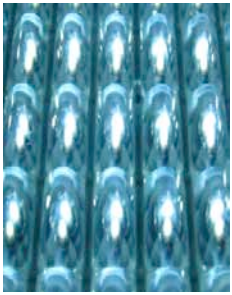


Abb.6: HP LED Modul

3.2 Lebensdauer LED Module

Welche Faktoren beeinflussen die Lebensdauer von LED Modulen mit Betriebsgeräten maßgeblich? Als wichtigster Faktor stellt sich auch hier die Temperatur heraus. Eine 10%-Erhöhung der Betriebstemperatur bewirkt eine Reduktion der mittleren Lebensdauer (B_{50}) um 15.000 Stunden!

Die Näherung aus Lebensdauer - Messwerten eines 25 W Moduls lässt eine direkte Berechnung (1) der Lebensdauerwerte zu:

Lebensdauer B_{50} (Osram Prevaled LEP 2100 850 HD- C: 20°C < T < 65°C):

$$(1)\ B_{50} = (135{,}6 - 1{,}13\,[1/°C]\ T) \cdot 10^3\ h$$

Wie kann die Lebensdauermessung von LED Modulen beschleunigt werden? Es werden Methoden der Schnellalterung wie Überstrom und Betriebstemperaturerhöhung vorgestellt. Als Ergebnis kann gezeigt werden das eine zehnfach schnellere Alterung ist auch bei LED Modulen erzielbar ist.
Somit reichen 4000h Lebensdauer für eine reaslistische Lebensdauermessung aus.

4. LED Leuchten

4.1 Effizienz und Potenziale LED Leuchten

Baut man aus Dünnfilm LED Einzel Chips, die wir in Kap. 2.3 betrachtet haben eine Leuchte, wozu man noch eine Optik und ein Betriebsgerät braucht so kann man auch hier wieder eine Effizienzbetrachtung anstellen /Abb.7/. Dies kann auch auf eine Light Engine mit Betriebsgerät zutreffen. In 2012 liegt je ein Watt eingekoppelter Leistung die Effizienz beim elektrischen Vorschaltgerät bei 85%, was ein mittlerer Wert ist. Die Lichtauskopplung des Einzelchips liegt wie in /Abb.5/ bei 33%, die Erwärmung und der Thermohaushalt reduzieren die Effizienz um 15% und die Optik geht ebenfalls mit 85% Effizienz ein. Als Produkt ergibt sich so eine Effizienz der Leuchte von 20%, was zu einer gesamten Lichtausbeute der Leuchte von 60 lm/W führt. Dies ist schon ein guter Wert. Als zukünftiges Potenzial in einigen Jahren, mit effizienterem Treiber und effizienteren Einzel LED Chips ergibt sich eine Lichtausbeute von 39%, was einer Leuchten Lichtausbeute von 120 lm/W entspricht. Das ist ein sehr guter Wert für eine Leuchte. Auch dann werden noch 61% der eingetragenen Energie in Wärme umgewandelt und müssen mit gutem Thermomanagement der Leuchte sicher gehandhabt werden, besonders bei hohen Wattagen.

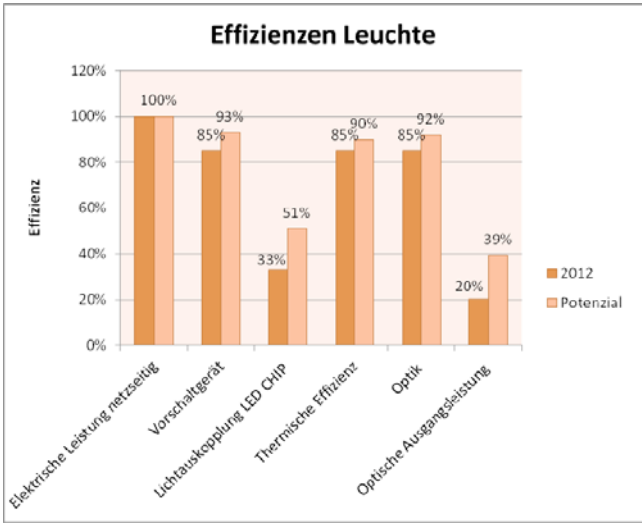


Abb.7: Effizienzen LED Leuchte in 2012 und Potenzial

5. LED Retrofit Lampen

Im häuslichen Bereich wird der direkte Ersatz von konventionellen Glühlampen durch LED Leuchtmittel als Retrofit möglich. Die mit LED bestückten Leuchtmittel erreichen System - Ausbeuten von 40 bis über 70 lm/W. Sie übertreffen damit die Effizienz von Glühlampen und Halogenlampen und haben die Effizienz von Kompakt-leuchtstofflampen erreicht. Leider sind sie noch deutlich teuer als konventionelle Leuchtmittel. Eine aktuelle Retrofit Übersicht mit Wattagen -Grenzen und Einfluss des Thermohaushaltes wird aufgezeigt.

5.1. Thermohaushalt

Als Beispiele werden thermische Untersuchungen des Lichttechnischen Institutes an LED Retrofit Lampen vorgestellt. Wo liegen die Grenzen für den rein passiv gekühlten Betrieb in Abhängigkeit von dem verwendeten Sockel. Beim E27 Sockel wird über einer eingekoppelten elektrischen Leistung von P_{el} = 8 W eine aktive Kühlung benötigt.
Welche Technologien der aktiven Kühlung werden hier verwendet? Eine rein passive Kühlung reicht hier nicht aus. So kommen Lüfter, Membrampumpen und Heat Pipes zum Einsatz. Die Techniken werden vorgestellt und bezüglich Effizienz und Lebensdauer bewertet.

Abb.8: LED Retrofits:
1: P_{el}: 14 W; Φ:1055 lm, η: 75 LPW
2: P_{el}: 10 W; Φ: 600 lm, η: 60 LPW:
3: P_{el}: 17 W, Φ:1055 lm, η: 62 LPW

6 Fazit

In diesem Artikel werden weiße LED Einzelchips bezüglich Strahlungserzeugung und Verlustmechanismen charakterisiert und dieser Einfluss wird erklärt. Das Entwicklungspotenzial der Dünnfilm Einzelchips wird detailliert aufgezeigt. Liegt die Effizienz heute noch bei 33% so können mit besseren Packages und verbesserten Phosphoren beim Einzelchip noch Effizienzen von über 50 % erreicht werden, was einer Lichtausbeute von 160 lm (kaltweiss) entspricht.
Betrachtet man die Leuchte so liegen die Summen -Effizienzen des ausgekppelten Lichtstroms bei 20%, was einer Lichtausbeute von 60 lm/W entspricht. Hier wird zukünftig eine Steigerung auf ca. 40% gesehen, bei der Lichtausbeute von 120 lm/W. Es ist somit sehr wichtig nicht von der singulären Effizienz eine Einzel LED sondern von der Leuchte als System zu sprechen.

Da der Temperatur ein wichtiger Parameter ist wird ein Wärme – Ersatzschaltbild für die Einzel LED und ein optimiertes Thermomanagement vorgestellt. Für LED Module ist eine Lebensdauer Abschätzung nun möglich und es wird der Weg aufgezeigt um Lebensdauer Messungen um den Faktor 10 zu beschleunigen.

Dem schließt sich ein Überblick über aktuelle LED Retrofits höherer Leistungen an, die vom Lichtstrom her ein 75W Glühlampe ersetzen können. Eine thermische Betrachtung der E27 LED Retrofits und eine Vorstellung der verwendeten aktiven Kühlmethoden wird aufgezeigt.
Mit thermisch kontrolliert betriebenen LED Chips können qualitativ hochwertige und zuverlässige LED System aufgebaut werden und den Weg der LED in die Applikationen beschleunigen. Bei anhaltendem Preisverfall der LED wird sich auch die LED Retrofit Lampe zügig durchsetzen - es warten ca. 4 Milliarden Brennstellen.

7 Literaturverzeichnis

/1/ Strategies Unlimited: LED Replacement Lamps Market Analysis & Forecast, (2012)
/2/ R.Kling: Moderne Lichtquellen – von der LED zur HID , Planertag Weimar (2012)
/3/ R.Kling: Die LED in der Praxis - Status und Perspektiven, LED Praxis Kongress Würzburg, Deutschland (2011)
/4/ R.Kling: Licht- und Displaytechnologien: Vorlesung Lichttechnisches Institut, KIT, Karlsruhe (2012)
/5/ Osram AG Informationen und Datenblätter (2010 /2011/2012)
/6/ Seoul Semiconductor Inc. Informationen und Datenblätter (2011)
/7/ Cree Inc. Datenblätter (2011/2012)

OLEDs in der Beleuchtungsplanung - Standard wie immer?

Dipl.-Ing. Claus Steinwandt, TRILUX GmbH & Co.KG, Heidestr.4 59759 Arnsberg

1 Was ist eine OLED?

OLED steht für organische lichtemittierende Diode. OLED bestehen aus mehreren unterschiedlichen Materialschichten. Jede dieser Schichten hat eine bestimmte Aufgabe zu erfüllen. Angefangen beim Trägermaterial, heutzutage meist Glas, in Einzelfällen auch Metall, bis hin zum verkapselnden Deckglas sind 10 unterschiedliche Schichten nichts Ungewöhnliches. Darunter finden sich z.T. transparente Elektrodenmaterialien, Elektronen transportierende Materialien und die eigentlichen organischen Emittermaterialien. Innerhalb dieser organischen Emittermaterialien findet die Lichterzeugung statt. Die Materialien werden in sehr dünnen Schichten (teils wenige Nanometer dünn) großflächig auf die Trägersubstrate aufgebracht und es entsteht eine gleichmäßige, leuchtende Schichtenfolge. Zurzeit werden größtenteils small-molecules zur Herstellung verwendet. Diese kleinen Moleküle setzen sich während des Fertigungsprozesses durch Vakuumverdampfung in dünnsten Schichten auf dem Substrat ab. Im Vergleich zu Polymermaterialien, die ebenfalls zur Herstellung verwendet werden können, sind small-molecule-OLED haltbarer und effizienter.
OLED erzeugen ausschließlich Licht im sichtbaren Bereich. Je nach Kombination der einzelnen Schichten emittieren sie monochromes oder weißes Licht. Hierbei sind warm und kaltweiße Farbtöne möglich. Das homogene Licht strahlen diese diffus und nahezu lambertisch ab; bei intransparenten OLEDs in eine bei transparenten OLEDs in zwei Richtungen. Aktuell gibt es OLED in der Größe bis zu 15 cm x 15 cm.
Weitere technische Details finden Sie im Beitrag von Sebastian Ludwig ‚Anwendung der OLED als professionelles Leuchtmittel in der Allgemeinbeleuchtung' in diesem Tagungsband.

2 Zielsetzung

Ziel ist es die Möglichkeiten der Beleuchtung mit OLEDs in der Allgemeinbeleuchtung nach heutigen Stand (06/2012) aufzuzeigen. Arbeitszonale Leuchten werden hierbei nicht betrachtet. Es ist nicht das Ziel einzelne Hersteller zu vergleichen. Deshalb werden die OLEDs nicht den Herstellern zugeordnet. Die hier genannten Preise sind Einkaufspreise einzelner Module für OEMs und können im Projektfall deutlich geringer sein.

3 Grundlagen

Es werden 5 OLED von Ledon, Lumiotec, Osram, Panasonic und Philips mit einer modernen LED-Modulleuchte (Aurista M46 WR7) mit 3800lm, einem modernen LED Downlight (InperlaL C05 BR-CAT2) mit 1000lm und einer opalen Einlegeleuchte in T5-Technik (Enterio M84 OA 414) mit 2880lm Output verglichen. Die Leuchten werden als Einbauleuchten positioniert.

3.1 Parameter

Raumabmessung:	3,6m x 5,4m (19,44m²)
Raumhöhe:	2,8m
Reflektion	
Decke / Wand / Boden:	80% / 50% / 20%
Nutzebene:	0,75m
Wartungsfaktor:	0,8
Randzone:	0,5m
Mittlere Beleuchtungsstärke:	300lx (raumbezogen)
Gleichmäßigkeit Uo (g1):	≥ 0,7

4 Sind OLEDs in der professionellen Beleuchtung einsetzbar?

Die Frage kann nicht eindeutig beantwortet werden. Dies hängt sehr stark von der gewählten Blickrichtung ab.
Zuerst die Punkte die gegen die OLED sprechen.
Der Preis, der für eine Beleuchtung mit OLEDs in diesem Vergleich liegt um den Faktor 20-100 höher gegenüber der LED- und T5- Lösungen ist.
Die Lebensdauer, die momentan noch bei ca. 2000h liegt.
Diese Punkte sind weites gehend bekannt. Ein vielleicht noch nicht so stark betrachteter Punkt ist die Anschlussleistung, da ein Modul nur ca. 2-7W Anschlussleistung hat. Hier ergaben sich auch die geringsten Unterschiede mit einem Faktor von 1-5.
Viel interessanter ist jedoch die Frage ob OLEDs, abgesehen von den genannten Negativpunkten, lichttechnisch schon in der Lage sind Beleuchtungsaufgaben zu lösen. Durch die von den Herstellern favorisierte diffuse Lichtstärkeverteilung bietet sich die OLED hauptsächlich für eine Grundbeleuchtung mit einer mittleren Beleuchtungsstärke von $\bar{E}m \geq 300lx$ an. Eine höhere Grundbeleuchtung macht momentan noch wenig Sinn, da das Verhältnis Lumen / Leuchtenfläche im günstigsten Fall noch um den Faktor 2 schlechter ist gegenüber der LED oder T5 Leuchte. Dementsprechend liegt die Anzahl der benötigten OLED-Module für diese Beleuchtungsaufgabe zwischen 68 und 180 Stück. Dies erscheint auf den ersten Blick als eine sehr große Anzahl und als unpraktikabel. Die Module sind jedoch zwischen 10x10cm und 15x15cm groß. Verbindet man die Module zu einem Cluster von z.B. 600x600mm ergeben sich je nach Größe und Leistung der Module 4-6 Cluster im Raum. Diese Anzahl ist durchaus üblich besonders bei 600er-Moduldecken. Die Clusterung hat generell den Vorteil die Modulanzahl pro Cluster an die benötigte Beleuchtungsstärke und die Anzahl der Cluster im Raum anzupassen.
Neben dieser lichttechnisch eher konventionellen Lösung könnten die Cluster / Module aber auch Teil der Innenarchitektur werden. So ist es denkbar verschiedene Deckenbilder zu gestalten, die Teil der Raumgestaltung sind und alle normativen und lichttechnischen Anforderungen abdecken.

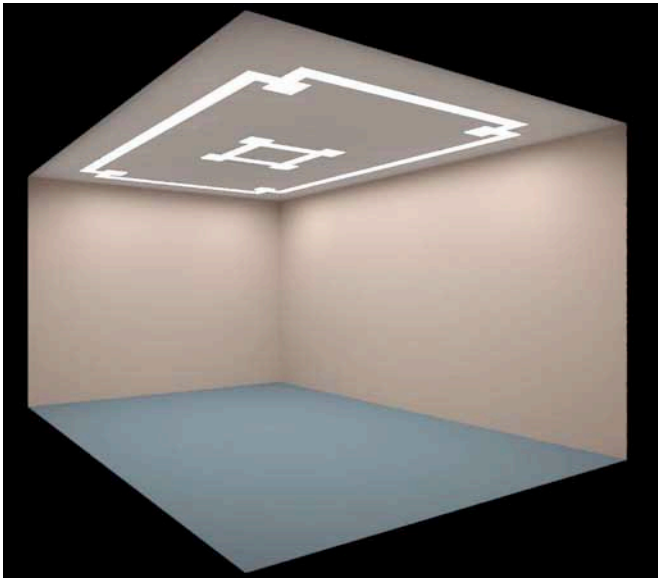


Abb. 1: Deckenbild mit OLED 05

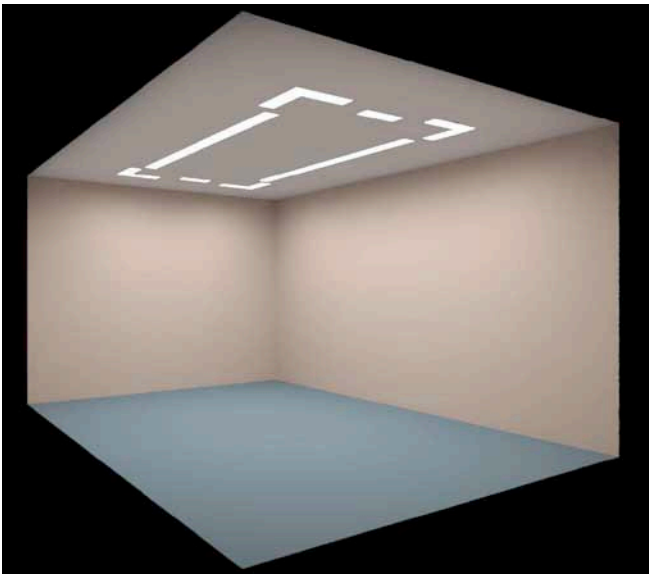


Abb. 2: Deckenbild mit OLED 04

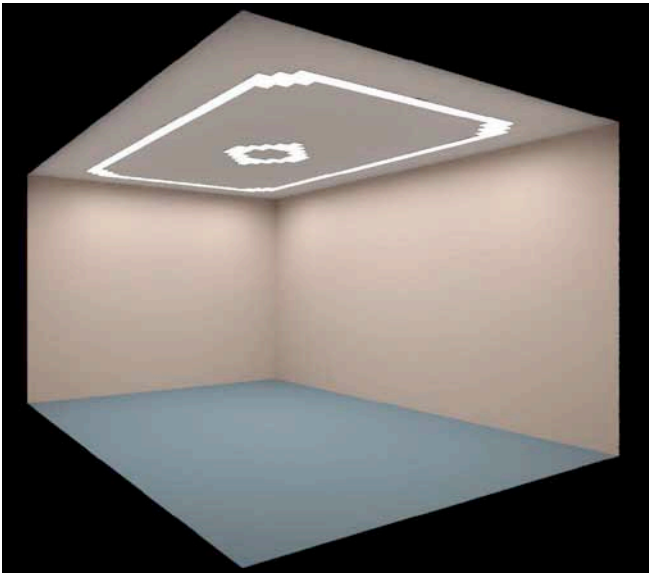


Abb. 3: Deckenbild mit OLED 03

5..Fazit

Das Ziel dieser Untersuchung war es, zu zeigen, ob OLEDs bereits für die Allgemeinbeleuchtung geeignet sind. Die Antwort darauf muss unterteilt werden in ökonomisch-technische Aspekte und in lichttechnische Aspekte.
Ökonomisch-Technisch muss die OLED für den Beleuchtungssektor hauptsächlich die Lebensdauer erheblich verbessern. Der Preis der OLED ist ebenfalls noch zu hoch, aber sobald diese die technischen Schwierigkeiten gelöst hat wird der Preis, ähnlich dem der LED, sich in wirtschaftlich interessante Regionen bewegen.
Lichttechnisch ist die OLED bereits einsetzbar. Nicht nur wie bereits mehrfach gezeigt in Einzellösungen mit hohem Designanspruch sondern auch in der normativen Beleuchtung. Die Abmessungen der Module muss dabei nicht als Nachteil angesehen werden, sondern kann auch integraler Bestandteil der Innenarchitektur sein. Generell hat die OLED das Potential die Grenze zwischen normativer Beleuchtung und dekorativer Beleuchtung aufzuheben.

6 Ergebnisübersicht

Leuchtentyp		T5 4 x 14W opal	LED Downlight	LED Modulleuchte	OLED 01	OLED 02	OLED 03	OLED 04	OLED 05
Anzahl Leuchten im Raum		4	8	2	178	68	180	76	164
Leuchtenlichtstrom im Raum	lm	11520	8000	7600	9968	9928	10260	9120	10004
Anschlußleistung Raum	W	244	112	104	356	244,8	540	547,2	278,8
Gesamtleistung pro Fläche	W/m²	12,55	5,76	5,35	18,31	12,59	27,78	28,15	14,34
Gesamtleistung pro Fläche pro 100lx	W/m²/100lx	3,8	1,86	1,6	6,06	4,17	9,19	9,33	4,83
Mittlere Beleuchtungsstärke Em	lx	353	338	333	302	302	302	298	297
Gleichmäßigkeit U0 (g1) Emin/Em		0,76	0,78	0,73	0,76	0,7	0,76	0,7	0,78
Leuchtenlichtstrom	lm	2880	1000	3800	56	146	57	120	61
Anschlußleistung Leuchte	W	61	14	52	2	3,6	3	7,2	1,7
Leuchteneffizienz	lm/W	47	71	73	28	41	19	17	36
Lumen/ Leuchtenfläche	lm/m²	8000	198944	13571	5600	6489	5700	7680	4236
Preis ca.	€	150	200	430	500	300	300	250	300
Preis / Raumfläche	€ / m²	31	82	44	4578	1049	2778	977	2531

Abb. 4: Ergebnisübersicht

Remote Phosphor Technologie für Weißlicht-Anwendungen

Martin Schiel und Peter Eckl
Future Electronics Deutschland GmbH
Oskar Messter Str. 25
85737 Ismaning

Höherer Lichtqualität bei gleichzeitiger Steigerung der Effizienz

In die Lichtindustrie halten neue Technologien Einzug, die der schnelleren Ablösung herkömmlicher Leuchtmittel durch LEDs Vorschub leisten. Der Trend zu höherer Lichtqualität bei gleichzeitiger Steigerung der Effizienz wird durch Remote Phosphor für Weißlicht-Anwendungen vorangetrieben. Die Marktnachfrage wird vom SSL-Spezialisten Future Lighting Solutions durch einen kompletten Lösungsansatz beantwortet.

Die LED-Technologie ist auf dem besten Weg, sich als Alternative zu Energiesparlampen zu etablieren. Weiterentwicklungen, wie beispielsweise Remote Phosphor sorgen dafür, dass eine weitere Effizienzsteigerung bis zu 30 Prozent gegenüber herkömmlicher LED-Technologie für Weißlicht möglich wird.

Die Remote Phosphor-Technik bietet gleich mehrere Antworten auf generelle Problemstellungen der LED-Beleuchtung. Moderne LED-Lichtquellen werden in der Praxis oft als blendend wahrgenommen. Hinzu kommt eine teilweise feststellbare Varianz im Weißlichtbereich aufgrund unterschiedlicher Farborte der einzelnen LEDs. Die Wärmeentwicklung der LED-Chips und deren direkte Einwirkung auf die Phosphorschicht beeinflusst neben der Konversionseffizienz und deren Abnahme über die Temperatur auch die Lebensdauer und Farbstabilität der LED im Betrieb negativ.

Durch die Abtrennung der Phosphorschicht, die für die Bildung von weißem Licht notwendig ist, lassen sich diese Herausforderungen reduzieren. Separate, austauschbare Phosphorscheiben – Remote Phosphor - ermöglichen eine bisher unbekannte Flexibilität in der Gestaltung der Farbtemperatur und Farbwiedergabe. Das somit entstehende Licht ist universell einsetzbar, blendfrei und überzeugt durch seine Gleichmäßigkeit und Farbkonsistenz. Licht-Designer profitieren von neuen Freiheitsgraden in der Gestaltung von Deckenbeleuchtung, Spots oder industrieller Beleuchtung.

Neuer Ansatz für Weißlicht

Weißes Licht kann durch LEDs auf unterschiedliche Weise erzeugt werden. Entweder durch die Mischung verschiedener Farben wie rot, blau und grün oder durch royalblaue Chips, die mit einer gelben Phosphorschicht überzogen sind. In der Weiterentwicklung der üblichen Variante wird bei dem royalblauen Chip der

Phosphor nicht direkt aufgebracht, sondern auf separaten Trägerscheiben vorgeschaltet. Diese hochpräzisen Phosphorscheiben sind in unterschiedlichen Formfaktoren (rund, quadratisch, linear, Kerze, Ellipse, Halbkugel), Farbtemperaturen, Farbwiedergabeindizes (CRI) und Trägermaterialien (Polycarbonat, Glas) erhältlich und decken damit eine große Bandbreite von Anwendungen ab.

Die Herausforderung von Binning wird großteils umgangen, indem lediglich zwei, genau auf die Phosphorschicht abgestimmte, königsblaue Bins und eine sogenannte Mischkammer zum Einsatz kommen. Die gewünschte Lichtfarbe und der gewünschte Farbwiedergabeindex (CRI) werden durch die Wahl der Phosphorscheibe entsprechend der gewünschten Spezifikation bestimmt. Diese Scheibe und die Mischkammer erzeugen einen homogenen Lichtaustritt und verhindern sichtbare, einzelne und teils blendende Lichtpunkte. Im Ergebnis wird das Licht gleichmäßig und blendfrei wahrgenommen. Zudem werden die blauen and der Phosphorschicht reflektierten Photonen (Lichtteilchen)-in der Mischkammer wieder nach vorne gelenkt und stehen somit als nutzbares Licht zur Verfügung. Dies erhöht wiederum die Effizienz der Remote Phosphor Lösung.

Bild 1) Schematische Darstellung des Remote Phosphor Referenz-Designs von FLS

Beim Remote Phosphor-Ansatz erhält man durch LED-Chip und separaten Phosphorträger zwei Bestandteile im Lichtsystem, die wiederum zu einem kompletten Lösungsansatz vervollständigt werden müssen. Neben dem LED-Bord, der Phosphorscheibe und der Mischkammer wird ggf. ein Reflektor benötigt. Das genau aufeinander abgestimmte Zusammenwirken dieser Komponenten spielt die entscheidende Rolle für den Effizienzgewinn der Anwendung.

Eine seriennahe Lösung

Future Lighting Solutions hat ein komplettes Referenzdesign mit Remote Phosphor-Technologie zur Erzeugung von Weißlicht für Deckenbeleuchtungen entwickelt. Darin kommen ChromaLit® Remote Phosphor-Scheiben zum Einsatz und LUXEON® Rebel ES royal blue LEDs. Furukawa® steuert eine Reflektionsfolie für die Mischkammer mit einem diffusen Reflexionsvermögen von 99 Prozent bei. Vervollständigt wird der Lösungsansatz durch einen Alux-Luxar Reflektor. Auch entsprechende Treiberlösungen zum Ansteuern der LEDs stehen zur Verfügung.

Mit Hilfe der Software „Usable Light Tools“ des Spezialisten für SSL-Beleuchtung kann die Auslegung eines Beleuchtungssystems in Abhängigkeit der Anforderungen einer spezifischen Anwendung berechnet werden. Diese und weitere Software steht im Internet (www.futurelightingsolutions.com) kostenlos zur Verfügung. Neben der Anzahl der benötigten LEDs und der radiometrischen Größen zum Erzielen von z.B. 1100 Lumen lässt sich durch das Tool an einem Beispiel der Effizienzgewinn verdeutlichen. Durch die gewählten sechs LEDs mit einem angenommenen Betriebsstrom von 700mA ergibt sich ein Strahlungsfluss von 1002mW pro LED und damit insgesamt 6012mW. Die Leistung von royalblauen LEDs wird in Milliwatt angegeben. Unter Verwendung einer 4000K (80CRI) ChromaLit® Phosphorscheibe bei +80C Arbeitstemperatur erzielt die Anwendung 1232,46 Lumen. Wird ein

Reflektorverlust von 10 Prozent einkalkuliert, erhält man noch 1109,2 Lumen an angestrebtem Lichtstrom. Die dafür notwendige vom LED-Modul aufgenommene elektrische Leistung beträgt 11,83W.

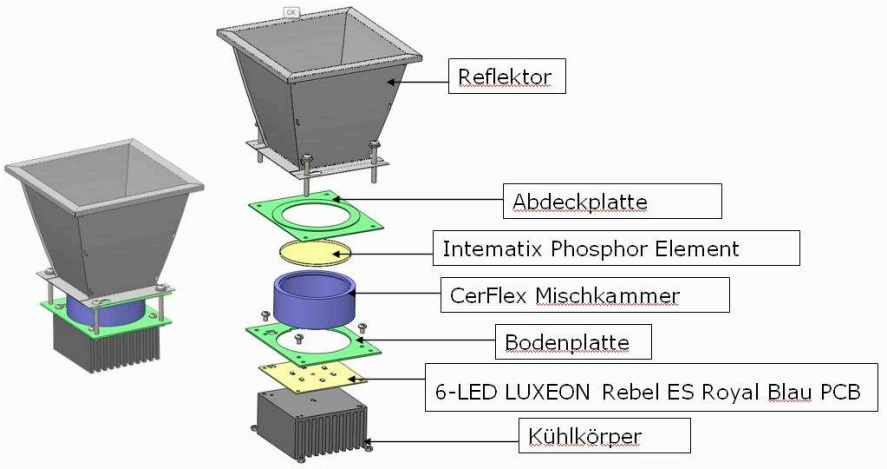
Um den gleichen gewünschten Lichtstrom von 1100 Lumen mit weißen LEDs zu erzielen, müsste die LED-Anzahl auf acht erhöht werden. Der Lichstrom von den in diesem Beispiel gewählten acht weißen LEDs liegt bei 1372lm bei einem Betriebsstrom von ebenfalls 700mA. Die eingespeiste Leistung liegt hier bei 15.84W. Wird der gleiche Reflektorverlust von 10 Prozent vorausgesetzt und darüber hinaus noch ein zusätzlicher Diffuser zwischengeschaltet, der ebenfalls noch einmal mit einem 10 prozentigen Verlust einhergeht, so erzielt man einen vergleichbaren Lichtstrom von 1111,32 Lumen. Der Diffuser wird nötig, um den gleichen Lichteffekt ohne sichtbare einzelne Lichtpunkte zu erzielen, der durch die gezeigte Remote Phosphor Lösung zustande kommt.

Schnelle Realisierung von Remote Phosphor-Anwendungen

Durch das Referenzdesign wird die unkomplizierte Umsetzung anwendungsorientierter Lichtlösungen für Leuchtenbauer und Designer erheblich erleichtert. Die Kunden können sich durch den Lösungsansatz von Future Lighting Solutions auf ihre Kernkompetenz im Licht-Design stützen und für die schnelle Realisierung der Ideen auf die technische Expertise des Spezialisten zurückgreifen.

Dieses Modell des fertigen Lösungsansatzes, dessen Komponenten auch kundenspezifisch anpassbar sind, gibt dem Anwender die Möglichkeit an die Hand, innovative Leuchten und Beleuchtungslösungen zu erschaffen und schnell auf den Markt zu bringen. Der Remote Phosphor-Ansatz vereint hohe Flexibilität in der Farbgestaltung mit einem—möglichen höheren Wirkungsgrad. Durch diese technologische Weiterentwicklung ist der Markt der schnelleren Ablösung herkömmlicher Leuchtmittel wieder einen Schritt näher gekommen.

Abb. 1: Schematische Darstellung des Remote Phosphor Referenz-Designs von FLS


Reflektor
Abdeckplatte
Intematix Phosphor Element
CerFlex Mischkammer
Bodenplatte
6-LED LUXEON Rebel ES Royal Blau PCB
Kühlkörper

High CRI LED Beleuchtung für Museen

M. Boulouednine, M. Reuter - OSRAM AG, Hellabrunner Straße 1, 81543 München

1. Problemstellung

Anhand von zwei Projektbeispielen wird die Problematik der musealen Beleuchtung unter dem Aspekt der optimalen Farbwiedergabe, konservatorischen Aspekten, Energieeffizienz, Flexibilität und Maintenance beleuchtet.

Licht ist für die Präsentation von Kunst unverzichtbar. Jede Ausstellung, jedes Museum ist auf die Verwendung künstlicher Lichtquellen angewiesen. Mit der Verwendung von künstlichem Licht sind aber sofort die Fragestellungen nach der Lichtqualität (Farbwiedergabe und Lichtfarbe), der Effizienz und den konservatorischen Aspekten verbunden.
Für dieses Museum wurde im Rahmen des Förderprojektes des Bundeswirtschaftsministeriums „Kommunen im neuen Licht“ von der OSRAM AG ein komplettes LED Beleuchtungssystem entwickelt und umgesetzt.

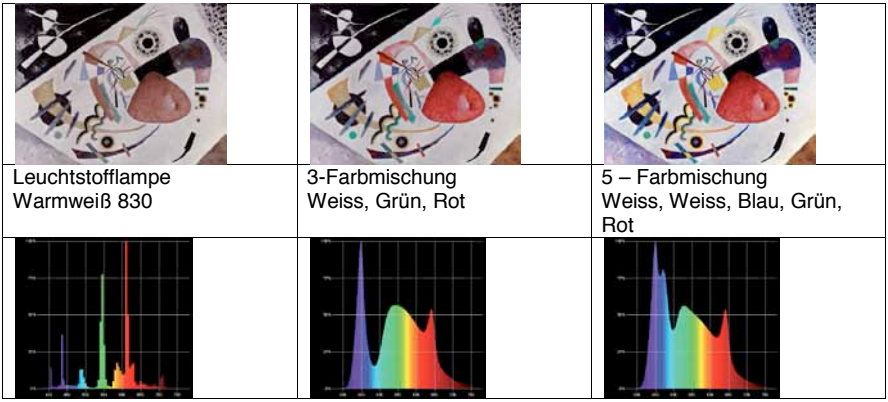
Die von den Künstlern, neben den Konservatoren, Kuratoren und Besuchern vertretenen Positionen gehen eben nicht spurlos an der allgemeinen Problematik, des Zeigens von jeglicher Kunst in künstlich gewählten Lichtverhältnissen vorbei.
Am Beispiel einer Lichtarbeit von O. Eliasson, der einen Raum mit Werken von W. Kandinsky über ein vorhandenes Oberlicht, mittels einer RGB Leuchtstoffröhrenanordnung in unterschiedliche, ortsunabhängige Lichtsituationen hüllt und Kandinsky im Licht anderer Städte zeigt – gleichsam auf die Reise schickt, wird diese Problematik besonders augenfällig. Der Wert dieses Projektes ist nicht nur ein rein konzeptueller, sondern er zeigt uns auch schlagartig die Problematik in der Wahrnehmung und die Veränderlichkeit im Werk selbst. Nicht das Werk wird zur Referenz, sondern das Licht das es anstrahlt.
Diese und andere Erkenntnisse haben zu dem ausgeprägten Wunsch des Nutzers, eine hocheffiziente Beleuchtungsanlage für den Neubau und die historischen Räume der ehemaligen Lenbachvilla geführt.
Franz von Lenbach selbst war auch einer der ersten Künstler, der elektrisches Licht in seinem Winteratelier nutzte, um unabhängig von Tageslicht arbeiten zu können.

Schon in den 1990er Jahren wurden in der Städtischen Galerie im Lenbachhaus Farbkonzepte für die Ausstellungsräume erprobt, die den Werken stark gesättigte Wandfarben zuordnen, um den Eigenkontrast und die Leuchtkraft der Farben im Werk zu steigern.
Bei den ersten theoretischen Untersuchungen im Sinne der Aufgabenstellung wurde schnell klar, dass auch hier nicht, in der Beliebigkeit der Darstellung jegliche, verfügbare Lichtfarbe das Ziel der Forschung sein kann. Vielmehr muss die Entwicklung, die Milieufindung im Einzelnen, also weißes Licht in einem definierten Farbtemperaturspektrum, in einem dem Anwender angepassten Ambiente zu suchen sein. Bauliche Gegebenheiten, konservatorische, aber auch gesamtgesellschaftliche Verantwortung haben der LED-Variante den Vorzug gegeben. Unterstützt auch durch das Anforderungsprofil des Nutzers, wie zum Beispiel eine Helligkeitssteuerung mit gleichzeitiger Korrektur der Farbtemperatur, hohe farbgetreue und plastische Wiedergabe von Werk und Raum. Bei den ersten Versuchen bestätigte sich sehr rasch der momentane Kenntnisstand, dass mit sehr geringem Aufwand, durch Beimischen, unterschiedlich farbiger LEDs, gewünschte Korrekturen am Licht vorgenommen werden können.

verschiedenen Modellreihen, auch in einem 1:4 Raummodell konnte die außergewöhnliche Effizienz der LED-Variante bewiesen werden. (1)

2. Farbqualität

Kunstwerke entstanden und entstehen unter dem Licht der Sonne oder künstlichem Licht, wie Leuchtstofflampen, Kerzen- oder Halogenlicht. Einige dieser Lichtquellen besitzen eine zwar verschieden gewichtete, aber dennoch lückenlose Verteilung der Spektralanteile. Jede Farbe eines Kunstwerks wurde mit genug Licht versorgt, um einen visuellen Eindruck erzeugen zu können. Das Auge vereinigt große Spektralanteile zu einem Eindruck. Aber besonders gesättigte Farben erscheinen unter Licht mit isolierten Spektrallinien zu wenig von den gedeckten Farben differenziert, da manche Farbstoffe gar nicht angeregt werden. Bei Aufnahmen für den Buchdruck werden deshalb Speziallampen eingesetzt. Die moderne Museumsbeleuchtung muss aber das Originalbild in vergleichbarer Qualität darstellen können, wie ein Bildband. Leuchtstofflampen können dies nur zum Teil oder mit hohen Effizienzeinbußen leisten. Halogenlampen erfüllen die Anforderungen einer sehr guten Farbwiedergabe, sind jedoch energetisch sehr ineffizient und darüber hinaus in puncto Lichtfarbe sehr eingeschränkt.
Der Einsatz von Leuchtdioden erlaubt es jedoch, ein gleichmäßiges Spektrum aus mehreren Lichtfarben zusammenzusetzen, in dem es keine Lücken gibt, und trotzdem einen guten Wirkungsgrad zu erzielen. Museumsbesucher finden so einen gleichbleibend hochwertigen Farbeindruck vor. (1)



Leuchtstofflampe Warmweiß 830	3-Farbmischung Weiss, Grün, Rot	5 – Farbmischung Weiss, Weiss, Blau, Grün, Rot

Abb. 1, 2, 3: Wirkung der spektralen Verteilung verschiedener Lichtquellen auf Werke von Kandinsky.

3. Lichtmilieu

In der schon erwähnten Installation von Olafur Eliasson, in der durch Variation der Lichtfarbe geographische und tageszeitliche Lichtmilieus simuliert wurden und so Bilder von Kandinsky in sich verändernder Farbigkeit wahrgenommen werden konnten, zeigte sich deutlich das Potential einer farbtemperaturgesteuerten Beleuchtung. Damals noch mit farbigen Leuchtstofflampen realisiert ist es heute mit Leuchtdioden möglich, ein ideal abgestimmtes, anpassbares Lichtmilieu zu schaffen, ohne die Nachteile der Leuchtstofflampen für solch eine Anwendung in Kauf nehmen zu müssen.
Das Konzept einer LED-Beleuchtung basierend auf Weißlicht emittierenden Hochleistungs-LED in Kombination mit speziell auf die „Lücken“ abgestimmten blauen, roten und grünen LED eröffnet im musealen Bereich nicht nur eine unübertroffen effiziente Beleuchtung mit bester Farbwiedergabe auch bei gesättigten Farben, sondern auch die

Möglichkeit, das Licht auf die spezifische Farbigkeit der Werke einzelner Künstler, Kunstrichtungen und auch Epochen abzustimmen. Ebenso können die Bedingungen bei der Herstellung des Kunstwerkes, ob bei Tageslicht unter freiem Himmel oder nachts im Atelier bei Kunstlicht, reproduziert werden – so, wie sie der Künstler selbst geschaffen hat.

Dabei wird das weiße Licht der Hochleistungs-LED mit gradueller Beimischung von farbigem Licht so modifiziert, dass die spezifische Farbigkeit der Kunstwerke unterstützt werden kann und die spektrale Zusammensetzung des insgesamt emittierten Lichtes an das Tageslichtspektrum angeglichen wird. In der Bildabfolge, Abb. 1 bis 3, sind drei unterschiedliche Beleuchtungseinstellungen der Eliasson-Installation zu erkennen, wobei das neutralweiße Licht in Abb. 2 durch Beimischung von blauem Licht in Abb. 3 eine kältere Farbtemperatur erhält, im Gegensatz dazu in Abb. 1 durch Beimischung von rotem und grünem Licht wärmer wird.
Zu beachten ist dabei, dass die menschliche Wahrnehmung einen Weißabgleich durchführt und so, anders als beim Betrachten dieser Fotografien der Installation, die weißen Wände, mangels Referenz, immer gleich als weiß wahrgenommen werden, während die Farben der Kunstwerke signifikant andere Eindrücke beim Betrachter hinterlassen. (1)

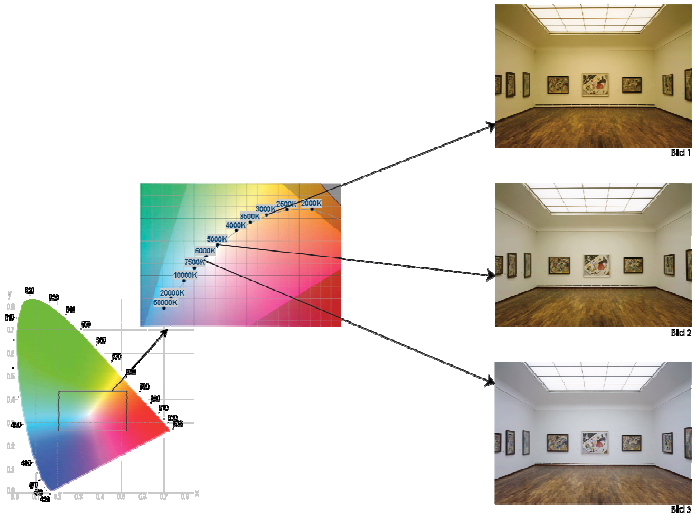


Abb. 4: Beispiele unterschiedlicher Raumeindrücke bei verschiedenen Farbtemperaturen

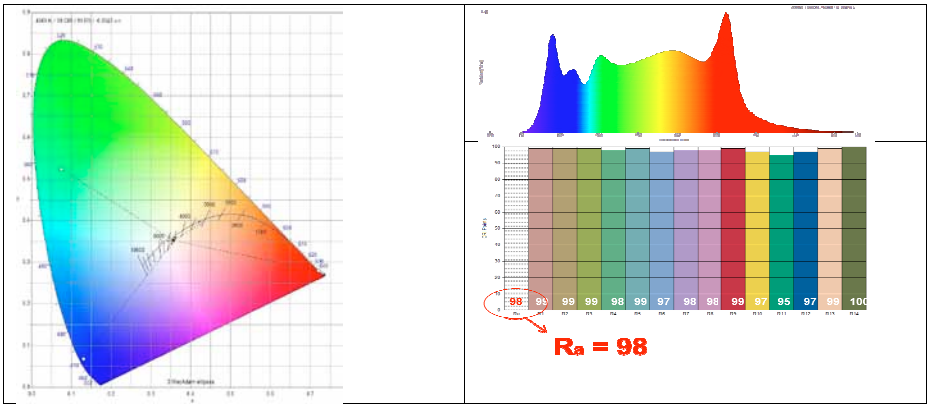


Abb. 5: Beispiel einer Farbmischung für 4.500 K

4. Komfort

Die Helligkeitsregelung (Dimmen) von Leuchtdioden erfolgt heute im Allgemeinen durch ein wiederholtes Ein- und Ausschalten der Lichtquelle in sehr kurzen Abständen. Durch die kurzen Abstände von weniger als einer hundertstel Sekunde wird dieses Schalten nicht mehr direkt als Hell- oder Dunkel wahrgenommen, stattdessen bildet das menschliche Sehen einen Mittelwert, der einem gedimmten Licht entspricht. Medizinische Untersuchungen haben ergeben, dass die Gehirnströme bei solchem Licht verändert und intensiver sind als bei einem kontinuierlichen Leuchten, wie es in der Natur vorkommt. Sensible Menschen nehmen diesen Effekt nicht nur als unterbewusste Stresssituation war, sondern können auch das Pulsen sehen, wie man es früher von Leuchtstoffröhren kannte. Schnelle Augenbewegungen lassen Objekte am Gesichtsfeld nicht mehr flüssig, sondern stotternd vorbeiziehen. Die kurzen Dunkelphasen machen zudem ein Filmen mit Fernseh- und Videokameras schwierig bis unmöglich. Für die höchste Qualität an Ausleuchtung ist eine solche Dimmtechnologie nicht anwendbar. Stattdessen muss der Lichtstrom der Leuchtdiode kontinuierlich reduziert werden, damit ohne weitere Irritation entspannt und konzentriert Kunst betrachtet werden kann. (1)

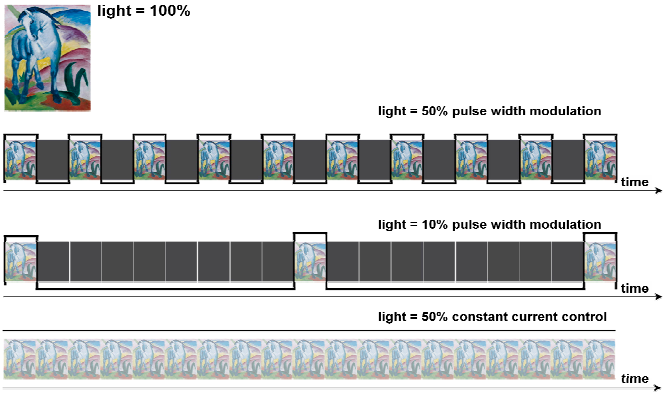


Abb. 6: Helligkeitsregelung von LED, Unterschied zwischen Pulsweitenmodulation (PWM) und Konstantstromregelung

5. Konservatorik

Originalkunstwerke sind unersetzlich. Dennoch altern sie und erleiden, abhängig von den Umweltbedingungen, Schäden. Ein besonderes Spannungsfeld entsteht durch die Beleuchtung, da das Licht, zur Betrachtung unerlässlich, Farben und Oberflächen altern lässt oder gar zerstören kann. Insbesondere die ultravioletten und infraroten Anteile des Lichts tragen aber zur Schädigung der Objekte bei und müssen daher bei den meisten Lichtquellen durch Filter auf ein akzeptables Maß reduziert werden. Leuchtdioden emittieren diese Spektralanteile praktisch nicht, so dass auch ohne aufwändige Filterung die Exponate minimal belastet werden. (1)

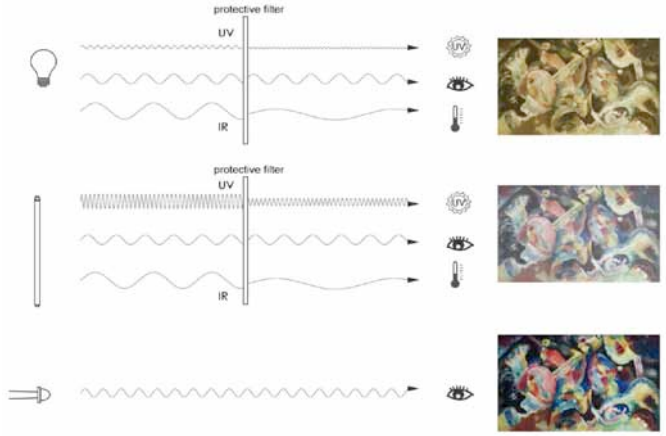


Abb. 7: Lichtwirkung verschiedener Lichtquellen auf empfindliche Objekte

6. Eingesetzte Technik

Aus intensiven Voruntersuchung über das Farbempfinden der verantwortlichen Entscheider, der lichttechnischen Vermessung unterschiedlichster LED- Typen in Bezug auf Lichtstrom, Spektrum und deren temperaturabhängigen Verhalten sind sowohl die Typen der OSRAM OSLON LED in den Lichtfarben Warmweiß (3.000 K), Kaltweiß (6.500 K) sowie eine spezielle Auswahl aus OSLON Rot , Grün und Blau ausgewählt worden, um durchgängig einen Farbwiedergabeindex >95 bei verschiedenen Farbtemperaturen zu erzielen. (1)

Abb. 8: Beispiel eine OSRAM RGBW Leuchte für das Lenbachhaus.

7. Nahfeld High CRI LED Beleuchtungskonzept im Lenbachhaus

Im Lenbachhaus kommen die klassischen Anwendungsfelder der Museumsbeleuchtung zum Tragen wie die Hinterleuchtung von diffusen Flächen als Ergänzung von Tageslichtdecken, die Unterstützung des natürlichen Tageslichteinfalls durch Shed-Dächer sowie die Beleuchtung durch Vouten. All diese Beleuchtungstechniken ermöglichen die homogene Beleuchtung vertikaler Flächen mit bis zu 650 lux vertikale Beleuchtungsstärke bei hoher Gleichmäßigkeit und funktionieren auf kurze Distanz zur Reflexionsfläche (Diffusor, Wand oder Decke) von 1-5 m Entfernung. Gleichzeitig findet durch speziell berechnete Optiken eine Farbmischung sowie eine Einprägung eines Ausstrahlwinkels statt.

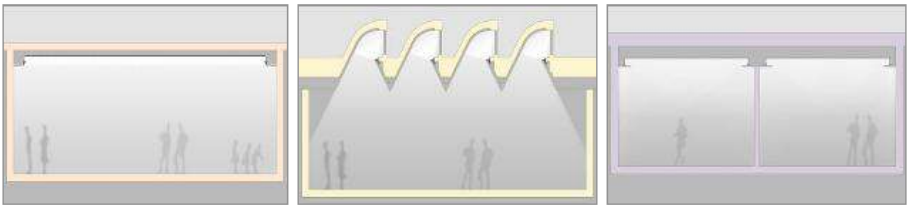


Abb. 9: Beleuchtung im Museum – Deckenhinterleuchtung
Abb. 10: Beleuchtung im Museum – Beleuchtung mit Shed Dach
Abb. 11: Beleuchtung im Museum – Beleuchtung von Deckenvouten

8. Distanz High CRI LED Beleuchtungskonzept in der Sixtinischen Kapelle

Diese für das Lenbachhaus entwickelte High CRI LED-Technologie Technik lässt sich entsprechend sowohl der räumlichen, als auch der beleuchtungstechnischen Anforderungen anpassen und ist somit konzeptionell in weitaus mehr Einsatzbereichen zu sehen. So wird derzeit in einem EU geförderten Projekt www.LED4ART.eu die sixtinische Kapelle im Vatikanstaat komplett auf diese Technologie umgerüstet.

Abb. 12: Innenansicht Sixtinische Kapelle mit den weltbekannten Gemälden das „Jüngsten Gericht“ und den Deckenfresken von Michelangelo

Die Sixtinische Kapelle liegt unmittelbar nördlich des Petersdoms und ist mit diesem über die Sala Regia verbunden. Für Touristen ist allerdings nur der Eintritt über die Vatikanischen Museen möglich. Täglich durchströmen durchschnittlich 25.000 Besucher die Sixtinische Kapelle, die mehrere der berühmtesten Gemälde der Welt, darunter auch die weltbekannte Szene aus der Genesis von Michelangelo enthält.

Die Kapelle ist neben der touristischen Attraktion aber auch der Ort, an dem das Konklave abgehalten wird, der Wahl des Papstes, an dem Messen gefeiert werden und Konzerte stattfinden. Und jede dieser Ereignisse erfordert ein eigenes Lichtkonzept für die Neuausleuchtung der Sixtinischen Kapelle.

Das Projekt wird im Rahmen des von der EU und der OSRAM AG geförderten Projektes von einem Konsortium mit Teilnehmern aus vier europäischen Ländern abgewickelt. Das italienische Lichtplanungsbüro Faber Technica um Professor Frascarolo übernimmt zusammen mit den OSRAM Fachabteilungen in Deutschland das Lichtkonzept, die Universität von Pannonia in Ungarn unter der Leitung von Professor Janos Schanda kümmert sich um die optimale Abstimmung der LED für einen bestmöglichen Farbwiedergabeindex. Die Energieeinsparung wird von den Forschern des katalanischen Institutes IREC in Barcelona gemessen. Fachleute aus dem Vatikan unterstützen in Bezug auf Konservatorik und Installation.

Ziel des Projektes ist eine neue Gestaltung der Ausleuchtung der Decken- und Wandfresken bei bestmöglicher Farbtreue. Die Anhebung der Beleuchtungsstärkeniveaus im Rahmen des technisch und konservatorisch möglichen wird die Wahrnehmung der Kunstwerke erheblich verbessern. Gleichzeitig wird gegenüber den heute eingesetzten Standard Technologien wie Hochdruckentladungs- und Halogenlampen erheblich Energie eingespart. Zudem sollen alle heute sichtbaren Leuchten aus der Kapelle entfernt werden. Die Wartungszyklen werden sich um bis zu einem Faktor 40 verlängern und sämtliche schädlichen Strahlungsanteile der traditionellen Lichtquellen wie ultraviolette (UV) und infrarote Wärmestrahlung (IR) gehören dann der Vergangenheit an. Verschiedene Lichtszenen werden eine stimmungsvolle Beleuchtung für die bis zu 4,5 Millionen kunstinteressierten Besucher pro Jahr ermöglichen, aber auch für kirchliche Messen, das Konklave und andere Veranstaltungen den geeigneten Rahmen bieten. Eine Computer gestützte Steuerung wird größtmögliche Freiheit in Bezug auf die optimalen Farbmischung der LED sowie der verschiedenen Beleuchtungsszenen für die beschriebenen Anwendungen in der Sixtinischen Kapelle gewähren.

9. Technologie

Die für dieses Projekt eingesetzte Technologie entwickelt die OSRAM AG selbst. Hauptaufgabe hierbei ist es, die Packungsdichten auf den Platinen und die Optiken für die Nahfeld Lösung beim Lenbachhaus auf Ferndistanzen von bis zu 15 Metern anzupassen. Die eingesetzten OSRAM OSLON LED gehören zu den leistungsfähigsten und effizientesten überhaupt im Beleuchtungsmarkt. Die Platinen, Leuchten, Optiken sowie sämtliche Steuerungskomponenten werden von OSRAM entwickelt.

In Zusammenarbeit mit dem lichttechnischen Messlabor von OSRAM wurde aus diesen gewonnenen Erkenntnissen und der Notwendigkeit, die optimalen Mischungsverhältnisse beliebiger LED Zusammenstellungen für den höchstmöglichen Farbwiedergabeindex abhängig von vorgegebenen Farbtemperaturen mit minimaler Abweichung vom Planckschen Kurvenzug berechnen, eine Simulationssoftware entwickelt. Als Ergebnis können mit Einzelspektren Kombinationsmöglichkeiten mit definierten Randparametern berechnet und als Dimmstufen für die Steuereinheit ausgegeben werden.

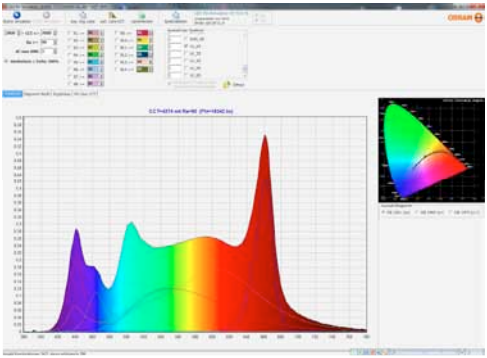


Abb. 13: Software zur Berechnung des Farbwiedergabeindex R_a

Auch das Schädigungspotential des so definierten Lichtes läßt sich nach CIE 157:2004 berechnen und gibt Kuratoren, Leihgeber und Konservatoren ein wichtigen Hinweis auf eventl. benötigte oder unnötige Schutzmassnahmen und entsprechende Expoitionszeiten der Kunstwerke.

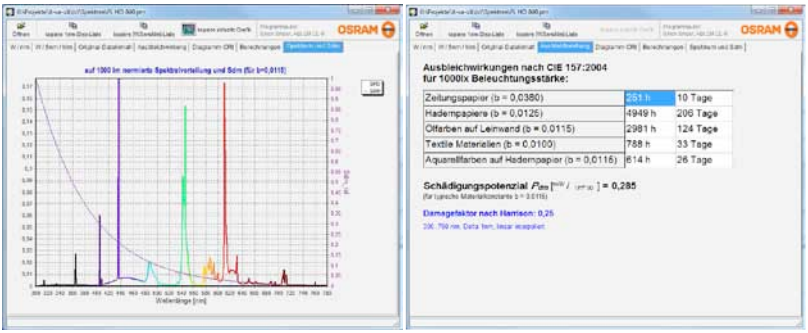


Abb. 14: Spe-Dam Software zur Berechnung des Schädigungspotentials nach CIE 157:2004

Messungen vor Ort werden Auskunft und neue Erkenntnisse über die Eigenschaften von den eingesetzten Farbpigmenten aus der Renaissance Zeit erbringen.

10. Ausblick auf weitere Anwendungen

Diese für das Lenbachhaus und die Sixtinische Kapelle entwickelte High CRI LED Technologie lässt sich entsprechend der räumlichen, als auch der beleuchtungstechnischen Anforderungen anpassen und ist somit konzeptionell in weitaus mehr Einsatzbereichen als im musealen Umfeld zu sehen.

Quellenangabe

(1) Prof. Dietmar Tanterl, Wettbewerbsbeitrag für „Kommunen im neuen Licht – 2010“

LED- und Tageslichttechnik - Eine perfekte Symbiose

Detlef Düe, Dr. Hans Laschefski

ALANOD GmbH & Co. KG, Egerstr. 12
58256 Ennepetal · Germany

1 Problemstellung

Mit dem Begriff Tageslichtnutzung assoziiert man häufig Fassaden- oder Fenstersysteme, die das Horizontlicht nutzen. Diese Technologie, obwohl schon intensiv untersucht und hoch entwickelt, fristet bisher aber eher ein Schattendasein, als dass sie im größeren Ausmaß Anwendung findet. Woran liegt das eigentlich? Die Antwort ist eindeutig: Bei den existierenden Tageslichtsystemen handelt es sich meist um objektbezogene, individuelle Anfertigungen als um einen industriellen Standard.

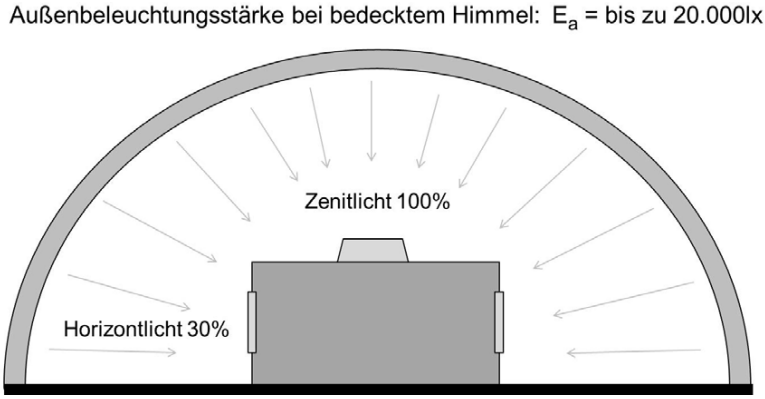


Abb. 1: Auslegungsparameter für die Tageslichtnutzung – Außenbeleuchtungsstärke des bedeckten Himmels

Anders verhält es sich bei der Nutzung des Zenitlichtes durch Oberlichter beziehungsweise Lightpipes. Als Rauch- und Wärmeabzugsanlage (kurz RWA) im industriellen Umfeld vorgeschrieben und akzeptiert, haben sich am Markt gewisse Standards etabliert. Hier fürchtet der Bauherr jedoch eher den sommerlichen Wärmeeintrag in das Gebäude, als das er das bauliche Element als Leuchte versteht. Die „Bedenken“ sind berechtigt, liegt doch selbst in unseren Breiten die sommerliche solare Einstrahlung bei rund 1000 W/m^2. Das Potential, die sich im Umfeld der Tageslichtkuppel befindlichen Arbeitsplätze mit der natürlichen Ressource „Licht“ zu versorgen, wird nicht wahrgenommen. Das ist prinzipiell unverständlich, steht doch etwa dreimal mehr Zenitlicht als Horizontlicht zur Verfügung, was von einem intelligenten Dachsystem genutzt werden könnte (siehe Abb. 1). Ein weiterer Vorteil hinsichtlich der Gebäudearchitektur ist ebenfalls leicht erkennbar. Die Gebäudeausrichtung spielt für derartige Dachsysteme kaum eine Rolle. Das erleichtert die Planungsphase. Im weiteren Projektverlauf werden diese Standard-Dachelemente häufig zum „Problem“ für den Lichtplaner. Er sieht sich bei der Auslegung der Beleuchtungsanlage mit

einer Dachöffnung konfrontiert, die keinen Raum für die Montage der zusätzlich unbedingt erforderlichen künstlichen Beleuchtung zulässt.

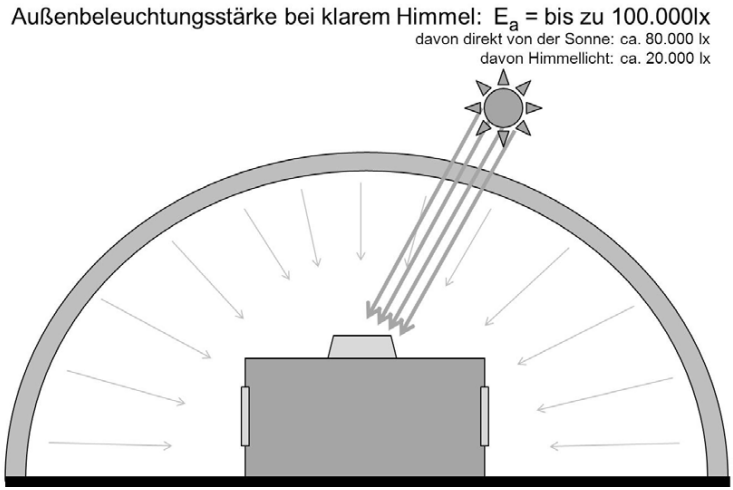


Abb. 2: Außenbeleuchtungsstärken bei klarem Himmel

An dieser Stelle wird ein weiterer „Schwachpunkt“ für die Etablierung sinnvoller Tageslichttechnik erkennbar. Der Architekt befasst sich selten oder gar nicht mit der erforderlichen Lichttechnik. Energiebilanzen dominieren seinen Alltag, die Kunstlichtplanung steht an zweiter Stelle. Eigentlich müsste sich die Sichtweise unter dem Eindruck der geltenden Regularien (EnEV 2012) ändern, die Tageslichtnutzung als integraler Bestandteil der Beleuchtung verstanden und schon früh in die Gebäudeplanung integriert werden.

2 Zielsetzung

Das vorliegende Projekt will aufzeigen, wie in einem industriell produzierbaren Produkt, mit minimiertem planerischem Aufwand, Tageslicht sinnvoll genutzt werden kann. Voraussetzungen, die dabei Berücksichtigung finden sind, dass der mit der Nutzung derartiger Systeme verbundene Wärmeeintrag systemseitig minimiert wird und gleichzeitig ein Produkt entsteht, welches sich wie eine Leuchte einfach in die Kunstlichtplanung integrieren lässt. Resultat ist eine Tageslichtkuppel zur Nutzung des Zenitlichtes, die industriellen Standards entspricht. Durch Ergänzung mit einer Kunstlichtquelle – und hier aus verschiedenen Gründen LED Technik – lässt sich eine solche Lichtkuppel als selbständige Leuchten in die Lichtplanung integrieren. Tages- und Kunstlicht werden so innerhalb eines Systems ideal miteinander kombiniert. Die konstruktiven Beschränkungen, getrennte Systeme für das Tages- bzw. Kunstlicht und häufig in der industriellen Anwendung auch die Wärmetechnik im Deckenbereich zu positionieren, entfallen.

3 Licht-Transmissions-Untersuchung

Eine simple energetische Überlegung liefert bei der Betrachtung existierender Dachkuppeln den ersten Ansatzpunkt für die Ausgestaltung eines derartigen Produktes. Gemäß einer einfachen globalen Energiebilanz für das Gebäude entspricht, im thermodynamischen Gleichgewicht, die zugeführte Energie Q_{zu} ins Gebäude der abgeführten Energie Q_{ab} (also: $Q_{zu} = Q_{ab}$). Dabei ist einleuchtend, dass vor allem im Sommer ein gut isoliertes Gebäude mit minimalen Öffnungen energetisch Vorteile bietet, da nur geringe Wärmeströme das Innere aufheizen. Folglich sind auch nur geringe Wärmemengen abzuführen. Für die „Wärmeverluste" im Winter gilt dies natürlich entsprechend. Nun scheint die Tageslichtnutzung im Widerspruch zu diesem Prinzip zu stehen, müssen doch vor allem im Dachbereich Öffnungen geschaffen werden, die Licht und damit auch Wärme hinein lassen. Will ein derartiges Produkt erfolgreich sein, sollte es bereits in der Designphase hinsichtlich „Lichtdurchlässigkeit" optimiert werden. Je geringer die zu öffnende Dachfläche ist, desto geringer wird der Wärmeeintrag sein. Unabhängig von der Tatsache, dass zusätzliche Maßnahmen zur IR-Reflexion getroffen werden können. Die nachfolgenden Ausführungen gelten ausschließlich für die Transmissionseigenschaften des Lichtschachtes ohne den Einfluss der Kuppelabdeckung von Lichteintritts- zu Lichtaustrittsebene (siehe Abb. 3).

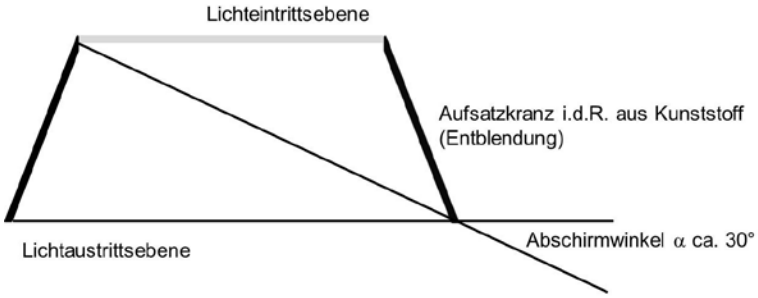
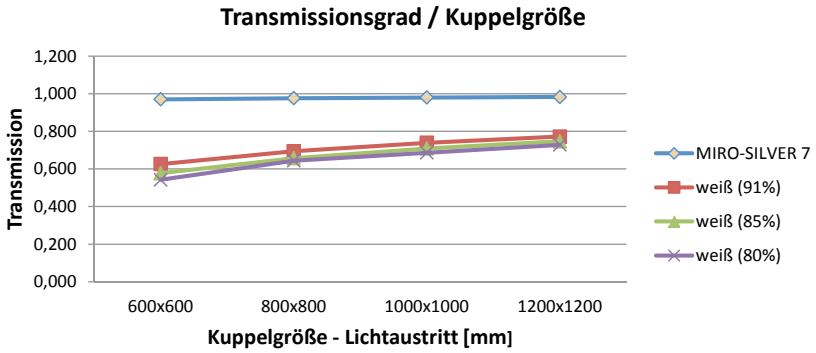


Abb. 3: Prinzipskizze einer Tageslichtkuppel

Untersuchungen an Standard-Lichtkuppeln haben gezeigt, dass z.B. bei Verwendung einfacher Kunststoffe (Reflexionsgrad 80%), bedingt durch die diffuse Reflexion der nichtmetallischen Oberflächen, ca. 30% des in die Lichtkuppel eingekoppelten Lichtstroms durch Absorption verloren gehen. Die künstliche Beleuchtung muss diese daher ergänzen. Die logische Konsequenz für ein im Hinblick auf Tageslichtnutzung optimiertes Produkt ist die Erhöhung des Reflexionsgrades des Kunststoffmaterials. Mit Reflexionsgraden von 91% sind Materialien verfügbar, die zur Produktion dieser Lichtkuppeln genutzt werden können. Messungen haben ergeben, dass sich die Verluste so auf ca. 25% reduzieren lassen, ein nicht befriedigendes Ergebnis. Der entscheidende Grund hierfür ist das diffuse Reflexionsverhalten dieser Materialien. Im Falle einer sehr gerichteten Reflexion erreicht, in Abhängigkeit von der Geometrie der Lichtkuppel, das eintretende Licht nach einer minimalen Anzahl von Reflexionen die Lichtaustrittsebene. Wird das Licht jedoch diffus reflektiert, treten deutlich mehr Reflexionen innerhalb der Kuppel auf. Da jede einzelne Reflexion mit Absorption, sprich Verlusten, verbunden ist, ist das Transmissionsergebnis deutlich schlechter. Abgesehen von den Absorptionsverlusten tritt durch den lambertialen Charakter der diffusen Reflexion eine weitere Beeinträchtigung auf, ein Teil des eingekoppelten Lichtes verlässt durch die Lichteintrittsebene wieder die Tagelichtkuppel. Die auftretenden

diffusen Mehrfachreflexionen gilt es zu minimieren, und dies ist nur mit metallischen Oberflächen, die eine gerichtete Lichtlenkung zulassen, möglich. Durch die Auskleidung der Lichtkuppeln mit hochreflektivem Aluminium (MIRO-SILVER® 7 aus dem Hause ALANOD) können die Verluste auf ca. 2% reduziert werden. Und das durchgängig für alle Kuppelgrößen.



Tab. 1: Transmissionsgrad in Abhängigkeit von der Lichtaustrittsfläche der Lichtkuppel

Diese Messungen (siehe Tab. 1) haben ebenfalls gezeigt, dass mit geringer werdenden Kuppelgrößen, der Einfluss des Materials zunimmt. Anders ausgedrückt, verfolgt man das Ziel, kleine Dachöffnungen zu nutzen um den Wärmeeintrag zu minimieren, kommt der Materialauswahl eine besondere Bedeutung zu. Durch die richtige Materialauswahl lässt sich das Tageslicht nahezu verlustfrei in den Raum transportieren.

Die Auslegung der Tageslichtkuppel wäre nicht sorgfältig, wenn man die Einbausituation derartiger Produkte nicht ebenfalls berücksichtigt. Nachdem nachvollziehbar ist, wie entscheidend das reflektive Material für die Lichttransmission der Kuppel ist, muss dem Deckenmaterial auf das die Kuppel aufgesetzt wird ebenfalls eine besondere Bedeutung zukommen. Auch hierzu haben Untersuchungen stattgefunden. Geht man von einer 25 cm starken Betondecke aus, die im Idealfall nach Anstrich mit rund 85% diffus reflektiert, so kann man für eine 1000x1000 Kuppel mit 500mm Aufsatzkranz festhalten, dass der durch MIRO-SILVER® 7 gute Transmissionsgrad von 98% durch den Einfluss der diffusen Reflexion von Beton auf 85% absinkt.
Kleidet man hingegen den Deckendurchbruch mit hochreflektivem Aluminium aus, so kann mit 97,2% des eingekoppelten Tageslichtes nahezu verlustfrei ausgekoppelt werden. Somit ist klar, dass nur die konsequente Verwendung derartiger hochreflektiver Materialien, die guten Transmissionseigenschaften sicherstellt.

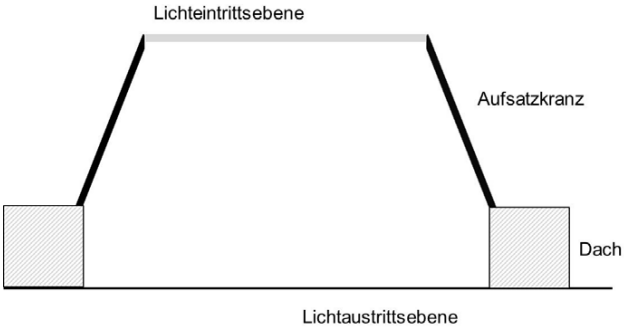


Abb. 4: Prinzipskizze einer Tageslichtkuppel im verbauten Zustand

4 LED-Beleuchtungseinheit

Wenn eine Tageslichtkuppel konsequent Beleuchtungsaufgaben übernehmen soll, ist es nur sinnvoll, sie um eine Kunstlichtquelle zu erweitern, damit in den Abendstunden oder bei nicht ausreichendem Tageslicht dennoch eine ausreichende Beleuchtungsstärke garantiert werden kann. Aufgrund der variablen Abmessungen bietet sich hier eine LED-Kunstlichtquelle förmlich an. In ihrer Länge lässt sich diese Form der Kunstlichtquelle einfach auf die Dimensionen der Lichtkuppel abstimmen. Zum anderen kann durch die Integration einer tageslichtabhängigen Steuerung eine hohe Effizienz bei gleichzeitig minimalem Stromverbrauch garantiert werden. Hinsichtlich der Steuerung bestehen häufig Bedenken, dass diese Technologie nicht wirklich ausgereift bzw. zu kompliziert sei oder die Sensoren im Projekt gegebenenfalls falsch positioniert werden. Auch das kann bei dem vorhandenen Konzept ausgeschlossen werden. Die einzelne Kuppel kann mit einem integrierten Tageslichtsensor ausgeliefert werden, der nicht das vom Raumboden reflektierte Licht vermisst, sondern nach oben ausgerichtet den in die Kuppel eintretenden Lichtstrom. Somit steuert der integrierte Kuppelsensor direkt die zugehörige LED-Kunstlichteinheit und somit wird die Hybridkuppel zur Tages- Kunstlicht „plug and play“-Lösung. Sicher ein signifikanter Vorteil auch bei kleinen Anlagen.

Dadurch stellt die LED Technik eine perfekte Symbiose mit der Tageslichttechnik dar. Gleichzeitig kann davon ausgegangen werden, dass sich dieses Tageslichtelement leicht in seiner Funktion als LED-Leuchte aber auch als Tageslichtquelle vermessen lässt und die Daten im Zuge einer Kunstlichtplanung verwendet werden können.

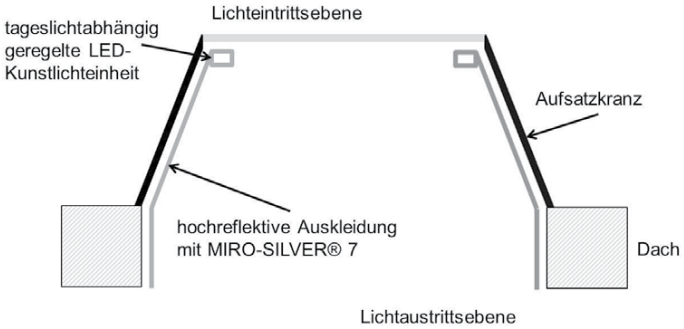


Abb. 5: Prinzipskizze Lichtkuppel mit LED Kunstlichtquelle im verbauten Zustand

5 Applikationssimulation

Im Rahmen einer Simulation konnte für eine konkrete Anwendung die Effektivität derartiger Lichtkuppeln beeindruckend nachgewiesen werden. Für ein kleines Büro, mit einer Grundfläche von 4x4 m^2 und einer Höhe von 2,5 m ergibt sich mit einer Standard 1000x1000 mm Lichtkuppel, 500 mm Aufsatzkranz (weißer Kunststoff, 80% diffus reflektierend) und einer doppelschaligen Abschlussverglasung (Transmission für das Glas 73%) bei bedecktem Himmel und 10.000lx ein Tageslichtquotient von 4%. Das entspricht folglich einer mittleren Beleuchtungsstärke von 400 lx auf der Arbeitsfläche. Anders stellt sich die Situation dar, wenn der Lichtschacht in derselben Situation hochreflektiv ausgeführt ist. Der Tageslichtquotient steigt auf 7%. Es ist leicht nachzuvollziehen, dass durch die Optimierung der Tageslichtkuppel eine signifikante Verbesserung der Beleuchtung mit Tageslicht erreicht werden konnte. Selbst bei nur 10.000lx im Außenraum, wäre die Situation rechts – also durch MIRO-SILVER® optimiert, noch normkonform.

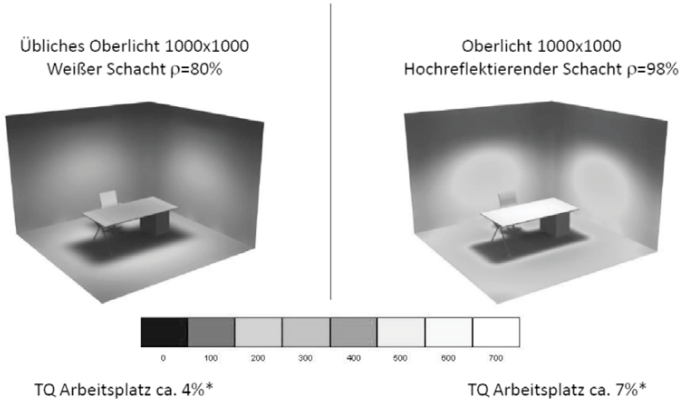


Abb. 6: Vergleich Tageslichtquotient in einer Bürosituation
Tageslichtkuppel ohne (links) bzw. mit hochreflektivem Aluminium (rechts)

Anmerkung: Die Lichteintrittsfläche der Kuppel beträgt 0,6724 m^2.

6 Projektstatus

Der Prototyp einer Kuppel wurde im Rahmen der Light & Building 2012 in Frankfurt auf dem Messestand der Firma ALANOD präsentiert. Mit rund 8000lm bei 4000K entspricht der Lichtstrom der Tageslicht-Kuppel-Leuchte ungefähr einer 2 * 49 Watt T5-Leuchte. Gleichzeitig konnte die Lösung bereits in einem Model aus dem Hause Bartenbach, in dem eine Bürosituation im Maßstab 1:20 simuliert wurde, überzeugen.

Abb. 7: Prototyp der Tageslichtkuppel mit LED-Kunstlichtquelle aus dem Hause Lamilux

Es handelt sich um ein Gemeinschaftsprojekt zwischen den unter Punkt 8) genannten Entwicklungspartnerfirmen.

7 Zusammenfassung

An dieser Stelle kann zusammenfassend festgehalten werden, dass durch die material- und lichttechnische Optimierung eines bestehenden Produktes ein deutlicher Fortschritt in der Tageslichttechnik erreicht werden konnte. Neben einem industriell produzierbaren Produkt entstand ein Hybridelement, nämlich die Tageslichtkuppel mit LED-Kunstlichtquelle, die dem Anwender und Planer mehrere Vorteile bietet. Neben einer um ca. 30% geringeren Dachöffnung, was klimatechnisch Vorteile bedeutet, lässt sich das Tageslichtelement einfach in die Kunstlichtplanung, mit den bestehenden Werkzeugen zur Lichtberechnung, integrieren. 30% mehr Tageslicht oder 30% weniger Kuppeln ohne die Probleme die notwendigen Leuchten für die künstliche Beleuchtung zu positionieren, sind das Ergebnis dieses Gemeinschaftsprojektes.

8 Entwicklungspartner

ALANOD GmbH & Co. KG,
Egerstr. 12
58256 Ennepetal · Germany
Ansprechpartner: Detlef Düe

Bartenbach LichtLabor GmbH
Rinner Straße 14
6071 Aldrans/Innsbruck · Österreich
Ansprechpartner: Andreas Danler

Lamilux
Heinrich Strunz GmbH & Co. Besitz KG
Zehstraße 2
95111 Rehau · Germany
Ansprechpartner: Joachim Hessemer

9 Literaturverzeichnis

/1/ Christian Bartenbach, Walter Witting, „Handbuch für Lichtgestaltung - Lichttechnische und wahrnehmungspsychologische Grundlagen“, Springer-Verlag Wien, 2009

Objektdetektion bei verschiedenen Adaptationsspektren und Störgrößen unter mesopischen Bedingungen

A. Ueberschaer, Ch. Schierz
Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik
Prof.-Schmidt-Str. 26, 98693 Ilmenau

Die in diesem Beitrag vorgestellte LED-Pilotleuchte wurde im Rahmen des Thüringer Verbundprojekts *CoLight* (Akronym für: **Co**rporate in **Light**ing) entwickelt. Das Projekt CoLight wurde durch die Thüringer Aufbaubank (TAB) und den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) gefördert.

1. Problemstellung

In der Planungspraxis werden Straßenbeleuchtungssysteme anhand des zu erzielenden mittleren Leuchtdichteniveaus ausgelegt. Diese sind in DIN EN 13201-2 vorgegeben und legen folglich - zusammen mit Homogenitätsanforderungen - den minimalen Lichtstrom der zu verwendenden Leuchte fest /1/. Für das Lichtspektrum respektive die Lichtfarbe existieren hingegen keine eindeutigen Kenngrößen, die normativ bzw. in Empfehlungen geregelt sind. Qualitativ werden die Merkmale Lichtfarbe und Farbwiedergabe zwar erwähnt und ihnen neben einer ästhetischen Bedeutung auch ein Einfluss auf Sehleistung und Wohlbefinden beigemessen /1/, /2/, /3/, /4/, /5/, /6/, /7/, /8/. Praktisch lassen sich diese Angaben jedoch nicht definiert umsetzen, da sie einen weiten Auslegungsspielraum haben. Zudem wird die Lichtfarbe durch das Lichterzeugungsprinzip des verwendeten Leuchtmittels bedingt, wodurch die Farbauswahl stark eingeschränkt wird. Insbesondere dann, wenn nicht die gestalterischen sondern die energetischen Kriterien als Entscheidungskriterium herangezogen werden.
Auch die Einflüsse erschwerter Sehbedingungen auf die Wahrnehmung in Abhängigkeit des Spektrums werden in der Straßenbeleuchtung nicht berücksichtigt, obwohl das von Niederschlag reflektierte Licht die Sichtbarkeit beeinträchtigt. Die Reflexionen können zu einer Verschleierung des Sichtfeldes und somit zur Herabsetzung von Sehleistung und Sehkomfort führen. /9/, /10/

Das visuelle Wahrnehmungssystem des Menschen passt sich an seine vorherrschenden Umgebungsbedingungen an. Dieser Prozess wird Adaptation genannt. Ein hinsichtlich der Lichtfarbe verändertes Umfeld löst einen Adaptationsprozess – eine Farbumstimmung – aus. Es ist bekannt, dass gesättigte Lichtquellen gleicher Leuchtdichte unterschiedliche Helligkeiten hervorrufen (Helmholtz-Kohlrausch-Effekt) und die Lichtfarbe einen Einfluss auf die Leistung und das subjektive Empfinden (Gefallen) der Probanden hat /11/. Weitere Studien konnten zeigen, dass sich das Lichtspektrum unter mesopischen Bedingungen auf die visuelle Wahrnehmung auswirkt. So werden Objekte, die weiter von der Sehachse entfernt liegen (Peripherie) unter kurzwelligem Licht besser erkannt. /12/, /13/
Gleichwohl wird dem spektralen Einfluss auf die visuelle Wahrnehmung in der Praxis bisher wenig Bedeutung beigemessen, was mitunter auch dem Umstand geschuldet ist, dass der spektrale Variationsumfang konventioneller Leuchten äußerst gering ist. Mit der LED lässt sich eine Vielzahl an Lichtspektren erzeugen, sowohl durch die Variation des Leuchtstoffs, um verschiedene ähnlichste Farbtemperaturen zu erzielen, als auch durch die Variation elektronischer Parameter bei Multi-Chip-Anwendungen, deren Ausgangsspektrum sich additiv aus den Einzelspektren der Primärvalenzen ergibt. Dabei wird insbesondere bei Multi-Chip-Anwendungen mit großem Gamut das Lichtspektrum respektive die Lichtfarbe zu einem eigenständigen Parameter, den es zu bewerten gilt.

2. Zielsetzung

Ein Ziel des Projekts CoLight ist die Entwicklung einer intelligenten LED-Straßenleuchte, welche ihre farbmetrischen Parameter über eine elektronische Steuerung im laufenden Betrieb an die vorherrschende Verkehrsdichte und Witterungsbedingung anpassen kann. In Labor- und Feldstudien werden die Einflüsse des Spektrums auf Sehleistung und Sehkomfort empirisch untersucht, um hieraus Parameter für den Steueralgorithmus abzuleiten.
Ein weiteres Ziel war die Veränderung der Abstrahlcharakteristik (LVK) der Leuchte im laufenden Betrieb, um die Sichtbarkeit unter Schlechtwetterbedingungen zu verbessern. An dieser Stelle sei auf /22/ verwiesen.

3. Stand der Wissenschaft und Technik

3.1. Forschung

Nach Lachenmayr /15/ erfolgt der nächtliche Straßenverkehr überwiegend im Bereich des mesopischen Sehens. Studien zeigen, dass die visuelle Leistung unter mesopischen Bedingungen vom Spektrum der Lichtquelle beeinflusst wird, wobei die Höhe dieses Einflusses abhängig ist von der jeweiligen Sehaufgabe /21/.

Van Creveld /11/ verfolgte den Ansatz, dass stark gesättigte Lichtquellen heller wahrgenommen werden als weißes Licht gleicher Leuchtdichte. In diesem Zusammenhang untersuchte er u.a. den Einfluss der Lichtfarbe auf die Sichtbarkeit (Visibility). Er kam zu dem Ergebnis, dass kurzwelligeres Licht zu einer schlechteren Sehleistung führt. Hingegen ist das subjektive Empfinden (Gefallen) der Lichtfarbe unabhängig von der individuellen Leistung der Probanden.

Bullough und Rea /13/ befassten sich mit der Fahrleistung von Probanden bei Durchführung einer simulierten Fahraufgabe mit peripheren Reizen unter mesopischen und niedrig photopischen Bedingungen bei verschiedenen Spektren. Es zeigte sich, dass der Einfluss des Spektrums höher als erwartet war und den Einfluss des Beleuchtungsniveaus überstieg. Darauf basierend schlagen sie vor, die Parameter „off-axis Sichtbarkeit“, „on-axis Sichtbarkeit“ und „Farbwiedergabe“ zukünftig für die Planungspraxis zu verwenden.

In einer weiteren Studie untersuchen Bullough und Rea /10/ die Einflüsse von Regen und Schnee, die sich aufgrund der größeren Partikeldurchmesser in einem visuellen Rauschen äußern, welches sich über das Sichtfeld legt. Generell führt das durch Niederschlag reflektierte Licht zu Abschattungen der Straße oder von Objekten. Hierdurch wird der Objektkontrast reduziert und es kommt zu einer Herabsetzung der Sichtbarkeit. Bei visuellem Rauschen kommt es weiterhin zu Beeinträchtigungen im Sehfeld durch Flimmererscheinungen, die durch Reflexionen an den sich bewegenden Partikeln (Regentropfen, Schneeflocken) entstehen. Flimmernde Reize solch bewegter Objekte erscheinen heller als statische Objekte gleicher Leuchtdichte und können in Form von Blendung zu Unbehagen und Ermüdung führen. Unter mesopischen und niedrigen photopischen Bedingungen konnte ein Bezug zwischen S/P-Ratio und Fahrleistung hergestellt werden.

Raynham /16/ kommt in seiner Studie zu dem Ergebnis, dass die Grundlagen der Straßenbeleuchtung weitere Untersuchungen benötigen, um besser auf die Bedürfnisse der Verkehrsteilnehmer eingehen zu können. Insbesondere für die Gesichtserkennung fordert er Lichtquellen mit hohen Farbwiedergabeindizes.

Auch die Studie von Fotios et. al. /12/ konnte den spektralen Einfluss auf die Helligkeitswahrnehmung zeigen, wobei der Einfluss des Spektrums auf die Sehleistung keinen eindeutigen Zusammenhang ergab. Es wurde zwischen fovealem und extrafovealem Sehen differenziert, wobei für erstes kein und für letzteres ein Einfluss des Spektrums auf die Sehschärfe und weitere visuelle Funktionen festgestellt wurde.

3.2. Technologie

Die Diskussionen um die LED sind hinreichend bekannt. Nicht selten werden die Vorteile von LED-basierten Beleuchtungssystemen unter dem Aspekt der Energieeffizienz diskutiert. Heutzutage entfallen etwa 20% der globalen elektrischen Energie auf die, über das elektrische Stromnetz betriebene Beleuchtung. Daran ist die Außenbeleuchtung mit einem Anteil von weniger als 2% beteiligt. /17/, /18/
Diese energetische Bilanz zeigt die verhältnismäßig geringe Beteiligung der Außenbeleuchtung am globalen Energiebedarf für Beleuchtungszwecke. Es ist daher nicht ausreichend, die Bewertung von Beleuchtungssystemen auf deren energetische Parameter zu reduzieren /19/. Vielmehr ist ein umfassendes Bewertungsmodell für Beleuchtungssysteme anzuwenden, dass neben der technologischen und wirtschaftlichen Sichtweise auch physiologische und psychologische Komponenten berücksichtigt /17/. Zuwenig oder falsch eingesetztes Licht kann zu unterschiedlichen negativen Auswirkungen führen (hierzu zählen u.a. Sehbeschwerden aufgrund schlechter Beleuchtung, zusätzlicher Lichtbedarf der immer älter werdenden Bevölkerung, Schlafstörungen) und erzeugt dadurch soziale und volkswirtschaftliche Kosten. An dieser Stelle findet der Begriff Lichtqualität seine Berechtigung, der visuelle, energetische, ästhetische sowie ökologische Aspekte vereint und zusätzlich auch biologische Lichtwirkungen berücksichtigt /20/.

Rund ein Drittel der Straßenbeleuchtung in Deutschland ist älter als 20 Jahre und nur etwa 3% werden jährlich erneuert. Ineffiziente Leuchtmitteltechnologien, schlechte Reflektoren und veraltete Leuchten, deren schlechter Wirkungsgrad sich in unnötig hohen Energiekosten und klimawirksamen Emissionen niederschlägt, sind keine Seltenheit. /21/

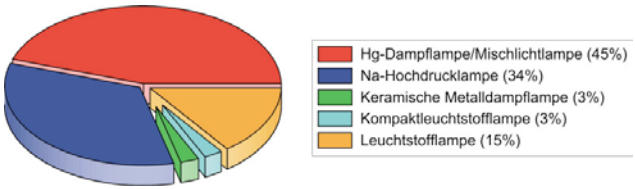


Abb. 1: Anteile verschiedener Lampentechnologien in der Straßenbeleuchtung in Deutschland 2006 (in Anlehnung an /17/).

Die in Abbildung Abb. 1 dargestellte Übersicht zeigt die Anteile verschiedener Lampentechnologien in der Straßenbeleuchtung in Deutschland. Die Quecksilberdampflampe ist mit einer Beteiligung von 45% am stärksten vertreten. Gemäß des Stufenplans der EU dürfen Leuchtmittel dieser Art ab 2011 mit einer Übergangsfrist bis 2015 nicht mehr in den Handel gebracht werden. Wie stark sich die hierdurch frei werdenden Marktanteile bezüglich der Natriumdampfhochdrucklampe und der Metalldampflampe sowie der LED-Technologie in naher Zukunft ändern werden, bleibt abzuwarten.

Zur Erreichung hoher Systemeffizienzen sind die Vorteile der LED-Technologie, wie etwa Dimmbarkeit, hohe Lebensdauer, spektrale Variation und gerichtete Lichtabstrahlung ge-

zielt zu nutzen. Hierzu genügt es nicht, die konventionellen Leuchtmittel bestehender Beleuchtungssysteme durch leistungstechnisch äquivalente LED-Module zu substituieren. Indes sind die einzelnen Komponenten des Gesamtsystems aufeinander abzustimmen und an die Betriebsparameter der LED anzupassen. Beispielhaft seien an dieser Stelle die Entwicklung neuer Optiken, die Bereitstellung eines Wärmemanagements sowie die Einbindung einer Ansteuerungselektronik mit Kommunikationsschnittstellen zu Sensorik und externen Steuerungen genannt.

4. Entwicklung einer LED-Pilotleuchte

Zur Verwirklichung der in Abschnitt 2 genannten Ziele wurde von den Projektpartnern[1] eine LED-Pilotleuchte (Abb. 2) entwickelt. Technisch handelt es sich um ein modulares Leuchtenkonzept, das in der derzeitig höchsten Ausbaustufe einen maximalen Lichtstrom von 24000lm erzielt und aufgrund dieser Leistung bei Mastabständen von bis zu 40m für ME3 Klassen geeignet ist.

Abb. 2: CoLight Pilotleuchte - Leuchtenkopf mit Blick auf die Lightengine (LED-Kassette) [Foto: Jenoptik Polymer Systems GmbH]

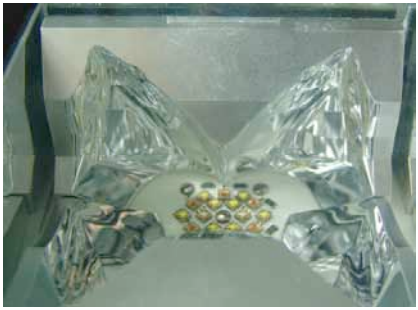


Abb. 3: CoLight Pilotleuchte - Detailansicht eines LED Clusters mit aufgesetzter Optik [Foto: Jenoptik Polymer Systems GmbH]

Um verschiedene Mischspektren zu erreichen, wurde für die Konzeptleuchte ein LED-System bestehend aus drei Primärvalenzen vorgesehen. Die Auswahl geeigneter LEDs orientiert sich an Größe und Lage des zu erzielenden Farbgamuts. Spektrale Restriktionen waren aufgrund fehlender normativer Vorgaben (siehe Abschnitt 1) nicht zu beachten. Zusätzlich wurden bei der Auswahl die Kriterien Beleuchtungsqualität und Energieeffizienz berücksichtigt.
Bei den gewählten Primärvalenzen handelt es sich um eine Abwandlung des klassischen RGB-Systems. Der Farbgamut umschließt einen großen Bereich des Planck'schen Kurvenzuges (Abb. 4), so dass sich eine Vielzahl ähnlichster Farbtemperaturen generieren lassen. Durch das breit ausgefüllte Spektrum der zu erzielenden Mischfarben wird ein hohes Maß an Lichtqualität erzielt. Die Primärvalenzen werden zu sogenannten Clustern kombiniert (Abb. 3), wobei das quantitative Verhältnis der Primärvalenzen innerhalb eines Clusters durch die Größe des zu erzielenden Farbtemperaturbereiches und energetische Betrachtungen bestimmt wird. Je nach verwendeter Clusteranzahl lassen sich die normativen Leuchtdichtevorgaben für jede Straßenklasse erzielen.

[1] Zu den Projektpartner im Verbundprojekt CoLight gehören: dilitronics GmbH (Jena), Fraunhofer Institut für angewandte Optik und Feinmechanik IOF (Jena), Jenoptik Polymer Systems GmbH (Triptis), MAZeT GmbH (Jena), 2K Moxa Lighting GmbH (Moxa), TU Ilmenau - Fachgebiet Lichttechnik (Ilmenau)

Die intelligente Lichtregelung flexibilisiert die sensorgesteuerte LED-Pilotleuchte nicht nur durch die Dimmbarkeit des Beleuchtungsniveaus, sondern auch durch die Umverteilung der Lichtverteilung je nach Wetterlage. Demnach werden Messgrößen wie der Verkehrsfluss, die Helligkeit des Umfeldes und der Nässegrad der Straße von der Sensorik erfasst und zu Steuerdaten verarbeitet.

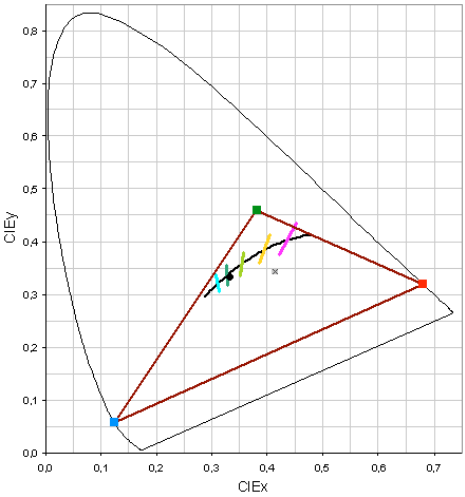


Abb. 4: Darstellung der drei Primärvalenzen und des hierdurch aufgespannten Farbgamuts in der CIE-Normfarbtafel. Der schwarze Punkt repräsentiert den Weißpunkt, das Kreuz die Farbvalenz bei Vollaussteuerung der drei Farbkanäle. [TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik]

4.1. Innovation

Zum gegenwärtigen Stand können konventionelle oder LED-betriebene Straßenleuchten im laufenden Betrieb lediglich den abgegebenen Lichtstrom und somit die Leuchtdichte auf der Straße anpassen. Diese Dynamik folgt in der Regel einer vorprogrammierten zeitlichen Sequenz.
Mit dem in diesem Beitrag beschriebenen Ansatz entstand eine innovative, weil erstmals im laufenden Betrieb zeitlich und örtlich sowie spektral adaptive Straßenleuchte. Das System kann eigenständig verschiedene Umgebungsbedingungen detektieren und in deren Abhängigkeit Helligkeit, Abstrahlverhalten sowie das Spektrum anpassen.
Gegenüber bisherigen Straßenbeleuchtungssystemen ermöglicht diese Konzeptstudie darüber hinaus die bewusste Anwendung von Lichtfarbe in der Straßenbeleuchtung unter Berücksichtigung sicherheitsrelevanter und psychologischer Aspekte.

5. Methodik

Kern der Untersuchungen bildet ein Laboraufbau (Abb. 5), mit dem Sehleistung und Sehkomfort einer Sehaufgabe erhoben und anschließend bewertet werden. Mit diesem Aufbau wurde ein Rahmen geschaffen, um neben normalen auch erschwerte Sehbedingungen reproduzierbar zu simulieren.

Der Proband adaptiert mit Hilfe eines Adaptationsfeldes auf ein zuvor festgelegtes Spektrum bei definierter Leuchtdichte, wobei für jede Kombination aus Adaptationsspektrum und -leuchtdichte jeweils eine Versuchsreihe vorgesehen ist. Die Variation des Adaptationsspektrums orientiert sich dabei an typischen Spektralverteilungen ortsfester Straßenbeleuchtungssysteme. In jeder Versuchsreihe wird dem Probanden für einen kurzen Zeitraum ein achromatisches, quaderförmiges Testzeichen unter verschiedenen Blickwinkeln und Leuchtdichten in zufälliger Reihenfolge präsentiert. Aufgabe des Probanden ist jeweils die Detektion des Objektes, d.h. er gibt an, ob er das Objekt hat sehen können oder nicht. Als Besonderheit sind Versuchsreihen vorgesehen, die mit einer Störgröße überlagert werden. Ziel dieser Störgrößen ist, auch unter Laborbedingungen markante Einflüsse aus der Realität zu berücksichtigen. Hierzu wird einerseits eine Blendquelle verwendet. Andererseits werden erschwerte Sehbedingungen in Form von Regen erzeugt, die das Gesichtsfeld des Probanden mit einem Rauschen belegen.

Für die technische Umsetzung werden Projektoren verwendet, mit denen die Testzeichen auf einer hochwertigen und aselektiven Projektionswand dargestellt werden. Als Blendquellen werden CoLight LED-Module verwendet, für die eigens ein Gehäuse konstruiert wurde, mit dem das Licht gezielt in den Versuchsbereich eingekoppelt werden kann. Hierbei besteht die Möglichkeit, Form und Größe der Einkoppelstelle zu variieren. Ebenso variabel ist die Positionierung der Blendquellen im Gesichtsfeld des Probanden. Die Störgröße Regen wird durch eine Beregnungsanlage umgesetzt, die über zwei separate Wasserlinien verfügt, so dass zwei verschiedene Regenarten simuliert werden können. Die Dimension des Laborstandes ermöglicht einen nutzbaren Sehwinkelbereich von $\pm 24°$ bei nahezu fernakkommodiertem Auge.

Für den koordinierten Ablauf der Versuchsreihen sowie die synchrone Steuerung des Adaptationsfeldes, der Testzeichen und den Störgrößen „Regen“ und „Blendung“ wird eine globale Systeminfrastruktur auf Basis einer Mediensteuerung verwendet. Hiermit lassen sich die zeitkritischen Einblendungen des Testzeichens reproduzierbar realisieren. Vor dem Hintergrund einer höheren Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sowie zur Vermeidung grober Fehler wurde ein teilautomatisierter Ablauf programmiert, wobei der Versuchsleiter eine begleitende Rolle übernimmt.

Abb. 5: Laborstand
[Foto: TU Ilmenau, FG Lichttechnik]

Abb. 6: Teststraße in Ilmenau
[Foto: TU Ilmenau, FG Lichttechnik]

Zur Validierung der im Labor erhobenen Daten werden ausgewählte Versuchsreihen unter realen Bedingungen auf einer Teststraße in Ilmenau (Abb. 6) nachgestellt. Hierzu werden Versuchsreihen bei verschiedenen konventionellen Lichtquellen und der CoLight LED-Pilotleuchte durchgeführt. Ein Probandenkollektiv bewertet die Erkennbarkeit von Sehzei-

chen, die im Bewertungsfeld positioniert werden. Aus den Ergebnissen werden Aussagen zur Sehleistung und zum Sehkomfort abgeleitet. Eine zusätzliche Befragung zur Lichtästhetik, d.h. dem persönlichen Gefallen der verschiedenen dargebotenen Lichtszenarien, rundet die Versuchsreihen im Feld ab, so dass abschließend aus den Ergebnissen zu Sehleistung, Sehkomfort und Gefallen ein ganzheitliches Akzeptanzurteil abgeleitet werden kann.

6. Ergebnisse

Zum Redaktionsschluss dieses Tagungsbandes wurden die Messungen noch nicht abgeschlossen. Die Ergebnisse werden im Vortrag präsentiert.

7. Ausblick

Ein wesentlicher Vorteil der Adaptivität der Parameter Lichtstrom, Lichtverteilung und Lichtfarbe im laufenden Betrieb ist, dass die Leuchte flexibel verwendet werden kann. Der Betreiber braucht daher zukünftig keine unterschiedlichen Leuchtenfamilien mehr zu unterhalten. Mit den genannten Steuerungsmöglichkeiten gehen auch energetische Vorteile und ein Sichtbarkeitsgewinn einher, da sich das Licht gezielt lenken lässt und der abgegebene Lichtstrom innerhalb eines Wartungsintervalls nahezu konstant gehalten und gedimmt werden kann. Die Flexibilität ermöglicht auch den Betrieb in einem sehr effizienten Modus (Stromspar-Modus).
Die Möglichkeit, verschiedene Lichtfarben individuell zu wählen und im Betrieb zu variieren kann zukünftig den Wunsch nach visueller Führung bestärken. So ließen sich beispielsweise Gefahrenbereiche wie Kreuzungen gezielt hervorheben. Da sich mit Lichtfarben auch Emotionen erzeugen lassen, können Stadtbereiche gezielt aufgewertet werden. Die bisher rein funktionale Bedeutung der Straßenbeleuchtung wird zukünftig durch gestalterische Funktionen bereichert. Hierbei sei allerdings darauf hingewiesen, dass die Straßenbeleuchtung selbst nicht als Architekturbeleuchtung zu verstehen ist und auch zukünftig nicht als solche verstanden werden wird, auch nicht dann, wenn Teile des emittierten Lichtes auf Gebäudefassaden fällt.
In erster Linie wird jedoch angestrebt, die Sehleistung und den Sehkomfort des Nutzers zu verbessern, um ein höheres Sicherheitsgefühl und eine verbesserte Verkehrssicherheit bei der nächtlichen Fortbewegung insbesondere auf nasser Straße zu erzielen. Dies erfolgt, indem wahrnehmungsspezifische Zusammenhänge zwischen Licht und Mensch in die Steuerungsalgorithmen einfließen.

Zusammenfassend wird mit der im Verbundprojekt CoLight entwickelten LED-Pilotleuchte erstmalig eine Straßenleuchte bereitgestellt, mit der etwaige Potentiale dynamisch-adaptiver Straßenbeleuchtungssysteme experimentell erforscht werden können. Neben dem in diesem Beitrag beschriebenen Einsatzgebiet auf der Teststraße in Ilmenau wird die Leuchte im Rahmen des Forschungsprojektes „Kommunen im neuen Licht“ auch erstmalig im öffentlichem Raum (Andreasstraße, Erfurt) installiert und erprobt.

8. Literatur

/1/ DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *Straßenbeleuchtung – Gütemerkmale.* DIN EN 13201-2, Berlin: Beuth Verlag, 2003.

/2/ DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *Straßenbeleuchtung – Auswahl der Beleuchtungsklassen.* DIN 13201-1, Berlin: Beuth Verlag, 2004.

/3/ DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *Ortsfeste Verkehrsbeleuchtung.* DIN 5044-1, Berlin: Beuth Verlag, 1981.

/4/ COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE: *Empfehlungen für die Beleuchtung von Strassen für den Kraftfahrzeugverkehr.* CIE Publication 12.2, 1977.

/5/ COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE: *Recommendations for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic.* CIE Publication 115, 1995.

/6/ COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE: *Guide to the lighting of urban areas.* CIE Publication 136, 2000.

/7/ COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE: *Fundamentals of the visual task of night driving.* CIE Publication 100, 1992.

/8/ DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Arbeitsplätze im Freien.* DIN EN 12464-2, Berlin: Beuth Verlag, 2007.

/9/ COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE: *Equations for disability glare.* CIE Publication 146, 2002.

/10/ BULLOUGH JD, REA MS: *Driving in snow: effect of headlamp color at mesopic and photopic light levels.* SAE Technical Paper Series No. 2001-01-0320. Society of Automotive Engineers, 2001.

/11/ VAN CREVELD, K.: *An investigation into the relationship between luminance and brightness of strongly chromatic light sources.* Lighting Research and Technology (1999), 31(3): 117-122.

/12/ FOTIOS S, CHEAL, C, BOYCE PR: *Light source spectrum, brightness perception and visual performance in pedestrian environments: a review.* Lighting Research and Technology (2005), 37(4): 271-294.

/13/ BULLOUGH JD, REA MS: *Simulated driving performance and peripheral detection at mesopic and low photopic light levels.* Lighting Research and Technology (2000); 32(4): 194-198.

/14/ ECKERT M: *Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr.* Berlin, München: Verlag Technik, 1. Auflage 1993.

/15/ LACHENMAYR BJ: *Sehen und gesehen werden: Sicher unterwegs im Straßenverkehr.* Shaker Verlag, 1995. ISBN: 3-8265-0845-9

/16/ RAYNHAM P: *An examination of the fundamentals of road lighting for pedestrians and drivers*. Lighting Research and Technology (2004) 36: 307.

/17/ KHANH TQ, SPRUTE JH: *LED-Technologie für eine energieeffiziente und normgerechte Straßenbeleuchtung.* In: VDI-Berichte Nr.2059, 2008.

/18/ INTERNATIONAL ENERGY AGENCY: *Lights labours lost: Policies for energy-efficient lighting.* OECD/IEA, 2006.

/19/ ECKERT M, MESEBERG H-H: *Straßenbeleuchtung und Sicherheit.* LiTG-Publikation Nr. 17. 1998.

/20/ BIESKE K: *Über die Wahrnehmung von Lichtfarbenänderungen zur Entwicklung dynamischer Beleuchtungssysteme.* Dissertation, TU Ilmenau, 2010.

/21/ BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT: *Lichter aus für den Klimaschutz?* 2007.

/22/ WALKLING A: *Schlechtwetter-optimierte LED-Straßenbeleuchtung zur Verbesserung der Sehsicherheit.* Tagunsgband Licht 2012.

Untersuchungen zu Reflexionseigenschaften von Straßendeckschichten

Christoph Schulze, TU Dresden, Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr

1. Problemstellung

Berechnungen im Rahmen der Leuchtdichtetechnik in der Straßenbeleuchtung sind auf die Kenntnis der Reflexionseigenschaften der Straßenoberfläche (Deckschicht) zwingend angewiesen. Dies betrifft im Wesentlichen die ME/MEW-Klassen gemäß EN 13201-2 (im Folgenden ausschließlich Betrachtung trockener Straßenoberflächen) und Tunnelbeleuchtungsanlagen für den fließenden Fahrzeugverkehr (z.B. DIN 67524). Die angepasste Dimensionierung des Reflexionsvermögens von Straßenoberflächen birgt zudem ein bedeutsames Potential zur Energieeinsparung und damit Effizienzsteigerung in den auf Leuchtdichte ausgelegten Anlagen. Darüber hinaus können wissenschaftliche und straßenbaupraktische Betrachtungen zu möglichen Auswirkungen der Deckschichtreflexion nur auf Basis belastbarer Kennwerte erfolgen. Für alle die angesprochenen Betrachtungen sind praktikable und potentiell mobile Messverfahren notwendig.

Die vollständige Beschreibung der Deckschichtreflexion ist aufwändig, im Rahmen der Leuchtdichtetechnik jedoch zwingend notwendig. Die dafür verwendeten r-Tabellen enthalten Leuchtdichtekoeffizienten für eine Vielzahl von Beleuchtungsrichtungen. Deren vollständige Erhebung ist für die meisten Beleuchtungsplanungen unter Aufwandsgesichtspunkten nicht sinnvoll. Vielmehr erfolgen Planungen unter Verwendung von Standard-r-Tabellen, die in ihrer räumlichen Form der Reflexion anhand des Spiegelverhaltens (S1) ausgewählt werden. Neben der räumlichen Form der Reflexion ist jedoch auch deren mittlerer Betrag zu berücksichtigen. Der zugehörige Kennwert ist der mittlere Leuchtdichtekoeffizient q0. Gemäß CIE-Definition benötigt die messtechnische Bestimmung von q0 die Ermittlung nahezu der vollständigen r-Tabelle (CIE, 1990). Daher werden seit längerem Bemühungen unternommen, q0 näherungsweise zu bestimmen. Diese Bemühungen sind auch vor dem Hintergrund der mobilen Messung von Reflexionseigenschaften von Straßendeckschichten einzuordnen.

In der Literatur finden sich dazu zwei wesentliche Ansätze. Der Erste beinhaltet die Konstruktion einer vollständigen r-Tabelle aus einer überschaubaren Anzahl von Stützwerten und die Kalkulation von q0 aus dieser. Daher soll dieser Ansatz im Folgenden als indirekte Näherung für die Ermittlung von q0 bezeichnet werden. Einen umfangreichen Ansatz dazu lieferten in jüngerer Zeit Debergh & Embrechts (2008), hierzu sind auch die darauf fußenden mobilen Messgeräte „Coluroute“ und „Memphis“ zu betrachten (vgl. z.B. Muzet u.a., 2008 sowie Laurent, 2008). Debergh & Embrechts (2008) berichten für die mehrere Extrapolationen umfassenden Konstruktionen der r-Tabellen bei Untersuchung von 12 Deckschichtproben für die genannten Geräte eine mittlere Abweichung der konstruierten r-Tabellen von den vollständig im Labor erfassten Werten von 12,9% („Coluroute“) bzw. 17,8% („Memphis“). Für die Genauigkeit der q0-Kalkulation werden mittlere Abweichungen vom Laborwert von 3,7% („Coluroute“) bzw. 10,4% („Memphis“) angegeben. Für das Coluroute-Gerät belegen Muzet u.a. (2008) für die messungsbasierte Kalkulation von q0 bei 27 Deckschichtproben mittlere Abweichungen von 7% vom im Labor ermittelten Wert für q0, wobei der relative q0-Fehler bei 85% der Proben unterhalb von 10% und bei neun von zehn Proben unterhalb von 15% liegt.

Der zweite Ansatz nutzt die direkte regressive Näherung von q0 aus einzelnen gemessenen Leuchtdichtekoeffizienten verschiedener Beleuchtungswinkelkombinationen und wird daher im Folgenden als direkte Näherung bezeichnet (z.B. Demides, 2008). Dieser Autor berichtet für seine Näherungslösung auf Basis von 244 r-Tabellen eine mittlere Abweichung des genäherten q0-Wertes vom exakten Wert von 3,7%. Eine Überprüfung anhand von Messungen an Proben, die nicht Teil der

Regressionsentwicklung waren, wird nicht berichtet. Der direkten regressiven Näherung entspricht auch das in Deutschland von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen empfohlene Vorgehen (FGSV, 2010; FGSV, 1986). Es fußt auf den Arbeiten von Range (Range, 1969; Range, 1972; Range 1973a; Range, 1973b; Range, 1986), der teilweise auf die Veröffentlichungen von Burghout zum korrelativen Zusammenhang zwischen Reflexionskennwerten zurückgreift (Burghout, 1975; Burghout, 1979).
Für diese heute gemäß Empfehlung der FGSV in der Verwendung befindliche Näherungsberechnung sind in der Literatur keine Angaben zur Güte der Näherung im Verhältnis zum q0 gemäß exakter CIE-Kalkulation (CIE, 1990) verfügbar. Da jedoch Beleuchtungsplanungen ausschließlich auf das von der CIE definierte q0 und die daran skalierten Standard-r-Tabellen referenzieren, sind Erkenntnisse zur Güte der näherungsweisen q0-Bestimmung für die Einschätzung der Genauigkeit der Leuchtdichteberechnung interessant.
Darüber hinaus verfolgt der vorliegende Beitrag eine weitere Zielstellung. Wie oben kurz umschrieben, sind unter Aufwandsgesichtspunkten näherungsweise Bestimmungen von q0 praktisch unumgänglich. Die Kalkulation einer gesamten r-Tabelle aus wenigen Stützwerten (indirekte Näherung) geht verglichen mit bekannten direkten Näherungen für q0 mit einem vergleichsweise höheren Messaufwand einher. Dieser resultiert wesentlich aus der Anzahl notwendiger Stützwerte, die anhand einer entsprechenden Messeinrichtung realisiert werden müssen. Ein wesentlicher Vorteil der direkten Näherung ist somit die potentiell sparsamere Messung, die für eine Verwendung in einem mobilen Messgerät geeignet erscheint. Daher sollen nachfolgend auch vergleichende Betrachtungen zu regressiven Näherungsansätzen für die hier als direkte Näherung bezeichnete Bestimmung von q0 erfolgen.

2. Theoretischer Hintergrund

Den Reflexionseigenschaften von Deckschichten kommt in der Leuchtdichtetechnik in der Straßen- und Tunnelbeleuchtung eine herausragende Rolle zu.

$$L_P = \Phi \cdot \left(\frac{I}{\Phi}\right)_{C,\gamma} \cdot \left(\frac{L}{\mathrm{E}}\right)_{\beta,\gamma} \cdot \frac{cos^3\gamma}{h^2} \cdot \Omega_0 = \frac{\mathrm{I_{C,\gamma}}}{\mathrm{h^2}} \cdot \Omega_0 \cdot \mathrm{r_{\beta,\gamma}} \quad \text{mit} \quad r_{\beta,\gamma} = \left(\frac{L}{\mathrm{E}}\right)_{\beta,\gamma} \cdot cos^3\gamma$$

Abb. 1: Berechnungsverfahren der Leuchtdichtetechnik, z.B. Baer (2006) oder EN 13201-3

In diesem Zusammenhang erfolgt die grundlegende Definition des allgemeinen Leuchtdichtekoeffizienten q als Verhältnis von resultierender Leuchtdichte $L_P(\alpha, \beta, \gamma)$ zur aufgebrachten Beleuchtungsstärke $E_P(\beta, \gamma)$. Als Beobachtungswinkel α wird in der Straßenbeleuchtung allgemein der Wert α=1° gegenüber der Straßenoberflächenhorizontalen vereinbart. Die Winkel β und γ charakterisieren die vertikale und horizontale Beleuchtungsgeometrie. Der Wert r(β, γ) bezeichnet reduzierte Leuchtdichtekoeffizienten.
Der oben dargestellte Berechnungszusammenhang illustriert den direkten Einfluss der Reflexionseigenschaften in Form des Leuchtdichtekoeffizienten der Deckschicht auf die Anlagendimensionierung. Wie die multiplikative Verknüpfung zeigt, folgt bei festgesetzter (zu dimensionierender) Leuchtdichte die auf die Oberfläche aufzubringende Beleuchtungsstärke proportional der Höhe des Leuchtdichtekoeffizienten. Unsicherheiten in der Bestimmung bzw. Beschreibung der Reflexionseigenschaften wirken sich somit linear auf die resultierende Güte der kalkulierten Leuchtdichte aus.
In diesem Zusammenhang ist auch die große Bedeutung der Reflexionseigenschaften für die Effizienz von leuchtdichtedimensionierten Straßenbeleuchtungsanlagen begründet. Bei konstanter Leuchtdichte kann die zu erzeugende Beleuchtungsstärke im direkten

Verhältnis zur Erhöhung des Reflexionsverhaltens der Oberfläche abgesenkt werden, womit erhebliche Kostenersparnisse in Errichtung und Betrieb verbunden sein können.
Wie der Winkelbezug in oben aufgeführter Formel illustriert, unterscheiden sich die Leuchtdichtekoeffizienten in Abhängigkeit der Beleuchtungsgeometrie. Die vollständige Beschreibung der Reflexionseigenschaften erfolgt für Berechnungszwecke in der Außenbeleuchtung daher anhand von r-Tabellen. Sie enthalten 396 reduzierte Leuchtdichtekoeffizienten im Winkelbereich 0°≤β≤180° und 0°≤γ≤85,2° (vgl. z.B. CIE, 1990). Sie können anhand der zentralen Kennwerte Spiegelfaktor S1 und mittlerer Leuchtdichtekoeffizient q0 charakterisiert werden.
Die Kalkulation des Spiegelfaktors S1 erfordert lediglich die Kenntnis der beiden reduzierten Leuchtdichtekoeffizienten r(β=0°, γ=0°)=r(0;0) und r(β=0°, γ=63,4°)=r(0;63,4). Insofern Messungen zur Beschreibung der Reflexionseigenschaften von Straßendeckschichten vorgenommen werden, ist die definitionsgemäße Bestimmung von S1 und damit der zugehörigen Standardreflexionsklasse prinzipiell recht aufwandsarm. Die gemäß CIE definitionsgemäße Berechnung des mittleren Leuchtdichtekoeffizienten q0 erfordert hingegen die Ermittlung nahezu der gesamten r-Tabelle (355 von 396 Werten), aus deren Werten q0 als ein beleuchtungs- und raumwinkelgewichtetes Mittel errechnet wird (vgl. z.B. CIE, 1990).
Die näherungsweise Bestimmung von q0 nach dem Verfahren FGSV/Range (FGSV, 2010; FGSV, 1986) erfordert lediglich die messtechnische Bestimmung der beiden auch für die S1-Berechnung notwendigen Leuchtdichtekoeffizienten q(β=0°, γ=0°) und q(β=0°, γ=63,4°). Das Näherungsverfahren nach Demirdes (Demirdes, 2008) erfordert für die q0-Kalkulation mit r(β=0°, γ=63,4°) und r(β=90°, γ=63,4°) auch zwei reduzierte Leuchtdichtekoeffizienten als Eingangswerte, erlaubt jedoch damit nicht die Berechnung von S1 und die Einordnung in eine Standarddeckschicht, so dass als Grundlage für Leuchtdichteberechnungen mit r(β=0°, γ=0°) ein dritter Wert erhoben werden müsste.

$$q_{0,FGSV} = 0{,}22 \cdot \cos(63{,}4°) \cdot q_{0;63{,}4} + 1{,}06 \cdot q_{0;0}$$

$$q_{0,Demirdes} = 1{,}023 \cdot q_0^{'} + 0{,}006 \quad \text{mit} \quad q_0^{'} = 10{,}304 \cdot \left[r_{90;63{,}4} + 0{,}085 \cdot r_{0;63{,}4}\right]$$

Abb. 2: Berechnungsvorschriften für die näherungsweise Bestimmung von q0 gemäß FGSV (2010) und Demirdes (2008)

3. Messmethodik und Stichprobe

Zur Untersuchung der oben umrissenen Fragestellung erfolgten Messungen an Deckschichtproben gemäß CIE-Vorschrift (CIE, 1990) im Labor unter kontrollierten lichttechnischen und klimatischen (konstante Raumtemperatur T=21°C) Bedingungen. Dabei wurde die direkte messtechnische Bestimmung der für die gesamte r-Tabelle notwendigen Leuchtdichtekoeffizienten unter Verwendung von Messgeräten hoher Genauigkeit (Fehlerklasse A gemäß DIN 5032-7) realisiert. Die Positionierung der Beleuchtungswinkel erfolgte reproduzierbar und automatisiert anhand eines Goniometers mit einer Genauigkeit von einem Zehntelgrad. In diesem Genauigkeitsbereich bewegen sich auch die Positionierung des Leuchtdichtemessgerätes und die Orientierung der Probenoberfläche relativ zur Messanordnung. Die Schwankung des Lichtstromes der Beleuchtung über den Verlauf einer Messung beträgt weniger als 0,5%.
Für die nachfolgend vorgestellten Auswertungen wurden die vollständigen r-Tabellen von insgesamt N=105 Deckschichtproben (Bereich 0,03≤q0≤0,11cd/(m²·lx) und 0,1≤S1≤8,1) ermittelt. Die Gesamtstichprobe setzt sich aus zwei Teilstichproben zusammen. Bei der ersten Teilstichprobe mit N=58 Proben handelt es sich überwiegend um Deckschichtprobekörper, die im straßenbautechnischen Labor für Zwecke der Eignungsprüfung der Mischgutrezeptur unter lichttechnischen Gesichtspunkten hergestellt wurden. Sie entsprechen in ihrer Zusammensetzung heute im Straßenbau typischen Deckschichten und haben mehrheitlich eine künstliche Beanspruchung der Oberfläche

mittels Glasperlenstrahlen erfahren. Das Glasperlenstrahlen dient der Entfernung der durch die Herstellung entstandenen oberflächlichen Bitumenüberlagerung der Gesteinskörnungen (FGSV, 2010). Die zweite Teilstichprobe besteht aus N=47 Bohrkernproben, die aus verschiedenen Straßen in Deutschland nach mehrjähriger Liegezeit entnommen und in dieser vorgefundenen Form vermessen wurden.

Abb. 3: Beispiele untersuchter Straßendeckschichten

Die vollständigen r-Tabellen beinhalten sämtliche für alle betrachteten Näherungslösungen notwendigen Eingangswerte. Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse illustrieren somit ausschließlich die theoretische Seite der Näherung. Praktische Aspekte wie Messabweichungen verschiedener Messaufbauten und Einflüsse aus der Repräsentativität und Homogenität des gewählten Messausschnittes einer Straßenoberflächen müssen gesondert und zusätzlich zu den unten berichteten Ergebnissen betrachtet werden.

4. Näherungsgüte der Ansätze nach FGSV und Demirdes

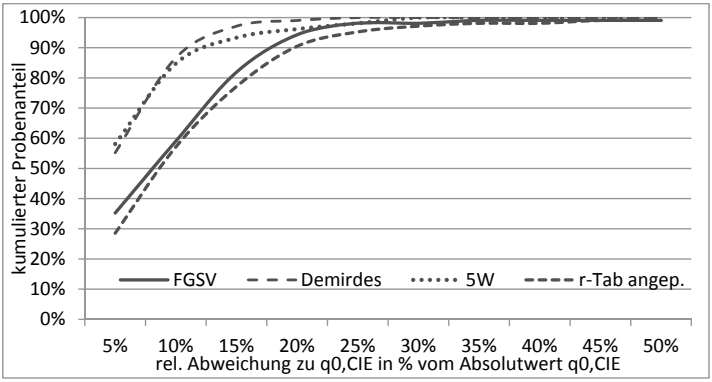


Abb. 4: Kumulierte relative Abweichung der Näherungslösungen für N=105 Straßendeckschichtproben („5W“ und „r-Tab angep.“: siehe nächstes Kapitel)

Im Näherungsansatz nach FGSV zeigen drei von vier Proben eine Abweichung von höchstens 15% vom gemäß CIE-Verfahren exakt bestimmten q0-Wert. Dies bedeutet aber auch, dass bei jeder vierten Probe der kalkulierte Wert für q0 um 20% oder mehr vom tatsächlich vorliegenden Wert abweicht. Der mittlere relative Fehler der q0-Schätzung über alle 105 Proben betrug 9,0%. Es zeigten sich bei allen Ansätzen nur geringe Unterschiede der Näherungsgüte zwischen Labor- und Bohrkernproben, wobei bei den Bohrkernproben überwiegend eine etwas höhere Näherungsgüte erreicht wird.
Der Ansatz von Demirdes zeichnet sich durch eine hohe Näherungsgüte aus. Nahezu 9 von 10 Proben weisen einen Fehler von höchstens 10% auf. Abweichungen oberhalb 15% vom exakten q0-Wert kommen lediglich bei 3 von 100 Proben vor. Der mittlere relative Fehler der q0-Schätzung über alle 105 Proben betrug 5,3% und ist somit in dieser Prüfstichprobe für den Ansatz etwas höher als die vom Autor angegeben 3,7% für die Entwicklungsstichprobe. Die gegenüber dem Ansatz FGSV/Range höhere Näherungsgüte

dürfte maßgeblich durch den engen Zusammenhang zwischen q0 und dem reduzierten Leuchtdichtekoeffizienten bei seitlicher Anleuchtung (β=90°/γ=63,4°) begründet sein. Bei seitlicher Anleuchtung werden die diffusen Reflexionsanteile der Gesamtverteilung offensichtlich gut charakterisiert.
Diese Ergebnisse zeigen, dass die regressive Näherung von q0 unter bestimmten Randbedingungen sehr gute Werte annehmen kann. Die heute in den lichttechnisch qualifizierten Straßenbaulaboratorien verfügbare Messanordnung ist jedoch nur zur Realisierung der Näherung nach FGSV/Range ausgelegt und erlaubt die Bestimmung der Leuchtdichtekoeffizienten außerhalb der Ebene β=0°/180° nicht. Vor diesem Hintergrund wurden Betrachtungen angestellt, bis zu welchem Grad und bei welchem Aufwand Verbesserungen der Näherungsgüte für q0 bei Messung von Leuchtdichtekoeffizienten ausschließlich in der Beobachtungsebene möglich sind.

5. Prüfung weiterer Methoden zur Näherung von q0

Hierzu wurden zwei prinzipielle Ansätze verfolgt. Der erste Ansatz umfasste die direkte Näherung aufgrund zusätzlicher Leuchtdichtekoeffizienten im Winkelbereich β=0°/180° und 0°≤γ≤65°. Der zweite Ansatz kann als adaptierte indirekte Näherungslösung beschrieben werden. Die mathematische Kalkulation genäherter r-Tabellen erfordert eine Vielzahl von Leuchtdichtekoeffizienten verschiedenster Beleuchtungsrichtungen (Debergh & Embrechts, 2008), die in den umschriebenen Messgrenzen natürlich nicht realisierbar sind. Der zweite Ansatz verfolgte daher den Versuch, die bekannten CIE-Standardreflexionstabellen (C1/C2 bzw. R1 bis R4) anhand aus der Messung im benannten Bereich bestimmter reduzierter Leuchtdichtekoeffizienten zu modifizieren und die Berechnung von q0 anschließend gemäß CIE-Verfahren auf Basis der so angepassten r-Tabelle auszuführen.

5.1 Ansatz erweiterter direkter Näherung

Die Entwicklung und Prüfung erweiterter direkter Näherungsansätze erfolgte weitestgehend anhand der oben beschriebenen ersten Teilstichprobe mit N=58 Deckschichtproben. Diese wurde dafür zusätzlich in eine Entwicklungs- und eine Prüfstichprobe unterteilt. Im Verfahren nach FGSV sowie zur Bestimmung von S1 sind die Leuchtdichtekoeffizienten q(0; 0) und q(0; 63,4) zu erheben und wurden daher beibehalten. Um potentielle zusätzliche Eingangswerte für die Regression zu ermitteln, wurden die 15 weiteren in der r-Tabelle im Bereich β=0°/180° und 0°≤γ≤65° definierten Leuchtdichtekoeffizienten mit dem Näherungsfehler korreliert, der bei Regression auf q0 unter Verwendung der beiden Eingangswerte q(0; 0) und q(0; 63,4) verbleibt. Wie detaillierte Analysen zeigten, ergaben sich bedeutsame Abhängigkeiten von der räumlichen Form der Reflexion.
Für weniger gerichtet reflektierende Beläge (Standardreflexionsklasse C1) sind die Bereiche β=180° stärker zu berücksichtigen als bei mehr gerichtet reflektierenden Belägen der Standardreflexionsklasse C2. Entsprechend wurden für diese beiden Deckschichtarten getrennte regressive Ansätze angepasst, wodurch sich die Gesamtnäherungsgüte deutlich verbessern ließ. Nach umfangreichen Variantenuntersuchungen regressiver Ansätze konnte eine Näherungsgüte erreicht werden, die sich signifikant oberhalb derjenigen des Ansatzes FGSV/Range bewegt, diejenige des zudem deutlich sparsameren Ansatzes von Demirdes jedoch nicht vollständig erreicht. Bei 85% der untersuchten Proben liegt die relative Abweichung des errechneten q0 zum exakten q0 bei höchstens 10%. Nur jede 14. Probe zeigt relative Abweichungen oberhalb von 15%. Der mittlere relative Fehler der q0-Schätzung über alle 105 Proben, die zu ca. zwei Dritteln eine Prüfstichprobe für die Regressionslösung darstellen, betrug 5,8%. Die Modellparameter der besten ermittelten Lösung (als Modell „5W“ bezeichnet, vgl. Abbildung oben) sind nachfolgend dargestellt, die Fehlerverteilung ist im Diagramm oben abzulesen.

	Schnittpunkt	Faktor $q_{(0;0)}$	Faktor $q_{(0;63,4)}$	Faktor $q_{(180;45)}$	Faktor $q_{(180;51,3)}$	Faktor $q_{(180;63,4)}$
C1	0,0059	0,167	0,10	0	1,10	-0,40
C2	0,0220	0,108	0,07	0,44	0	0

Tab. 1: Regressionslösung der direkten Näherung "5W" zur Berechnung von q0 unter ausschließlicher Verwendung von Leuchtdichtekoeffizienten der Bereiche β=0°/β=180° und γ≤65° getrennt nach Standarddeckschicht C1 bzw. C2

5.2 Ansatz adaptierter indirekter Näherung

Auch die Betrachtungen unter Verwendung angepasster Standard-r-Tabellen erfolgten in mehreren Näherungsschritten. In einem sparsamen ersten Versuch wurden als Eingangsinformation lediglich S1 und der reduzierte Leuchtdichtekoeffizient bei senkrechter Beleuchtung r(β=0°/γ=0°) verwendet. S1 diente zur Auswahl der entsprechenden Standard-R-Klasse. Alle darin tabellierten r-Werte wurden dann insgesamt im Verhältnis des gemessenen r_m(β=0°/γ=0°) zum entsprechenden tabellierten Wert r_{Tab}(β=0°/γ=0°) skaliert. Anschließend erfolgte die Berechnung von q0 gemäß der CIE-Rechenvorschrift auf Basis der gesamten r-Tabelle. Es ergab sich insgesamt eine mäßige Näherungsgüte. Bei lediglich 60% der Proben betrug die relative Abweichung zum exakten q0-Wert 15% oder weniger. Jede fünfte Probe wies einen Näherungsfehler von 25% oder mehr auf. Der mittlere relative Fehler der q0-Schätzung über alle 105 Proben betrug 17%.

Daher wurde in einem zweiten Schritt eine zusätzliche Skalierung der standardisierten r-Tabellen vorgenommen. Als zusätzliche Eingangsinformationen wurden die beiden reduzierten Leuchtdichtekoeffizienten r(β=0°/γ=63,4°) und r(β=180°/γ=63,4°) verwendet. Als Standardreflexionstafeln dienten dabei die C-Klassen (C1/C2). Nach Auswahl der anhand S1 zugeordneten Standard-C-Tabelle wurde diese zunächst insgesamt in allen Werten wie oben im Verhältnis des gemessenen r_m(β=0°/γ=0°) zum entsprechenden tabellierten Wert r_{Tab}(β=0°/γ=0°) skaliert. Anschließend erfolgten zwei weitere Skalierungen. Alle r-Werte im Bereich 0°≤β≤90° wurden (mit Ausnahme von r(β=0°/γ=0°)) zusätzlich anhand des Verhältnisses des gemessenen r_m(β=0°/γ=63,4°) zum entsprechenden tabellierten Wert r_{Tab}(β=0°/γ=63,4°) skaliert. Anschließend wurden alle r-Werte im Bereich 90°<β≤180° anhand des Verhältnisses des gemessenen r_m(β=180°/γ=63,4°) zum entsprechenden tabellierten Wert r_{Tab}(β=180°/γ=63,4°) skaliert. Schließlich erfolgte die Berechnung von q0 gemäß der CIE-Rechenvorschrift auf Basis der gesamten r-Tabelle. Die Näherungsgüte stieg mit einem mittleren relativen Fehler der q0-Schätzung von 13,8% etwas, jedoch nicht sehr deutlich an.

In einem dritten Versuch erfolgten die Berechnungen unter Verwendung der zum zweiten Ansatz identischen Eingangsinformationen. Als Skalierungsgrundlage wurden jedoch wie im ersten Versuch die vier Standard-R-Tabellen anstatt der zwei Standard-C-Tabellen verwendet. Zusätzlich zum oben im zweiten Schritt (C-Klasse, dreifache Skalierung) beschriebenen Vorgehen, wurden vorher die tabellierten r-Werte der Standardreflexionstafeln R1 bis R4 auch in ihrer relativen Form verändert. Als Eingangsinformation dazu diente der S1-Wert der Probe. War dieser kleiner oder gleich dem S1-Wert der Standardreflexionstafel R1 ($S1_{R1}$=0,247) bzw. gleich oder größer dem entsprechenden Wert der R4-Tafel ($S1_{R4}$=1,549), erfolgte ein Vorgehen identisch wie oben unter Schritt 2 beschrieben. In allen anderen Fällen wurden die Standardreflexionstafeln vor dem dort beschriebenen Verfahren in ihrer räumlichen Form im Verhältnis des S1-Wertes der Probe zum S1-Wert der zugehörigen und nächstbenachbarten Standard-R-Klasse gewichtet gemittelt. Dafür wurden die beiden R-Tabellen auf identische q0-Werte skaliert. Anschließend wurde für jede Tabellenzelle ein neuer r-Wert als gewichtetes Mittel der beiden beteiligten r-Werte errechnet. Die Gewichtung erfolgte anhand des Abstandsverhältnisses zwischen dem S1-Wert der Probe zu den Standard-S1-Werten der

beiden beteiligten Standard-R-Tabellen. Ausgehend von dieser in ihrer Form adaptierten Standard-R-Tabelle erfolgten die im vorherigen Abschnitt beschriebene dreifache Skalierung und anschließend die Berechnung von q0. Insgesamt ergab sich durch dieses Vorgehen eine spürbare Verbesserung der Näherungsgüte. Bei drei von vier Proben weist das so kalkulierte q0, bezogen auf das exakte q0 einen relativen Fehler von höchstens 15% auf, bei 90% der Proben ist dieser Fehler 20% oder geringer. Der mittlere relative Fehler der q0-Schätzung über alle 105 Proben betrug 10,9%.

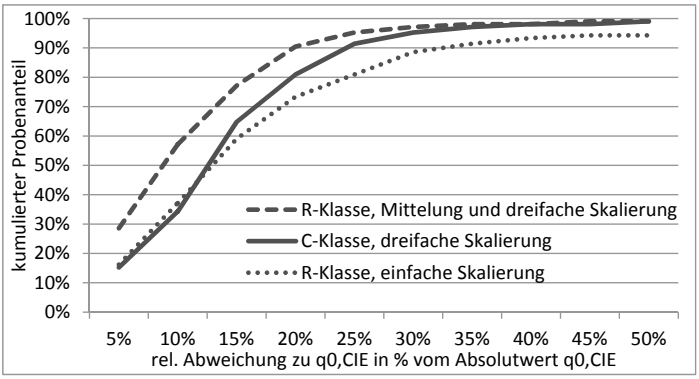


Abb. 5: Kumulierte relative Abweichung der Näherungslösungen auf Basis skalierter Standard-r-Tabellen für N=105 Straßendeckschichtproben

Damit erreicht der beste der adaptiert-indirekten Ansätze eine Näherungsgüte knapp unterhalb derjenigen des direkten Näherungsverfahrens nach FGSV, ist jedoch weit von der Güte der beiden oben vorgestellten regressiven Verfahren nach Demirdes bzw. dem Modell „5W“ entfernt (vgl. Kurve „r-Tab angep.“ im Diagramm Kap. 4).

6. Fazit

Die erreichbare Güte regressiver Verfahren zur direkten Näherung von q0 ist relativ hoch und vor dem Hintergrund der darüber hinaus zu berücksichtigen messpraktischen und planerischen Unsicherheiten im Rahmen der Leuchtdichtetechnik als ausreichend anzusehen. Die Näherungsgüte hängt jedoch von der Aussagekräftigkeit der Eingangsparameter ab. Sehr hohe Näherungsgüten sind nur durch belastbare Eingangswerte zu erzielen. Für Straßendeckschichten bedeutet das vor dem Hintergrund der q0-Bestimmung, dass für sehr gute Näherungsgüten bei geringer Anzahl von Eingangswerten auch Messwerte außerhalb der Beobachtungsachse β=0°/180° hinzugenommen werden müssen. Sobald aus messpraktischen Erwägungen heraus direkte Näherungen ausschließlich auf Leuchtdichtekoeffizienten innerhalb der Beobachtungsachse bezogen werden, sinkt die erreichbare Näherungsgüte und der Messaufwand vergrößert sich.
Auch der Ansatz einer indirekten Näherung auf Basis weniger Messwerte in der Achse β=0°/180° bringt keine bedeutsamen Verbesserungen. Die Berechnung von q0 anhand grob angepasster Standard-r-Tabellen erzeugt verglichen mit Ansätzen der direkten Näherung keine angemessenen Ergebnisse.
Für die sparsame mobile Kalkulation von q0 auf Straßen unter realen Bedingungen sollten daher Abschätzungen vor dem Hintergrund der zu erreichenden Näherungsgüte, auch im Zusammenhang mit der erzielbaren Messgenauigkeit erfolgen. Besteht die Messaufgabe ausschließlich im Ermitteln der Kennwerte q0 und Spiegelparameter S1, um Einordnungen in eine Standardreflexionsklasse und daran angelehnte beleuchtungstechnische

Berechnungen vorzunehmen, kann ohne Genauigkeitsnachteile auch Ansätzen zur direkten Näherung der Vorzug gegeben werden.

Literatur

Baer, R. (2006): Beleuchtungstechnik. Berlin: huss.

Burghout, F. (1975): State-of-the-art-report with regard to a new proposal for two independent parameters to characterize and to classify reflection indicatrices of dry road surfaces. Arnhem: N. V. KEMA.

Burghout, F. (1979): Proposal for a new parameter system for the description of reflection properties of road surfaces. Arnhem: Stichting Studie Centrum Wegenbouw.

CIE. (1990): Calculation and Measurement of Luminance and Illuminance in Road Lighting. Wien: Internationale Beleuchtungskommission.

Debergh, N., & Embrechts, J. (2008): Mathematical modelling of reduced luminance coefficients for dry road surfaces. Lighting Res. Technol. (40), S. 243-256.

Demirdes, H. (2008): A simple method for easy determination of the average luminance coefficient q0 of road surfaces in road lighting. International Symposium on road surface photometric characterisations. Torino: Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica.

DIN 67524-1. (2008): Beleuchtung von Straßentunneln und Unterführungen – Teil 1: Allgemeine Gütemerkmale und Richtwerte. Berlin: Beuth Verlag.

EN 13201-2 (2004): Straßenbeleuchtung-Teil 2: Gütemerkmale. Berlin: Beuth Verlag.

EN 13201-3 (2004): Straßenbeleuchtung-Teil 3: Berechnung der Gütemerkmale. Berlin: Beuth Verlag.

FGSV (1986): Anleitung zur Prüfung lichttechnischer Eigenschaften von Fahrbahnoberflächen und Mineralstoffen mit dem Straßenreflektometer. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.

FGSV. (2010): Arbeitspapier Reflexionseigenschaften von Gesteinskörnungen und Oberflächen aus Asphalt. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.

Laurent, M. (2008): Characterization of Road Surfaces using a Mobile Gonio-reflectometer. International Symposium on road surface photometric characterisations. Torino: Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica.

Muzet, V., Paumier, J.-L., & Guillard, Y. (2008): COLUROUTE: a mobile gonio-reflectometer to characterize the road surface photometry. International Symposium on road surface photometric characterisations. Torino: Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica.

Range, H. D. (1969): Ein einfaches Verfahren zur Klassifizierung von Fahrbahnbelägen für die Leuchtdichteberechnung in der Straßenbeleuchtung. Lichttechnik (3), S. 32A-34A.

Range, H. D. (1972): Ein vereinfachtes Verfahren zur lichttechnischen Kennzeichnung von Fahrbahnbelägen. Lichttechnik (12), S. 608-610.

Range, H. D. (1973a): Vereinfachte Bestimmung der lichttechnischen Eigenschaften von Straßendecken. Straßenverkehrstechnik (2), S. 42-45.

Range, H. D. (1973b): Ein Straßenreflektometer zur vereinfachten Bestimmung der lichttechnischen Eigenschaften von Fahrbahnbelägen. Lichttechnik (8), S. 389-391.

Range, H. D. (1986): Helle bituminoese Fahrbahndeckschichten. Bedeutung und messtechnische Bestimmung ihrer lichttechnischen Eigenschaften. Licht (3), S. 224-229.

Neufassung DIN 67523 zur Beleuchtung von Fußgängerüberwegen – neue Anforderungen an konventionelle und LED Leuchten

Dr.-Ing. Jan Reinhardt,
Philips Lighting
Professional Lighting Solutions
Lübeckertordamm 5
20099 Hamburg

jan.reinhardt@philips.com

Einleitung

Die Norm DIN 67523, Teil 1, definiert die Gütekriterien der Beleuchtung von Fußgängerüberwegen (FGÜs), macht Vorgaben, wann eine Zusatzbeleuchtung notwendig wird, und liefert außerdem Details zur technischen Ausführung. Teil 2 bestimmt Berechnung und Messung

Die Voraussetzungen für die Errichtung von Fußgängerüberwegen regelt die Richtlinie für die Anlage und Ausstattung von Fußgängerüberwegen (R-FGÜ 2001) /Lit.L5/

Im Juni 2010 löste in Deutschland die Neufassung der DIN 67523 /Lit. 1 und 3/ die vorherige Norm zur Beleuchtung von Fußgängerüberwegen aus dem Jahr 1988 ab /Lit. 2 und 4/.

Die wesentlichen Änderungen beim Übergang auf die Neufassung von 2010 sind:

- Umstellung der Gütekriterien von Nennwerten auf Wartungswerte in Anlehnung an DIN EN 13201-2 /Lit. 7/
- Festlegung eines Mindestwertes der vertikalen Beleuchtungsstärke auf der Querungsachse für FGÜs ohne Zusatzbeleuchtung
- Definition der Blendungsbegrenzung entsprechend den Lichtstärkeklassen nach DIN EN 13201-2 statt nach den KB Klassen gemäß DIN 5044-1 /Lit. 10/

1 Dimensionierung von Fußgängerüberwegen nach DIN 67523

1.1 Dimensionierung Fußgängerüberwege mit Zusatzbeleuchtung Stand 1988

Bis 2010 wurde ein Fußgängerüberweg auf einen Nennwert $E_{v,mitt}$ = 40 lx (räumlicher und zeitlicher Mittelwert der vertikalen Beleuchtungsstärke) dimensioniert, was unabhängig von der Qualität der Leuchte und dem verwendeten Leuchtmittel immer einen Neuwert von 50 lx bedeutet.
Das Minimum der vertikalen Beleuchtungsstärke als Nennwert (zeitlicher Mittelwert des örtlichen Minimums der vertikalen Beleuchtungsstärke) musste 5 lx betragen, was dann einen Neuwert von 6,25 lx bedeutet.

Eine Wartung musste spätestens dann erfolgen, wenn die tatsächlichen Werte bei Mittelwert oder Minimum weniger als 70 % des entsprechenden Nennwertes betrugen.

Dieses entspricht einem Wartungswert von 28 lx (Mittelwert) bzw. 3,5 lx (Minimum). Damit wurde durch die DIN 67523 von 1988 starr ein Wartungs- bzw. Neuwertfaktor von 0,56 bzw. 1,79 festgelegt, unabhängig von der Qualität der Leuchte.

1.2 Dimensionierung Fußgängerüberwege mit Zusatzbeleuchtung Stand 2010

In der Fassung von 2010 wird ein FGÜ auf einen Wartungswert von 30 lx (zeitliches Minimum vom räumlichen Mittelwert) bzw. 4 lx (zeitliches und räumliches Minimum) dimensioniert. Die Qualität der Beleuchtung eines Fußgängerüberweges ist also mindestens gleichwertig zu den davor geltenden Anforderungen aus dem Jahr 1988.

Bei modernen Leuchten mit effizienten Leuchtmitteln können Wartungs- bzw. Neuwertfaktoren von 0,75 bzw. 1,33 erreicht werden, womit dann ein Neuwert von 40 lx (statt bisher 50 lx) ausreicht, den geforderten Wartungswert von 30 lx zu erreichen.

So lassen sich durch den Einsatz von modernen Leuchten hoher Schutzart (guter Leuchtenwartungsfaktor) und effizienten Leuchtmitteln mit niedrigem Lichtstromrückgang (guter Lichtstromwartungsfaktor) Neuanlagen durch gute Wartungs- bzw. Neuwertfaktoren jetzt bei gleicher Beleuchtungsqualität niedriger dimensionieren.

Die Neufassung der DIN 67523 erlaubt es, bei hochwertigen Leuchten durch einen besseren Neuwertfaktor das Niveau im Neuzustand zu reduzieren bei normgerechter Beleuchtung, ohne Einbußen bei der Beleuchtungsqualität. So können Stromkosten und CO_2 Emissionen um bis zu 20 % verringert werden.

1.3 Dimensionierung Fußgängerüberwege ohne Zusatzbeleuchtung Stand 1988

Auf eine FGÜ Zusatzbeleuchtung konnte verzichtet werden, wenn während der gesamten Dunkelstunden eine ortsfeste Straßenbeleuchtung mit den Anforderungen einer 2 cd/m² Anlage nach DIN 5044 in Betrieb war.
Eine Wartung musste spätestens dann erfolgen, wenn der tatsächliche Wert vom Mittelwert weniger als 70 % des entsprechenden Nennwertes betrug. Dieses entspricht einem Wartungswert von 1,4 cd/m².

1.4 Dimensionierung Fußgängerüberwege ohne Zusatzbeleuchtung Stand 2010

Auf eine Zusatzbeleuchtung für Fußgängerüberwege kann verzichtet werden, wenn während der gesamten Dunkelstunden eine ortsfeste Straßenbeleuchtung, die den Anforderungen einer ME 2 Anlage (1,5 cd/m² Anlage) nach DIN EN 13201-2 entspricht, in Betrieb ist. Bei Fußgängerüberwegen in Konfliktzonen (z.B. Kreisverkehrsplätzen, Kreuzungen, Einmündungen, etc.) können alternativ die Gütemerkmale der Klasse CE 2 angewendet werden.
Die Anlage ist damit hinsichtlich des Niveaus mindestens gleichwertig zu den bis 2010 geltenden Anforderungen dimensioniert.

Zusätzlich zu den Anforderungen an die Straßenbeleuchtung ist in der Fassung von 2010 jetzt erstmalig an allen Punkten auf der Achse E – F nach DIN 67523-2 ein Mindestwert der vertikalen Beleuchtungsstärke von 4 lx gefordert, um auf dem ge-

samten Fußgängerüberweg einen entsprechenden Kontrast des Fußgängers zu erreichen.

Im Vergleich zu den Anforderungen bis 2010 sind Fußgängerüberwege ohne Zusatzbeleuchtung damit höherwertig beleuchtet.

1.5 Blendungsbewertung

Die Fassung von 1988 forderte für die verwendeten Zusatzleuchten gemäß DIN 5044 eine Blendungsbegrenzung nach KB 2 bzw. KB 1 für die Ebenen C0 bzw. C180.

Zur Blendungsbegrenzung wird in der Fassung von 2010 für die verwendeten Zusatzleuchten die Lichtstärkeklasse G3 nach DIN EN 13201-2 in den Ebenen C330-C45 und C210-C135 gefordert.

Analog zum Übergang von der DIN 5044 zur DIN-EN 13201 erfolgt die Blendungsbewertung gemäß den G Klassen statt den KB Klassen. Die entsprechenden Grenzwerte der Lichtstärkeverteilung gelten dabei in der Betriebslage der Leuchte. Gute FGÜ Leuchten erfüllen beide Anforderungen an die Entblendung sicher.

2 FGÜ Optiken für konventionelle Leuchten und LED Leuchten

Entgegen der ursprünglich weit und lange verbreiteten Skepsis ist die wirtschaftliche und technische Reife des Leuchtmittels LED in der Außenbeleuchtung inzwischen anerkannt. Es sind inzwischen auch LED Leuchten zur normgerechten Beleuchtung von Fußgängerüberwegen entwickelt.
Die hohe Lichtausbeute von langlebigen weißen Hochleistungsleuchtdioden (deutlich über 100 lm/W) einerseits sowie der hohe Beleuchtungswirkungsgrad andererseits (effektive Lichtlenkung sowie geringes Streulicht außerhalb der Nutzfläche) ermöglichen eine sehr effiziente Ausleuchtung von Fußgängerüberwegen.

2.1 Fußgängerüberwege mit Zusatzbeleuchtung - Beispiel Breite 6,5 m

Ein typischer Fußgängerüberweg (Parameter siehe Abbildung 1) kann mit einer modernen konventionellen FGÜ Leuchte (Leuchtmittel HST 100 W bei Gesamtleistung 115 W) beleuchtet werden. Alternativ kann die Beleuchtung mit einer FGÜ Leuchte mit Leuchtmittel LED erfolgen. Mit 48 LEDs und einer Gesamtleistung von 80 W wird eine gleichwertige Beleuchtung erreicht (siehe Abbildung 1).
Anschlussleistung, also auch Stromkosten und CO_2 Emissionen können durch den Einsatz von LED Leuchten um ca. 30 % gesenkt werden.

Bei der Kostenberechnung ist die relevante Größe der TCO Wert. TCO steht für „Total Cost of Ownership“ und berücksichtigt als Lebenszyklusmodell alle während des Betriebs anfallenden Kosten (Finanzierung einer neuen Leuchte mit Anschaffung und Kreditzinsen, Wartungs- und Energiekosten,…).

- Reduzierung der jährlichen Energiekosten pro Leuchte um 29 Euro (Strompreis 0,20 Euro pro kWh und 4 100 Betriebsstunden pro Jahr)

- Reduzierung der Energiekosten pro Leuchte über 25 Jahre um 1 418 Euro (aktueller Strompreis 0,20 Euro pro kWh und 4 100 Betriebsstunden pro Jahr, bei jährlicher Steigerung der Energiekosten um 5 %

- Reduzierung der TCO Kosten (Betrachtungszeitraum 25 Jahre) pro Leuchte um 1 070 Euro, entsprechend einer Reduzierung um 20 %

- Reduzierung der jährlichen CO_2 Emissionen pro Leuchte um 75 Kilogramm (spezifischer CO_2 Emissionsfaktor 508 g/kWh /Lit. 12/ und 4 100 Betriebsstunden pro Jahr). Legt man die Angaben des Umweltbundesamtes /Lit. 13/ von 559 g/kWh zugrunde, erhöht sich die jährliche Einsparung auf 83 Kilogramm

- Reduzierung der Gesamt CO_2 Emissionen pro Leuchte um 1,9 Tonnen (2,1 Tonnen auf Basis der Angaben vom Umweltbundesamt) über einen Zeitraum von 25 Jahren

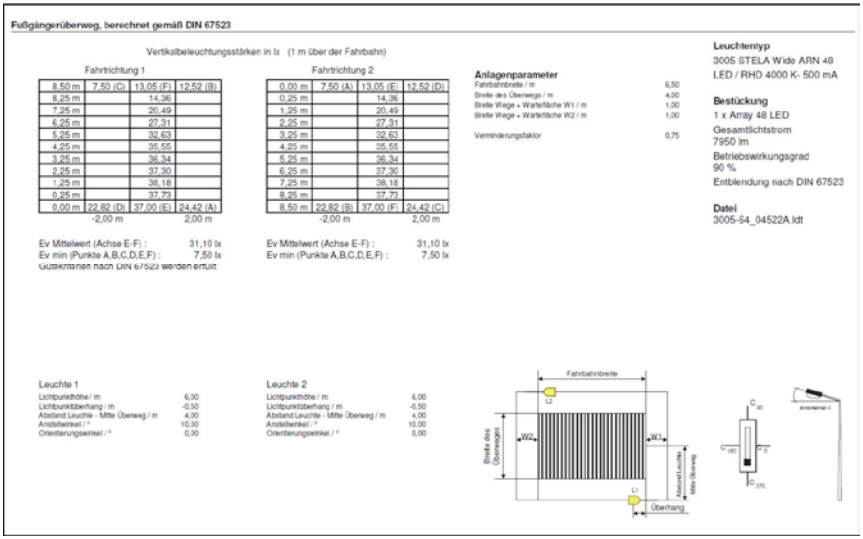


Abb. 1: FGÜ Berechnung

2.2 Fußgängerüberwege mit Zusatzbeleuchtung - Beispiel Breite 8,0 m

Bei einer Breite von 8 m ist der Lichtstrom der FGÜ Leuchten zu erhöhen. Bei der LED Leuchte erhöht sich dann die Anzahl auf 52 LEDs und die Gesamtleistung von um knapp 10 % auf 87 W.

Bei konventionellen FGÜ Leuchten muss dann für eine normgerechte Beleuchtung die Bestückung von 100 W auf die nächst mögliche höhere Bestückung von 150 W erhöht werden, wobei die Anforderungen der DIN 67523 dann übererfüllt werden. Die gesamte Anschlussleistung erhöht sich von 115 auf 170 W, also um knapp 50 % gegenüber einer Steigerung von nur 10 % bei LED Leuchten.

In diesem Fall kann der Einsatz von LED Leuchten die Anschlussleistung, also auch Stromkosten und CO_2 Emissionen, um ca. 50 % absenken.

- Reduzierung der jährlichen Energiekosten pro Leuchte um 70 Euro (Strompreis 0,20 Euro pro kWh und 4 100 Betriebsstunden pro Jahr)

- Reduzierung der Energiekosten pro Leuchte über 25 Jahre um 3 361 Euro (aktueller Strompreis 0,20 Euro pro kWh und 4 100 Betriebsstunden pro Jahr, bei jährlicher Steigerung der Energiekosten um 5 %

- Reduzierung der TCO Kosten (Betrachtungszeitraum 25 Jahre) pro Leuchte um 3 025 Euro, entsprechend einer Reduzierung um 40 %

- Reduzierung der jährlichen CO_2 Emissionen pro Leuchte um 178 Kilogramm (spezifischer CO_2 Emissionsfaktor 508 g/kWh und 4 100 Betriebsstunden pro Jahr). Legt man die Angaben des Umweltbundesamtes von 559 g/kWh zugrunde, so erhöht sich die jährliche Einsparung auf 196 Kilogramm

- Reduzierung der Gesamt CO_2 Emissionen pro Leuchte um 4,5 Tonnen (4,9 Tonnen auf Basis der Angaben vom Umweltbundesamt über einen Zeitraum von 25 Jahren)

3 Vergleich konventionelle und LED Leuchten für Fußgängerüberwege mit Zusatzbeleuchtung

3.1 Die allgemeinen Vorteile von LED Leuchten gegenüber konventionellen Leuchten sind:

- weißes Licht mit guter Farbwidergabe
- reduzierte Wartungskosten
- reduzierte Energiekosten
- erheblich reduzierte CO_2 Emissionen
- hohe Betriebssicherheit (Ausfall einer einzelnen LED bedeutet keinen Totalausfall der Leuchte)

3.2 Energieverbrauch

Moderne langlebige weiße Hochleistungsleuchtdioden erreichen eine gute Lichtausbeute und ermöglichen Optiken für eine sehr effiziente Lichtlenkung. Damit können die Energiekosten und CO_2 Emissionen gesenkt werden.
Das entsprechende energetische Einsparpotential liegt dann hier bei 30 %.

3.3 Dimensionierung

Durch unterschiedliche Anzahl von Leuchtdioden oder variable Bestromung wird eine ineffiziente Überdimensionierung vermieden, was bei konventionellen Leuchtmitteln schwer möglich ist.
Das entsprechende energetische Einsparpotential liegt dann hier bei bis zu 30 %.

3.4 Lichtstromkonstantregelung

Eine optimale Beleuchtungsanlage ist so dimensioniert, dass der Wartungswert genau erreicht wird. Die Degradation des Leuchtmittels erfordert trotzdem eine Überdimensionierung im Neuzustand, damit am Ende der Lebensdauer des Leuchtmittels noch der für die Aufgabe nötige Lichtstrom abgegeben wird.

Beim Leuchtmittel LED ist eine Lichtstromkonstantregelung, bei der im Neuzustand eine Überdimensionierung verhindert wird, technisch möglich. Damit wird auch noch die Lebensdauer der Leuchtdioden erhöht.
Das entsprechende energetische Einsparpotential liegt dann hier bei bis zu 10 %.

4 Ökonomische und ökologische Eigenschaften von LED Leuchten

LED Leuchten weisen trotz in der Regel deutlich höheren Anschaffungskosten eine Reihe von Vorteilen gegenüber Leuchten mit konventionellem Leuchtmittel auf. Nur ein Teil der Ersparnisse bei den Energiekosten wird für die Finanzierungskosten (mit Zins und Tilgung) benötigt.

Daher sind die ökologischen Vorteile der LED Leuchten deutlich höher als die ökonomischen Vorteile. In den Beispielen können (auch gegenüber aktueller Technik) sofort 30 bzw. 50 % des Energiebedarfs und damit auch der CO_2 Emissionen eingespart werden, bei Reduzierung der Gesamtkosten von 20 bzw. 40 %.

Diese schnell erreichbaren, erheblichen und dauerhaften Einsparungen durch LED Leuchten in der Außenbeleuchtung sind angesichts der allgemein recht langsamen Fortschritte zur Reduzierung der Treibhausgase besonders bemerkenswert.

- Die Bundesrepublik Deutschland will die CO_2 Emissionen um 40 % bis zum Jahre 2020 senken (gegenüber dem Basisjahr 1990) und gehört damit schon zu den überdurchschnittlich engagierten Staaten. Dieses Ziel ist schon als ambitioniert zu betrachten. Laut Zeitschrift FOCUS /Lit. 15/ „halten Experten diese Klimaschutzziele für unerreichbar“.

- Die EU strebt bis 2020 eine Senkung der CO_2 Emissionen von Neuwagen um 27 % gegenüber den Vorgaben für 2012 an /Lit. 16/.

In vielen Bereichen werden Investitionen mit höheren TCO Mehrkosten akzeptiert, um die Klimaziele zu erreichen. Dagegen ist es in kaum einem anderen Bereich möglich, CO_2 Emissionen so wirkungsvoll (geringe Investitionen bei positiver TCO Bilanz) und schnell zu reduzieren wie durch den Einsatz der Leuchtdiode in der Außenbeleuchtung. Ein Bonus zur Umrüstung der Straßenbeleuchtung durch eingesparte CO_2 Emissionen wäre logisch.

Mit moderner Beleuchtung werden nicht nur Zusatzkosten vermieden, sondern die Umstellung auf LEDs ermöglicht sogar eine Entlastung der öffentlichen Haushalte. Aus diesem Grunde sollten Investitionen in den Klimaschutz vorrangig für die Sanierung der Straßenbeleuchtung erfolgen.

5 Zusammenfassung

Investitionen in LED Leuchten sind auch bei der Beleuchtung von Fußgängerüberwegen geeignet, schnell deutliche Einsparungen an Emissionen zu erreichen und gleichzeitig die öffentlichen Haushalte zu entlasten.

Durch Umstellung der Gütekriterien auf Wartungswerte in der Fassung von Juni 2010 kann mit modernen Leuchten der Energiebedarf der Beleuchtung von Fußgängerüberwegen um 20 % reduziert werden.

Durch LED Leuchten können bei normgerechter FGÜ Beleuchtung Energiebedarf und CO_2 Emissionen gegenüber modernen konventionellen Leuchten weiter um über 50 % verringert werden.

Gegenüber einer FGÜ Beleuchtung mit einer modernen konventionellen Leuchte nach den Gütekriterien der DIN 67523 aus dem Jahre 1988 ergeben sich bei einer FGÜ Beleuchtung mit einer LED Leuchte nach den Gütekriterien der DIN 67523 aus dem Jahre 2010 Einsparpotentiale bei Anschlussleistung und CO_2 Emissionen von bis zu 65 %. Trotz höherer Investitionskosten können die TCO Kosten dabei um bis zu 45 % reduziert werden.

Literaturnachweis

1. DIN 67523-1, Beleuchtung von Fußgängerüberwegen (Zeichen 293 StVO) mit Zusatzbeleuchtung - Teil 1 Allgemeine Gütemerkmale und Richtwerte; Juni 2010

2. DIN 67523-1, Beleuchtung von Fußgängerüberwegen (Zeichen 293 StVO) mit Zusatzbeleuchtung - Teil 1 Allgemeine Gütemerkmale und Richtwerte; April 1988

3. DIN 67523-1, Beleuchtung von Fußgängerüberwegen (Zeichen 293 StVO) mit Zusatzbeleuchtung - Teil 2 Berechnung und Messung; Juni 2010

4. DIN 67523-1, Beleuchtung von Fußgängerüberwegen (Zeichen 293 StVO) mit Zusatzbeleuchtung - Teil 2 Berechnung und Messung; April 1988

5. Richtlinien für die Anlage und Ausstattung von Fußgängerüberwegen (R-FGÜ 2001), Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, VkBl. 2001 S. 474, Bonn; 2001

6. DIN 13201-1, Straßenbeleuchtung - Teil 1: Auswahl der Beleuchtungsklassen; November 2005

7. DIN EN 13201-2, Straßenbeleuchtung - Teil 2: Gütemerkmale; April 2004

8. DIN EN 13201-3, Straßenbeleuchtung - Teil 3: Berechnung der Gütemerkmale; April 2004

9. DIN EN 13201-4, Straßenbeleuchtung - Teil 2: Methoden zur Messung der Gütemerkmale von Straßenbeleuchtungsanlagen; April 2004

10. DIN EN 5044-1, Ortsfeste Verkehrsbeleuchtung, Beleuchtung von Straßen für den Kraftfahrzeugsverkehr - Teil 1: Allgemeine Gütemerkmale und Richtwerte; September 1981

11. DIN EN 5044-2, Ortsfeste Verkehrsbeleuchtung, Beleuchtung von Straßen für den Kraftfahrzeugsverkehr - Teil 2: Berechnung und Messung; August 1982

12. Durchschnittswerte der Stromerzeugung in Deutschland 2009 (Quelle: BDEW). Informationen von Vattenfall unter http://www.vattenfall.de/de/privatkunden-bundesweit-stromkennzeichnung.htm?WT.ac=search_success; Mai 2012

13. Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2010 und erste Schätzungen 2011. Publikation Umweltbundesamt unter http://www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/co2-strommix.pdf; Mai 2012

14. Reinhardt, Jan: Leuchtdioden - ein (das?) neue Leuchtmittel für die Außenbeleuchtung? Jahrbuch 2010 zur Straßen- und Außenbeleuchtung, EW Medien und Kongresse GmbH , Frankfurt, Berlin, Heidelberg Bonn; 2010, S. 212 ff.

15. Experten halten Klimaschutzziele für unerreichbar. Zeitschrift Focus, Online Ausgabe, www.focus.de/politik/weitere-meldungen/deutschland-droht-ziele-im-klimaschutz-zu-verpassen-experten-halten-klimaschutzziele-fuer-unerreichbar_aid_735996.html; 23. April 2012

16. Europäisches Parlament: Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO2-Emissionen von Personenkraftwagen... *Amtsblatt der Europäischen Union.* 5. Juni 2009

Grundlegende Untersuchung zur Unterschiedswahrnehmung bei inhomogenen Leuchtdichtefeldern in der Straßenbeleuchtung

Dipl.-Ing. Andreas Walkling, Univ.-Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz
Technische Universität Ilmenau
Fachgebiet Lichttechnik, Prof.-Schmidt-Str. 26, 98693 Ilmenau

1. Einleitung

Die Sehleistung von Fahrzeugführern wird vorrangig durch die Unterschiedswahrnehmung beeinflusst /1/. Sie beschreibt eine elementare Sehfunktion, Helligkeitsunterschiede wahrzunehmen. Kann ein Leuchtdichteunterschied zwischen Objekt und Umfeld gerade wahrgenommen werden, so bezeichnet man diesen Wert als Schwellenleuchtdichteunterschied ΔL. Der Schwellenleuchtdichteunterschied ist beispielsweise abhängig von der Adaptionsleuchtdichte, von der Größe und Darbietungszeit des Sehobjektes und vom Alter des Beobachters.

Beim Fahren bei Nacht ändert sich die Leuchtdichteverteilung im Gesichtsfeld des Fahrers ständig, was zu einem laufenden Adaptationsvorgang am Auge führt. Die Adaptation kann dabei den schnellen Leuchtdichteänderungen nicht folgen. Es stellt sich eine mehr oder minder zeitlich mittlere Adaptationsleuchtdichte L_a ein, die in Straßenbeleuchtungsnormen als mittlere Fahrbahnleuchtdichte L_m angenommen wird /2/.

Die Hintergrundleuchtdichte L_h von Sehobjekten variiert entsprechend der inhomogenen Beleuchtungsverteilung (insbesondere auf nasser Straßenoberfläche) und weicht meistens von der mittleren Fahrbahnleuchtdichte L_m ab. Bisherige, auf homogenen Feldern beruhende Untersuchungsergebnisse und deren Gütekennziffern sind deshalb für die Bewertung der Straßenbeleuchtung nur begrenzt anwendbar. Denn diese Untersuchungsergebnisse basieren auf der Vereinfachung, dass die Hintergrundleuchtdichte gleich der Adaptationsleuchtdichte ist. Demnach wurde hierbei der Schwellenleuchtdichteunterschied von Sehobjekten in einem homogenen Umfeld mit gleicher Leuchtdichte (Umfeldleuchtdichte L_u) untersucht. Für das homogene Umfeld gilt: $L_u = L_a = L_h$.

2. Forschungsstand

Grundlegende Untersuchungen über das Verhalten der Unterschiedswahrnehmung in unbunten homogenen Umfeldern sind bereits Anfang des 20. Jahrhunderts durchgeführt worden. Basierend auf den sehr heterogenen experimentellen Material (verschiedene Bereiche für die Umfeldleuchtdichte und Sehobjektgröße) hatte Berek 1942 eine analytische Funktion aufgestellt, die den Zusammenhang zwischen dem Schwellenleuchtdichteunterschied und den relevanten Einflussgrößen erfasst /3/. 1946 hatte Blackwell sehr ausführliche Untersuchungen durchgeführt (mehr als 90000 Messwerte von sieben Versuchspersonen), die Adrian 1969 analytisch weiterverarbeitet hat (siehe Abbildung 1) /4/ /5/. Die daraus entwickelte Funktion beschreibt den Schwellenleuchtdichteunterschied gesicherter und genauer als die frühere Bereksche Funktion, weshalb sie beispielsweise als Basis zur Berechnung des Visibility Levels VL von Sehobjekten noch heute verwendet wird (VL = Anzahl Wahrnehmungsschwellen in einer Leuchtdichtedifferenz) /6/.

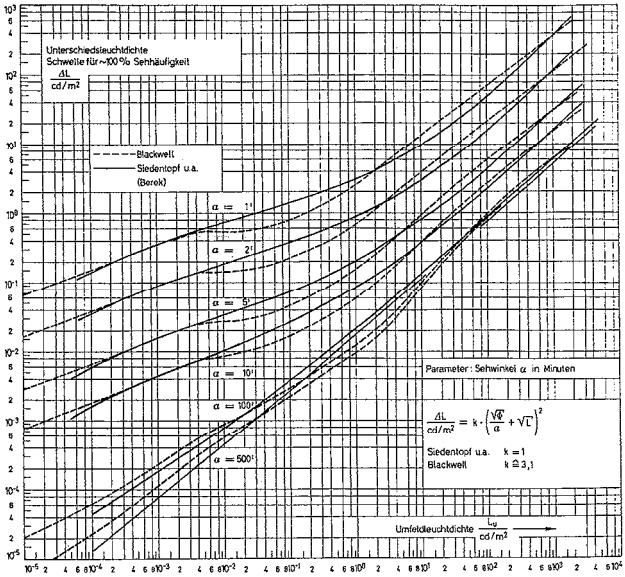


Abb. 1: Darstellung der Schwellenleuchtdichteunterschiedsfunktionen von Berek und von Adrian, letztere abgeleitet aus den Blackwell-Daten /5/

Erste Arbeiten zur Beschreibung der Wirkung von inhomogenen Feldern auf die Wahrnehmung kamen 1945 von Moon/Spencer /7/. Weiterführende Untersuchungen zum Schwellenleuchtdichteunterschied wurden 1977 von Narisada durchgeführt, welche zeigten, dass der von einer Gesichtsfeldleuchtdichte verursachte Lichtschleier sowohl eine physiologische als auch eine physikalische Wirkung hat /8/. Der Schwellenleuchtdichteunterschied wird demzufolge nicht nur von der physiologisch bedingten Adaptationsleuchtdichte, sondern auch von dem physikalischen Effekt eines durch Streulicht erzeugten Lichtschleiers auf der Netzhaut beeinflusst. Dieser wird mit der Schleierleuchtdichte beschrieben, welche die scheinbare Leuchtdichte des Sehobjekts L_o und seines Hintergrundes L_h erhöht. Die Moon-Spencer-Gleichungen sind deshalb nicht hinreichend, weil sie lediglich den physiologischen Effekt berücksichtigen.

Die Versuchsbedingungen bei Narisada orientierten sich an der Tunneleinfahrt bei Tage, wonach sich die Adaptationsleuchtdichte von der Hintergrundleuchtdichte deutlich unterscheidet (Black-hole-Effekt). Im ersten Teilversuch wurde der Versuchsperson ein 7 min großes quadratisches Testzeichen 0,125 s in einem kreisrunden Lichtschleierfeld angeboten. Im zweiten Teil wurde der Versuch ohne Schleierfeld wiederholt. Der untersuchte Leuchtdichtebereich reichte von ungefähr 0,3 cd/m^2 bis 2000 cd/m^2. Zwischen den beiden gemessenen Schwellenleuchtdichteunterschieden wurde ein erheblicher Unterschied festgestellt. Im Teilversuch 1 wird der Schwellenleuchtdichteunterschied durch die Adaptations- und Schleierleuchtdichte bestimmt. Im 2. Teilversuch wird der Schwellenleuchtdichteunterschied nur von der Adaptationsleuchtdichte beeinflusst. Die Differenz zwischen beiden im Labor gemessenen Schwellen ergibt einen Teilschwellenwert, der alleinig durch die Schleierleuchtdichte verursacht wird, die unter praktischen Straßensehbedingungen der Hintergrundleuchtdichte L_h und der äquivalenten Schleierleuchtdichte L_{eq} entspricht /9/.

3. Fragestellung und Theoriebezug

Zur Bestimmung der Unterschiedsempfindlichkeit des Auges wird in dieser Arbeit der Einfluss des inhomogenen Gesichtsfeldes auf den Schwellenleuchtdichteunterschied bei trockener und nasser Straßenoberfläche untersucht.

In Anlehnung an die Schwellenuntersuchungen von Narisada werden Experimente durchgeführt, um dessen Ergebnisse zu validieren und weiterzuentwickeln.

4. Methode

Basierend auf dem heutigen Forschungsstand werden weiterführende Untersuchungen im Labor und Feld durchgeführt. Kern der Untersuchungen bildet ein Laboraufbau (siehe Abbildung 2), für dessen Validierung eine ergänzende Feldstudie durchgeführt wird.

Mit dem Laboraufbau wird ein Rahmen geschaffen, um normale und erschwerte Sehbedingungen reproduzierbar zu simulieren. Für die technische Umsetzung werden Beamer verwendet, mit denen sich die Testzeichen und Schleier in wechselnden Formen darstellen lassen. Um den praktischen Sichtverhältnissen auf trockener und nasser Straße näherzukommen, sind verschiedene Größen, Formen, Darbietungszeiten und Beleuchtungsniveaus für die Testobjekte und Schleier vorgesehen. Um eine hohe Retestreliabilität zu gewährleisten, wird ein teilautomatisierter Ablauf der Versuchsreihen erstellt, wobei der Versuchsleiter nur eine begleitende Rolle übernimmt.

Die Laborversuche werden mit mindestens 20 Versuchspersonen im Alter von 18 bis 75 Jahre umgesetzt. Zu Beginn hat die Versuchsperson mindestens 25 min Zeit, um zu adaptieren. In mehreren Sitzungen werden verschiedene Situationen dargeboten, in denen die Versuchsperson den Schwellenleuchtdichteunterschied in Abhängigkeit der Adaptationsleuchtdichte zu bestimmen hat. Die ortsfesten und teilweise ortsveränderlichen Darbietungen des Testobjektes werden jeweils durch ein akustisches Signal angekündigt.

Abb. 2: Laboraufbau zur Untersuchung des Schwellenleuchtdichteunterschieds

Auf der zweistreifigen Versuchsstraße (siehe Abbildung 3) mit einseitigem Gehweg steht eine einseitige Leuchtenanordnung mit insgesamt fünf Lichtpunkten innerhalb der Versuchsstrecke zur Verfügung. Die maximal mögliche Lampenbestückung der dimmbaren und LVK-variablen Versuchsstraßenleuchten beträgt 400 W. Hiermit lässt sich jedwedes Beleuchtungsniveau der ME-Beleuchtungsklassen nach DIN EN 13201 realisieren. Erschwerte Sehbedingungen werden mit einer einseitigen Beregnungsanlage simuliert. Die Straßenoberfläche kann damit gleichmäßig bewässert und in einen nassen sowie stationären Zustand versetzt werden.

Als Testobjekt wird das Standard-Testobjekt mit einer quadratischen Fläche der Größe von 20 cm x 20 cm in einer Entfernung von 60 bis 90 m vor dem Beobachterkollektiv eingesetzt. Nach einer Dunkeladaptationsphase von etwa 25 min müssen die Versuchspersonen die Detektierbarkeit von unterschiedlich hellen Testobjekten bewerten, die an verschiedenen Stellen in einem verkürzten Bewertungsfeld aufgestellt sind. Die daraus erhaltenen Straßenmesswerte werden schließlich mit den Laborwerten zur Validierung der Laborergebnisse verglichen.

Abb. 3: Versuchsstraße zur Validierung der Labormesswerte

5. Ausblick

Im Verlauf dieser Arbeit werden die Laborergebnisse zur Unterschiedswahrnehmung auf der Versuchsstraße validiert. Darüber hinaus sollen relevante Gütekennziffern überarbeitet werden. Hierbei werden auch die Erkenntnisse aus den Untersuchungen unter erschwerten Sehbedingungen verstärkt Berücksichtigung finden.

6. Literatur

/1/ Eckert, M.: Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr. Berlin, München: Verlag Technik (1993)
/2/ DIN EN 13201-2: Straßenbeleuchtung – Teil 2: Gütemerkmale (2003)
/3/ Berek, M.: Zum physiologischen Grundgesetz der Wahrnehmung von Lichtreizen. Zeitschrift f. Instrumentenkunde 63 (1943), S. 297

/4/ Blackwell, H. R.: Contrast thresholds of the human eye. J. Opt. Soc. Am. 36 (1946), S. 624
/5/ Adrian, W.: Die Unterschiedsempfindlichkeit des Auges und die Möglichkeit ihrer Berechnung. In: Lichttechnik 21 (1969), Nr. 1, S. 2A-6A
/6/ Adrian, W., Gibbons, R.: Visibility level und die Sichtbarkeit in der Straßenbeleuchtung. In: LICHT 10/1993, S. 734-739
/7/ Moon, P., Spencer, D. E.: The visual effect of non-uniform surrounds. In: Journal Opt. Soc. Amer. 35 (1945), S. 233
/8/ Narisada, K., Yoshimura, Y.: Adaptation luminance of driver's eyes at the entrance of tunnel... an objective measuring method. International Symposium on measures of road lighting effectiveness, Karlsruhe, Session 1, Fundamentals, 1977, S. 56-73
/9/ Narisada, K.: Perception in complex fields under road lighting conditions. In: Lighting Res. Technol. (1995) 27(3), S. 123-131

Schlechtwetter-optimierte LED-Straßenbeleuchtung zur Verbesserung der Sehsicherheit

Dipl.-Ing. Andreas Walkling, Univ.-Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz
Technische Universität Ilmenau
Fachgebiet Lichttechnik, Prof.-Schmidt-Str. 26, 98693 Ilmenau

Die in diesem Beitrag vorgestellte LED-Pilotleuchte wurde im Rahmen des Thüringer Verbundprojekts „CoLight“ (Corporate in Lighting) entwickelt. Das Projekt CoLight wurde durch die Thüringer Aufbaubank (TAB) und den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) gefördert.

1. Einleitung

Ein Ausgangspunkt im richtungsweisenden Projekt CoLight war, dass bisherige Straßenbeleuchtungsanlagen von Verkehrsstraßen in Deutschland die zusätzliche Anforderung an die Gesamtgleichmäßigkeit für nasse Straßenoberflächen nach DIN EN 13201-2 im Betrieb normalerweise nicht erfüllen, weil die Beleuchtung alleinig für trockene Straßenoberflächen ausgelegt wird /1/.

In Deutschland kann man aber mit mehr als 200 Regentagen pro Jahr rechnen. Damit sind für einen großen Teil der Nachtstunden die Straßenoberflächen mit Beleuchtungen nach ME-Beleuchtungsklassen nicht normkonform. Es entstehen damit Tarnzonen, die Reflexblendung wächst, kritische Objekte und Hindernisse im Straßenraum werden zudem erschwert sichtbar und Anhaltewege bei Bremsmanövern vergrößern sich, was im Ganzen zu einem erhöhten Gefährdungspotential für alle Verkehrsteilnehmer führt /2/.

Um die Verschlechterung der Seh- und Verkehrssicherheit bei nasser Straßenoberfläche zu verringern und die DIN EN 13201-2 ganzheitlich zu erfüllen, wurde eine dynamisch-adaptive LED-Pilotleuchte mit variablem Beleuchtungsniveau und erstmals mit variabler Lichtstärkeverteilung als ein Schwerpunkt im Projekt CoLight entwickelt. Die Leuchte mit zwei Lichtstärkeverteilungen („2-LVK-Leuchte“) kann im laufenden Betrieb in Abhängigkeit der Witterung eine entsprechende Lichtverteilung sowohl für die trockene als auch nasse Straßenoberfläche einschalten.

2. Stand der Normung und Technik

Die derzeitige in Deutschland gültige europäische Norm für Straßenbeleuchtung DIN EN 13201:2003 definiert ein Parametersystem und ermöglicht anhand spezifischer Parameter wie Verkehrsnutzung und Umgebungseinflüsse eine adaptive Beleuchtung. Auch die neue CIE-Publikation 115:2010 „Beleuchtung von Straßen für Fußgänger und motorisierten Verkehr“ empfiehlt ein Konzept der adaptiven Beleuchtung zur Anwendung /3/. Das Beleuchtungsniveau kann hiermit verkehrs- und zeitbedingt variiert werden. Beide Publikationen enthalten auch zusätzliche Anforderungen an die Beleuchtung für nasse Straßenoberflächen, wodurch eine weitere Variation der Lichtstärkeverteilung aus Sicht der Energieeinsparung sinnvoll wird.

Mit bisherigen Straßenleuchten (auf Basis von konventionellen und LED-Lampen) ist eine adaptive Lichtstärkeverteilung während des Betriebes nicht möglich. Variieren kann man ausschließlich das Beleuchtungsniveau. Dafür stehen dem Anwender verschiedene Rege-

lungssysteme zur Verfügung: zum Beispiel die zeitgesteuerte Regelung, die lampenalterungsabhängige Regelung (CLO) oder die anwesenheitsabhängige Regelung. Im Bereich der Kfz-Beleuchtung wird bereits die adaptive Fahrbahnausleuchtung mit variabler Lichtstärkeverteilung eingesetzt. Die sogenannte AFS-Leuchtentechnik (Advanced Frontlighting System) stellt variable Lichtverteilungen wie zum Beispiel das Stadtlicht, Landstraßenlicht, Autobahnlicht, Schlechtwetterlicht und Kurvenlicht bereit, um die Verkehrssicherheit bei Nacht zu erhöhen /4/.

3. Eigenschaften der LED-Pilotleuchte

Die für die LED-Pilotleuchte ausgewählte Beleuchtungsaufgabe ist eine sehr typische für Stadtstraßen. Und zwar sind alle Verkehrsstraßen mit gemischtem Verkehr in geschlossenen Ortschaften zu beleuchten (Beleuchtungssituationen der Gruppe B nach DIN 13201-1). Deren zweistreifiger Fahrbahnquerschnitt ist im Allgemeinen 6,50 m groß. Es sind also Hauptverkehrsstraßen und Erschließungsstraßen, die beispielsweise als Sammelstraßen, Quartierstraßen, dörfliche Hauptstraßen, örtliche Einfahrtsstraßen und Geschäftsstraßen, Hauptgeschäftsstraßen, Gewerbestraßen oder als anbaufreie Straßen beispielsweise fungieren.

Die lichttechnischen Anforderungen an die Beleuchtung dieser Stadtstraßen sind durch die ME-Klassen ME3, ME4 und ME5 nach DIN EN 13201-2 gegeben. Die damit verbundenen Anforderungen hinsichtlich der mittleren Fahrbahnleuchtdichte, der Längs- und Gesamtgleichmäßigkeit, der physiologischen Blendung und der Mindestausleuchtung der Randbereiche der trockenen Fahrbahn werden von der Pilotleuchte erfüllt. Bei nasser Straßenoberfläche werden mit einer veränderten Lichtverteilung die MEW-Beleuchtungsklassen 3, 4 und 5 normgerecht umgesetzt (= variable Lichtstärkeverteilung).

Die von den Verbundprojektpartnern (dilitronics GmbH, Fraunhofer Institut für angewandte Optik und Feinmechanik IOF, Jenoptik Polymer Systems GmbH, MAZeT GmbH, 2K Moxa Lighting GmbH) mitentwickelte Konzeptleuchte besteht aus maximal 18 LED-Clustern mit insgesamt 24000 lm Lampenlichtstrom. Pro Cluster liegen drei verschiedene LED-Lampentypen „Mint“, „Amber“ und „Blau“ vor, so dass Mischspektren und eine Vielzahl von ähnlichsten Farbtemperaturen im laufenden Betrieb der Versuchsleuchte realisierbar sind (ein weiterer Schwerpunkt des Projektes CoLight, siehe dazu /5/). Die variablen LED-Optiken (bestehend aus Cluster und Reflektor) sind in einer hermetisch abgeschlossenen Kassette untergebracht (siehe Abbildung 1).

Abb. 1: Links: eine CoLight-Kassette; rechts: das LED-Cluster mit Freiformreflektor

Zur Umsetzung der dynamisch-adaptiven Versuchsbeleuchtung enthält die Leuchte mehrere Sensoren, die die Messdaten für den Verkehrsfluss, den Lampenlichtstrom und für die Umgebungshelligkeit erfassen. Dazu gehört auch die Integration von Softwarealgorithmen zur Verarbeitung der Messdaten zu Steuerdaten.

4. Beleuchtung auf nasser Straßenoberfläche

Das Reflexionsverhalten der Straßenoberfläche ist nicht nur von der Textur und der Zusammensetzung, sondern auch vom Nässegrad abhängig. Je größer der Nässegrad wird, desto spiegelnder ist die Reflexion. Dadurch vergrößert sich die mittlere Fahrbahnleuchtdichte, wogegen die Gesamtgleichmäßigkeit kleiner wird. Zudem werden im Vergleich zur Beleuchtung auf trockener Straßenoberfläche die hellen Leuchtdichtebereiche flächenmäßig kleiner und die dunklen Leuchtdichtebereiche größer (siehe Abbildung 2). Damit verbunden verstärken sich die Reflexionsbilder von Straßenleuchten entlang der Verbindungsgeraden zwischen Fahrzeugführer und Leuchten. Das führt zur erhöhten Blendung und Verminderung der Sichtbarkeit /3/.

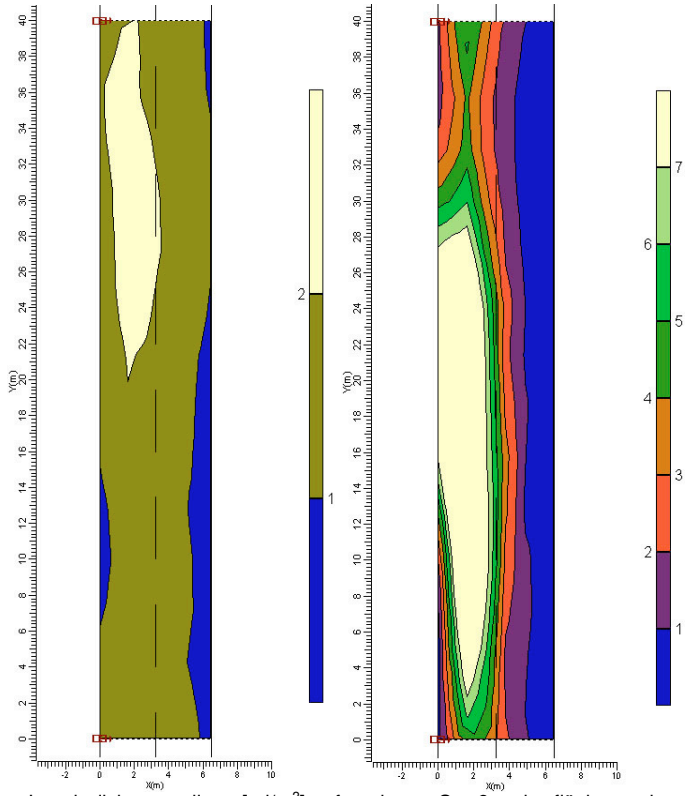


Abb. 2. Links: Leuchtdichteverteilung [cd/m^2] auf trockener Straßenoberfläche; rechts: Leuchtdichteverteilung auf nasser Straße; beide Beleuchtungen basieren auf einer herkömmlichen Lichtstärkeverteilung (d.h. leuchtdichteoptimierte LVK für die Anwendung auf trockener Straße)

Um den nachteiligen Einfluss des Nässegrads auf die Gesamtgleichmäßigkeit und Blendung zu minimieren, kann beispielsweise die Lichtstärkeverteilung optimiert werden, indem die Lichtstärken in Richtungen der spiegelnden Reflexion zum Fahrzeugführer hin reduziert werden und das Hauptlicht in Richtung zur Querachse der Straße hin verschoben wird /6/. Damit vergrößert sich die Spreizung der Lichtstärkeverteilung, wie in Abbildung 3 gezeigt.

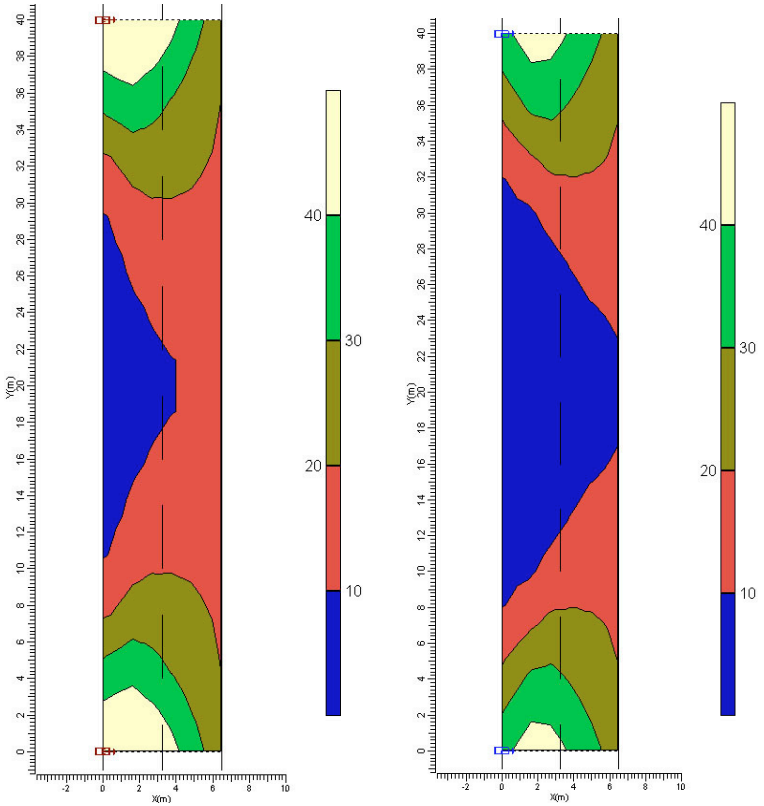


Abb. 3: Beleuchtungsstärkeverteilungen [lx] im Vergleich: links, die LVK mit herkömmlicher LVK und einer Spreizung von 15°; rechts, die LVK mit einer vergrößerten Spreizung von beispielsweise 25°(für die Realisierung einer Regenlichtverteilung)

Einen Überblick über die Verschlechterung und Verbesserung der Lichtstärkeverteilung (LVK) auf nasser Straßenoberfläche vermittelt Tabelle 1. Das Berechnungsbeispiel basiert auf einer einseitigen Leuchtenanordnung mit einem Lichtpunktabstand von 40 m und einer Lichtpunkthöhe von 8 m. In der Spalte „Situation 1“ ist mit herkömmlicher Lichtverteilung auf trockener Straßenoberfläche die Beleuchtungsklasse ME3c erfüllbar. In der Spalte „Situation 2“ ist der typische kritische Fall (siehe Einleitung) zu sehen, wo mit gleicher herkömmlicher Lichtverteilung die Anforderung an die Gesamtgleichmäßigkeit für die nasse Straßenoberfläche für die Beleuchtungsklasse ME3W nicht erfüllt wird. Dieser Nachteil lässt sich mithilfe der adaptiven Lichtstärkeverteilung der Pilotleuchte beheben. Das ist in der Spalte „Situation 3“ zu sehen: Der Wert für die Gesamtgleichmäßigkeit U_0 ist größer als das geforderte Mindestniveau von 0,15.

	Mindest-/Höchstwerte für Klasse ME3c	Situation 1: trockene Straße	Situation 2: nasse Straße	Situation 3: nasse Straße
Straßenbreite [m]		6,5	6,5	6,5
r-Tabelle		CIE C2	CIE W4	CIE W4
Q_0		0,07	0,166	0,166
LVK		Trockenlicht	Trockenlicht	Regenlicht
Lichtpunkthöhe [m]		8	8	8
Lichtpunktabstand [m]		40	40	40
Überhang [m]		0	0	0
Neigungswinkel [°]		5	5	5
L_m [cd/m²]	1,0	1,4	3,1	1,4
U_0	0,4 (trocken) 0,15 (nass)	0,6	**0,1**	**0,2**
U_l	0,5	0,6	0,3	0,3
TI [%]	15	14	8	8
SR	0,5	0,5	0,5	0,7

Tab. 1: Vergleich zwischen Beleuchtungen auf nasser Straßenoberfläche (CIE-Klasse W4) mit entweder herkömmlicher Lichtstärkeverteilung (= „Trockenlicht“) oder Regenlichtverteilung (adaptive Lichtstärkeverteilung)

5. Fazit

Mit der im Projekt CoLight entwickelten LED-Pilotleuchte kann die Sichtbarkeit von Hindernissen auf nasser Straßenoberfläche verbessert werden, weil das Regenlicht die Gesamtgleichmäßigkeit deutlich anhebt und normkonform macht. Die Sehsicherheit und Verkehrssicherheit beim Fahren unter kontrastmindernden unfallträchtigen Schlechtwetterbedingungen wie Regen können damit positiv beeinflusst werden.

Alles in allem stellt diese 2-LVK-Pilotleuchte die dynamisch-adaptive Straßenbeleuchtung auf eine neue Entwicklungsstufe, weil damit erstmals eine variable Lichtstärkeverteilung im laufenden Betrieb realisierbar wird.

6. Literatur

/1/ DIN EN 13201-2: Straßenbeleuchtung – Gütemerkmale (2003)

/2/ Eckert, M.: Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr. Berlin, München: Verlag Technik (1993)

/3/ CIE Publikation Nr. 115:2010: „Lighting of roads for motor and pedestrian traffic“

/4/ Labahn N., Wördenweber, B., Lauber, R.: Research & Development Review 1999, Hella Licht und Elektronik

/5/ Ueberschaer, A.: Objektdetektion bei verschiedenen Adaptationsspektren und Störgrößen unter mesopischen Bedingungen, Tagungsband Licht 2012

/6/ CIE Publikation Nr. 47:1979: „Road lighting for wet conditions“

LED-Strassenbeleuchtung in der Schweiz: Der Schritt in die Zukunft nach ersten Erfahrungen

Jörg Imfeld, El.-Ing.HTL, Projektleitung Lichttechnik, Elektron AG, CH-8804 Au ZH

Die LED-Beleuchtung entwickelt sich langsam zum Standard in der Strassenbeleuchtung. Immer mehr Produkte kommen auf den Markt, die nun eine echte Alternative zu den konventionellen Leuchten sind. Die Energieeffizienz ist nun so weit, dass LED gegenüber den besten Natrium-Lösungen deutlich im Vorsprung ist. Mit rund 8‘000 eingesetzten LED-Strassenleuchten in der Schweiz zeigen die ersten Erfahrungen: Neben den positiven Energiespar-Effekten gibt es auch neue Herausforderungen. Im ersten Teil wird anhand zwei Musterbeleuchtungen der momentane Stand bezüglich Energieeffizienz erläutert. Der zweite Teil greift ein interessantes Thema im Zusammenhang mit der künftigen Effizienzsteigerung auf.

1 Musterbeleuchtungen mit LED

1.1 Felsenaustrasse in Chur

In Chur wurde die Felsenaustrasse umgerüstet: Auf den vorhandenen Peitschenkandelabern wurden die bestehenden Stradasole-Pi-Leuchten, mit HME125W bestückt durch Modalux-Speedstar-Leuchten, mit 70W-LED 1.Generation bestückt ersetzt. Die alte Beleuchtung wurde kurz vor der Messung gereinigt und mit neuen Leuchtmitteln bestückt.

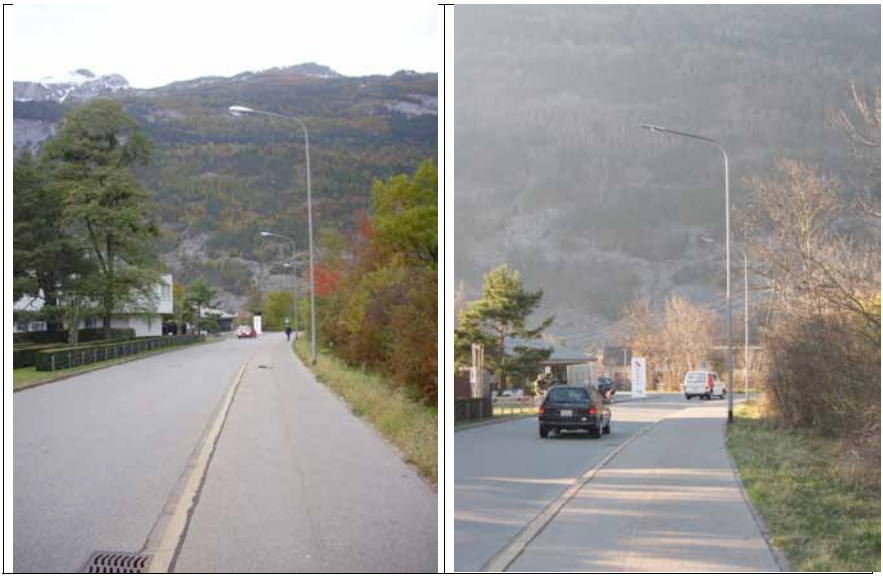


Abb.1: Tagesansicht alt (links) – neu (rechts)
53% eingesparte Energie bei Einhaltung der Normvorgaben

Die Geometrie der Anlage ist wie folgt: Fahrbahnbreite 6m, Trottoir mit Breite 1.5m, Peitschenkandelaber LPH=9m, Neigung 15° und Ausladung 1.5m, Lichtpunktabstand je

30m. Die Klassierung nach EN13201 ergibt die Beleuchtungsklasse ME5 / CE5.
Die Anlage wurde vorher und nachher berechnet und lichttechnisch ausgemessen.

Abb.2: Leuchtdichte-Messungen mit LMK der neuen Beleuchtung.
L mittel = 0.75 cd/m2, U0 = 0.51, U1 = 0.8 (Farb-Skala in cd/m2)

Beide Messungen zeigen: Die Normvorgaben wurden deutlich übertroffen und erreichen die Klasse ME4b. Die alte Beleuchtung wird jedoch schnell verschmutzen und auf etwa den halben Wert sinken. Die neue Beleuchtung verbraucht mit 70W pro Lichtpunkt nur 47% der alten Installation mit rund 150W-Systemleistung pro Lichtpunkt. Die LED-Leuchten sind mit der 1.Generation LED bestückt, mit der 2.Generation und einer neueren Optik könnte heute nochmals massiv gespart werden: Statt 70W Systemleistung könnte mit einer 37W-Lösung der Verbrauch um 75% auf nur noch 25% gesenkt werden.

Alte Beleuchtung	Norm-Vorgaben ME5/CE5	Berechnung	Messung
Mittlere Leucht-dichte (cd/m2)	0.5	0.78	0.853
Gesamtgleich-mässigkeit U0	0.35	0.54	0.503
Längsgleich-mässigkeit U1	0.4	0.76	0.79
Schwellenwert-erhöhung TI (%)	15	5.5	-
Mittlere Beleuch-tungsstärke (lx)	7.5	11.0	12.8

Tab. 1: Berechnungs- und Messergebnisse der alten Beleuchtung, Wartungsfaktor 1.0

Neue Beleuchtung	Norm-Vorgaben ME5/CE5	Berechnung 1.Gen.LED 70W	Messung	Berechnung 2.Gen.LED 37W
Mittlere Leucht-dichte (cd/m2)	0.5	0.77	0.749	0.79
Gesamtgleich-mässigkeit U0	0.35	0.68	0.512	0.64
Längsgleich-mässigkeit U1	0.4	0.88	0.803 0.751	0.79
Schwellenwert-erhöhung TI (%)	15	7.4	-	6.9
Mittlere Beleuch-tungsstärke (lx)	7.5	11.4	10.9	9.7

Tab. 2: Berechnungs- und Messergebnisse der neuen Beleuchtung, Wartungsfaktor 1.0

1.2 LED-Beleuchtung in Fribourg

Im Quartier der beiden Strassen Rue Hans Fries und Rue Hans Geiler wurden 13 alte Leuchten des Typs „grosser Klassiker“, mit HME 250W bestückt durch LED-Leuchten 1.Generation, bestückt mit 70W-LED ersetzt. Dabei wurden die Peitschen-Kandelaber gekürzt, so dass die neue Beleuchtung als Aufsatzleuchten mit optimierter Lichttechnik besser zum Einsatz gelangt. Ähnlich wie in Chur gelten die Vorgaben nach der ME5/CE5-Beleuchtungsklasse. Die Berechnungen und Messungen zeigen, dass auch hier mit der LED-Beleuchtung massiv an Energie eingespart werden kann: Statt 275W pro Lichtpunkt wird nun noch 70W, also 25% verbraucht. Mit HME 250W ist dieses Quartier ursprünglich nach höheren Anforderungen beleuchtet worden. Würde man heute mit konventioneller Technik projektieren, käme man auf eine CPO 60W mit Systemleistung 67W - Beleuchtung – eine ähnlich sparsame Lösung. Der Vergleich dieser Lösung mit einer 2.Generation LED-Leuchte ergibt folgendes Fazit: Statt mit Systemleistung 67W könnte heute mit 37W nochmals 45% zusätzlich an Energie eingespart werden.

Abb. 3:
Rue Hans Fries nach der Umrüstung, 75% eingesparte Energie bei Einhaltung der Normvorgaben

	Norm-Vorgaben ME5 / CE5	Berechnung alte Beleuchtung Wf=0.6	Berechnung neue Beleuchtung Wf=0.75	Messung neue Beleuchtung
Mittlere Leucht-dichte (cd/m2)	0.5	0.83	0.56	0.79
Gesamtgleich-mässigkeit U0	0.35	0.37	0.51	0.44
Längsgleich-mässigkeit U1	0.4	0.67	0.86	0.6
Schwellenwert-erhöhung TI (%)	15	7.8	9.5	-
Mittlere Beleuch-tungsstärke (Fahrbahn) (lx)	7.5	11	7.8	-

Tab. 3: Berechnungs- und Messergebnisse der alten und neuen Beleuchtung in Fribourg

2 Standardisierungen von LED-Strassenleuchten

Die Erfahrungen mit nun 8000 installierten LED-Strassenleuchten zeigen, dass mit dem Einzug der LED-Technologie in die Strassenbeleuchtung durch die Effizienzsteigerung viele neue Herausforderungen entstehen. Die LED- und Leuchtenhersteller sind in den nächsten Jahren gezwungen, ihre Leuchten auf dem neusten Stand der aktuellen LED-Effizienz zu halten. Das bedeutet: Regelmässige Upgrades sind zu erwarten. Beispiele zeigen, dass Upgrades nicht immer reibungslos ablaufen und damit neue Probleme entstehen: Ist eine LED-Leuchte einmal eingeführt, sind Planer und Anlagebesitzer darauf eingestellt. Sämtliche Daten sind in EDV-Systemen hinterlegt. Werden nun bei Upgrades Änderungen notwendig, kann dies Konzept-Änderungen mit erheblichem Zusatz-Aufwand bedeuten. Anhand eines beispielhaften Projektablaufes soll dies aufgezeigt werden.

2.1 Projektablauf mit konventionellen Strassenleuchten

Zur besseren Illustration nehmen wir als Beispiel einen Projektablauf einer neu zu bauenden Strasse an, die beleuchtet werden soll. Ein Lichtplaner bearbeitet das Projekt mit Beginn in einer Leuchtenauswahl. Durch die Phasen der Konzepte, Tests und Angebote kristallisiert sich dann eine Siegerleuchte heraus. In einer späteren Phase beginnt der Bau der Strasse und die Lieferung der gewählten Lösung. Das Projekt beginnt mit einer Lichtplanung, in unserem Beispiel mit sechs verschiedenen Leuchtentypen. Der Lichtplaner erstellt Konzepte mit Kostenangaben und lässt Tests machen. Danach findet eine Bewertung und eine Auswahl der besten drei Lösungen statt, die Leuchten 2,3,5 scheiden aus, Leuchten 1,4,6 kommen weiter. Nun werden Feinjustierungen – z.B. optimierte Standorte pro Leuchtentyp, technische Ergänzungen wie Mastdetails etc. – durchgeführt. Angebote werden erstellt, nach der Bewertung erkürt der Verantwortliche nun die Siegerleuchte – in unserem Beispiel Leuchte 4 – und sagt den beiden anderen Leuchtenherstellern ab. Eine Bestätigung, Vorvertrag oder ähnliches gibt dem Sieger die Sicherheit, seine Leuchte bei Baubeginn liefern zu können.
Die Baueingabe und der Baubeginn kann sich durchaus um längere Zeit verzögern, in unserem Beispiel um mehr als ein Jahr von der Siegerehrung bis zur Bestellung und

Lieferung der Beleuchtungsanlage. Projektanpassungen und kleinere technische Änderungen am Produkt machen Bereinigungen vor der Installation notwendig. Danach erfolgt die Bestellung, Lieferung, Installation und Inbetriebnahme der ganzen Anlage.

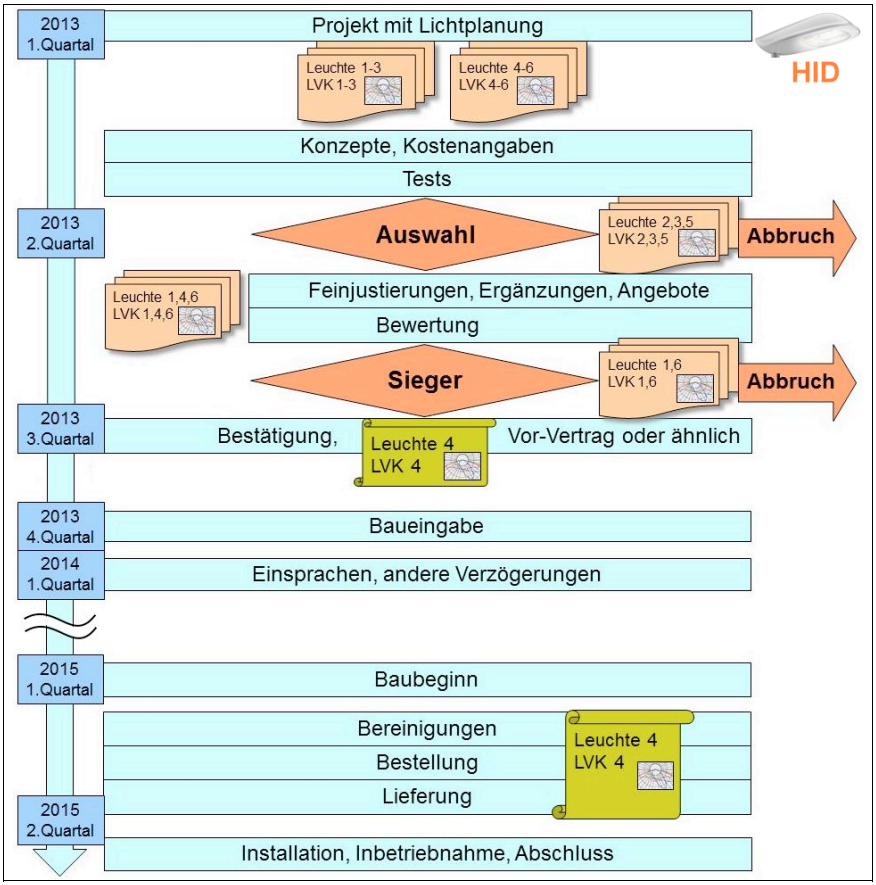


Abb. 4: Projektablauf mit konventionellen Leuchten

2.2 Projektablauf mit LED – Strassenleuchten und Zusatz-Aufwand

Nehmen wir an, das gleiche Projekt wird nun statt mit konventionellen mit LED-Strassenleuchten durchgeführt. Das beginnt wie bei konventionellen Leuchten: Nach den gleichen Phasen wird eine Siegerleuchte bestimmt – als Beispiel wieder die Leuchte 4. Das Projekt verläuft nun bis zum Baubeginn gleich wie vorher: Nach einer Verzögerung darf der Leuchtenhersteller 4 nach den Bereinigungen liefern. Leider hat sich aber inzwischen seine Leuchte geändert: Ein Upgrade sorgt dafür, dass weder die Bauform, noch der Lichtstrom, noch die LVK und noch die Leistung mit dem übereistimmt, was der Leuchte zum Sieg verholfen hat. Weichen diese Parameter stark von der ursprünglich eingereichten Leuchten-Version ab, muss das Projekt

abgebrochen und neu gestartet werden. Bei einer Neubeurteilung und einem Neustart ist es durchaus möglich, dass dieser Leuchtenhersteller 4 nicht mehr berücksichtigt werden kann, da seine geänderte Leuchte zu stark von den Projekt-Vorgaben abweicht. Befinden sich die neuen Parameter in einem vertretbaren Rahmen, muss die Lichtplanung komplett überarbeitet werden, allfällige Tests sind zu wiederholen, das Angebot wird neu eingereicht. Nach einer erheblichen Zeitverzögerung kann die Lieferung und Installation schliesslich erfolgen.

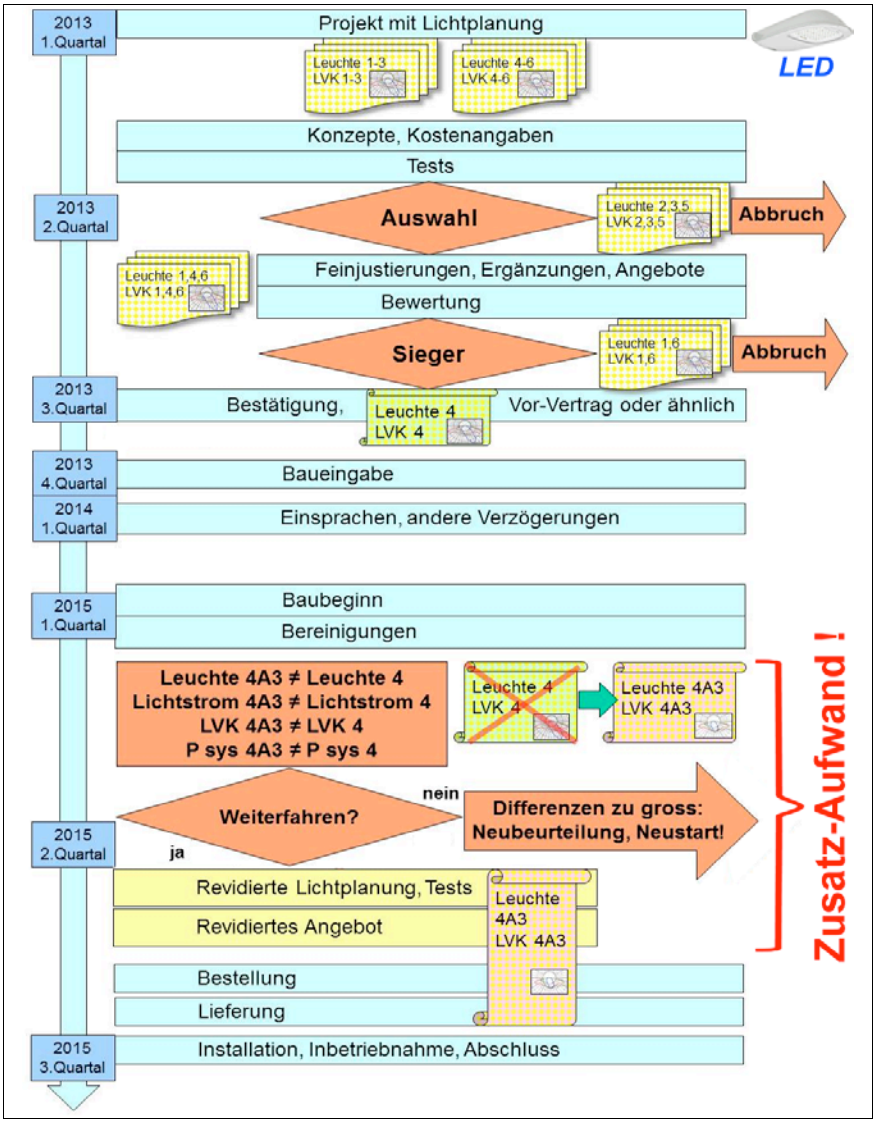


Abb. 5: Projektablauf mit LED – Leuchten und Zusatzaufwand

2.3 Mögliche Standardisierung von Leuchten-Parametern

Das Beispiel zeigt: LED bringt neue Herausforderungen! Da die Angebote und Lieferungen zeitlich stark unterschiedlich sein können, braucht es Konstanten und Variablen, um den gleichen Projektfluss wie bei konventionellen Projekten zu gewährleisten. Da sich bei den konventionellen Leuchten die Parameter nicht so schnell ändern war es bisher kein Thema, neben den üblichen Standard-Komponenten wie Leuchtmittel, Vorschaltgerät und Optik über andere Kriterien zu sprechen.
Bei der LED-Technik geht die Entwicklung nun derart schnell, dass die Hersteller gefordert sind: Upgrades sollten auf eine Weise erfolgen, so dass sie für den Markt verkraftbar werden. Die Leuchtenbauform, der Lichtstrom und die LVK müssen nach der Vergabe im Projekt eingefroren werden können, d.h. der Leuchtenhersteller muss sich verpflichten, diese Parameter auch bei viel späterer Lieferung einhalten zu können. Die Konstanten K1 – K3 sollten in einem eng spezifizierten Rahmen bleiben, mögliche Abweichungen könnten sein:

K1: Bauform und –Grösse mit Fertigungstoleranzen
K2: Lichtstrom -5% / +5%
K3: LVK – Wirkungsgrad-Verbesserung möglich, sonst übliche Messtoleranzen

Die einzige Variable, die zulässig ist, ist die Systemleistung: Diese darf sich nach unten beliebig verändern.

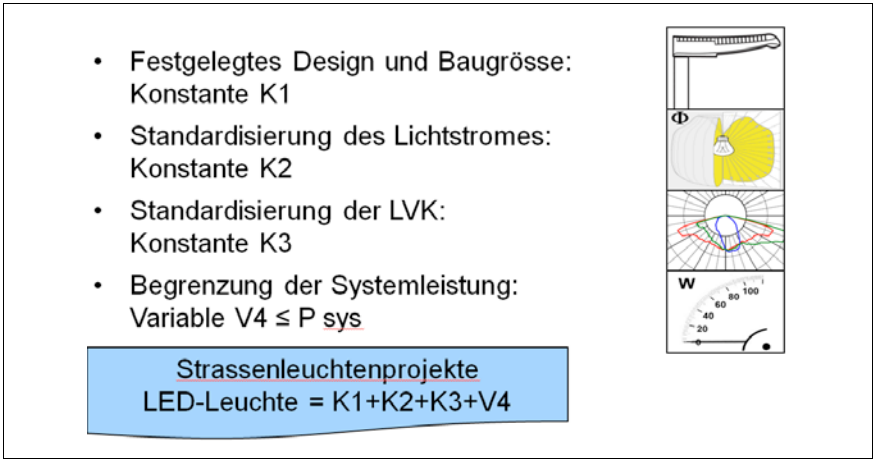


Abb. 6: Mögliche Standardisierung von Leuchten-Parametern mit Konstanten und Variablen

2.4 Projektablauf mit LED – Strassenleuchten und standardisierten Leuchtenparametern

Sind die vier wichtigsten Kriterien bei der Leuchtenauswahl und nach der Vergabe festgelegt, gleicht sich der Projektablauf wieder an den Ablauf mit konventionellen Leuchten an: Der Planer und Bauherr muss sich nach der Leuchtenwahl nicht mehr um Änderungen kümmern, bei Baubeginn wird diese Leuchte sich nur in der Systemleistung verändert haben. Werden in einer ersten Projektphase LED-Leuchten mit den Konstanten K1, K2 und K3 eingereicht, beträgt zum Beispiel die Variable V4 85W als Systemleistung. Das Angebot enthält nun im Angebotstext der Leuchte neben anderen Angaben eine klar definierte Bauform mit Angaben der Dimensionen (K1), eine

klar definierte Lumenzahl in Lumen (K2), die Optik mit der LVK-Bezeichnung (K3) und die Angabe für die Systemleistung ≤ 85W (V4). Bei der Lieferung sind alle Angaben wieder vorhanden, die Systemleistung kann jetzt aber z.B. 75W betragen.

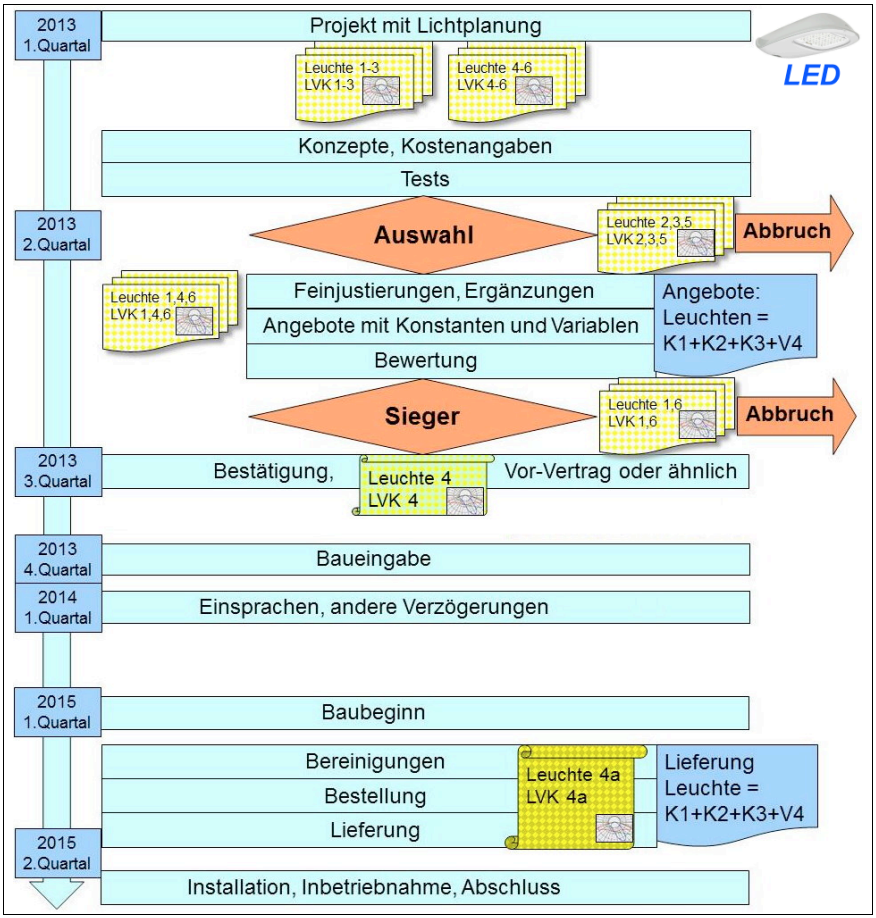


Abb. 7: Projektablauf mit LED – Leuchten und standardisierten Leuchtenparametern

2.5 Fazit

LED in der Strassenbeleuchtung bringen viele Vorteile. So ist zu erwarten, dass die Effizienz in Kürze doppelt so hoch sein wird wie die beste konventionelle Technik. Die Herausforderungen stecken im Tempo der Änderungen: Die Upgrades müssen gut aufgegleist werden, so dass der Markt mit Konstanten und Variablen arbeiten kann, die überblickbar und einfach handhabbar sind. Der erste Schritt in die Zukunft ist getan, der zweite Schritt wird folgen!

Rahmenpläne für Stadtbeleuchtung – Quo Vadis?

Dennis Köhler, Dipl.-Ing. Arch. M.Sc.
FH Dortmund – Forschungslinie „Licht_Raum“, Emil-Figge-Str. 40, 44227 Dortmund
dennis.koehler@fh-dortmund.de; www.fh-dortmund.de/Licht-Raum

1 Hintergrund

Seit einiger Zeit sind vielfältige Begriffe für ein Planungsinstrument in Verwendung, das die strategische Lichtentwicklung der Kommune langfristig zu orientieren versucht: „Lichtmasterplan“, „Masterplan Licht“, „Lichtplan“, „gesamtstädtisches Lichtkonzept“, „Beleuchtungskonzept“, „Stadtlichtplan“ oder „Lichtleitplan“. Der zunehmende Rückgriff auf eine solche Plangrundlage kann als ein nachvollziehbarer Schritt der Verwaltungen gesehen werden, da der programmatischen Entwicklung des Stadtlichts bis zur Jahrtausendwende vergleichsweise wenig Aufmerksamkeit geschenkt wurde. Seitdem ist der kommunale Handlungsdruck jedoch immer größer geworden, da die Marktetablierung licht- bzw. betriebstechnischer Innovationen (z. B. LED-Produkte), der politisch beförderte Ansporn zur Umrüstung (Sanierungsprogramme bei Bund und Ländern), der Auslauf der betriebsüblichen Nutzungsdauer eines Großteils der Leuchtstellen und auch die Neuordnungsmöglichkeiten der Straßenbeleuchtungsverträge aufgrund auslaufender Konzessionen in den letzten Jahren zeitlich zusammenfallen. Gleichsam mit den Motiven der Kostenreduktion wird der Anspruch an attraktive und durch zusätzliche Illuminationen aufgewertete Stadtansichten immer größer, sodass Stadtgestaltung mit Licht ein Faktor kommunaler Stadtentwicklung und Wirtschaftsförderung geworden ist. Um in dieser heterogenen Motivationslage eine strategische Perspektive herauszuarbeiten, liegt die Idee eines Masterplans – als bekanntes Instrument informeller Stadtplanung – besonders nah. Die Qualität eines solchen Planungsinstruments, in dem das Verfahren zur Aufstellung im Allgemeinen nicht definiert ist, wird jedoch beim Planungsgegenstand Licht unbefriedigend reduziert und endet häufig in unpraktikabler Willkür. Neben einer breiten Menge unterschiedlichster Professionen, die zur Aufstellung beauftragt werden, ist auch eine typische Zuordnung zu einem Verwaltungsbereich nur schwer auszumachen.

Kommunale Lichtplanung steht nunmehr an einem Scheideweg notwendiger Qualifizierung. Mangelhafte Inhalte und Ergebnisse der Praxis geben Anlass für die kritische Analyse eines außerordentlich wichtigen aber unreflektierten Instruments. Nach Jahren der Forschung zur kommunalen Lichtplanung bezieht sich dieser Beitrag auf eine Befragung der Dortmunder Forschungslinie „Licht_Raum“. Hier wurden ca. 4.500 Städte und Gemeinden Deutschlands gebeten, ihre Erfahrungen und Erwartungen zur kommunalen Lichtplanung auszutauschen (Rücklaufquote 16,2 %). Abgerundet wird die Sichtweise durch die eigene Praxis, die auf den Planungen für die nordrhein-westfälischen Städte Lüdenscheid (2009), Dortmund (2010) und Castrop-Rauxel (2011) beruht.

2 Rückblick

Seit Ende der 1980er Jahre erstellt eine immer größer werdende Anzahl von Städten Lichtkonzepte und beruft sich dabei nicht selten auf die Bemühungen der Städte Lyon in Frankreich oder Edinburgh in Schottland – mittel- oder unmittelbar (vgl. ILE 2005: 24). Einst im Versuch ihr stadthistorisches Erbe mit Hilfe von Plänen und strategischen Programmen zu illuminieren – um nicht zuletzt eine durch Öl- und Energiekrisen fast vergessene Praxis der Tourismusförderung und Imagegenerierung mit

kunstlichtbegründeter Architekturästhetisierung wiederzubeleben –, wurde ihnen früh eine „Avantgarde-Position“ (Deleuil 2006: 92) zugeschrieben. Werden die wirklichen „Avantgardisten“ der strategischen Stadtlichtplanung wie z. B. Gamma (1934), Kurilko (1962) oder Reichow (1959) vernachlässigt, kann dieses Privileg gar annähernd bestätigt werden (vgl. Köhler, Walz 2012: 110). Denn was bei den „Experimenten“ Lyons oder Edinburghs durchaus zutreffend erscheint, ist die Tatsache, dass das Thema Licht in der Stadt mit diesen Initiativen eine europaweite Aufmerksamkeit in den kommunalen Verwaltungen erhielt und in diesem Zusammenhang durchaus von der Gründung einer „Lichtpolitik“ gesprochen werden kann, „die es ermöglichte, auf lange Sicht (...) konkrete Handlungen und entsprechende Investitionen festzulegen“ (Narboni 2006: 10).

3 Status Quo

Unter den o. g. Mantelbegriffen lassen sich so bis heute unterschiedlichste Ansätze und Praktiken finden, die einen perspektivischen Umgang mit dem Stadtlicht versuchen. Bezogen auf die Ergebnisse der Umfrage haben ca. 500 Kommunen eine bestimmte Strategie oder Maßnahme im breiten Handlungsfeld Stadtbeleuchtung entwickelt. Dabei besitzen nach eigener Angabe annähernd die Hälfte der Städte und Gemeinden sogar einen umfassenden Rahmenplan. Für einen exemplarischen Überblick lassen sich folgende Planungstypen gruppieren:

- *Rahmenplan*, der die Gesamtstruktur der Stadt (zumeist jedoch nur das Zentrum) betrachtet und konzeptionelle Schwerpunkte oder Themenbereiche verortet. Dabei wird das Stadtgebiet entlang exponierter Einzelobjekte wie Brücken, hohen Gebäuden (usw.) sowie Bereichen wie z. B. Kern- oder Quartiersbereiche gegliedert. Ca. 34 Prozent aller deutschen Kommunen würden ihren Rahmenplan diesem Planungstyp zuordnen und folgen somit dem schweizer Beispiel des „Plan Lumière“ der Stadt Zürich. Bei dieser Planung wurden Eingriffsgebiete nach politischen und städtebaulichen Kriterien ausgewiesen, in denen Lichtprojekte eingerichtet werden sollen. In einem zweiten Schritt wurde ein Handbuch entwickelt, das konkrete lichttechnische und -gestalterische Empfehlungen ausspricht. Über eigens entwickelte Bewilligungsverfahren und Programme soll die Zusammenarbeit der unterschiedlichen (privaten) Lichtakteure verbessert und eine dementsprechende Qualitätskontrolle vorbereitet werden (vgl. Zürich 2004, 2007).

- *Leitthemenplanung*, die mit Licht zu gestaltende Orte und Objekte aufgrund übergeordneter Gemeinsamkeiten gruppiert. Die Maßnahmen beschränken sich zumeist auf gestalterische Zusätze, d. h. schließen Straßen- und/oder Werbelicht von der unmittelbaren Planung aus oder beziehen sich darauf lediglich nachrichtlich. Als Beispiel kann die Stadt Düsseldorf dienen. Im Rahmen dieses Konzeptes wurden Leitthemen entwickelt, wobei in einem Plan verortete Situationen mit Licht aufgewertet werden sollen. Mit Simulationen werden angestrebte Zwischen- und Endzustände gezeigt. In einem zweiten Schritt wurde mithilfe einer Satzung versucht, die Qualitätskontrolle auf Dritte auszuweiten (vgl. Düsseldorf 2003).

- *Gestalterisches Beleuchtungskonzept* mit Schwerpunkten zur Illumination stadtkulturell bedeutsamer Bauwerke, Ensembles und Stadtplätze. Durch Inszenierung stadtbildprägender Gebäude und Objekte (zumeist Denkmäler) wird versucht, die Präsentation und Bedeutung einzelner Stadtfragmente

hervorzuheben. Etwa sieben Prozent der deutschen Kommunen weisen eine Planung dieser Art aus. Als Beispiel kann das Beleuchtungskonzept der Innenstadt von Köln angeführt werden. Hier wurde nach der Ausarbeitung eines Leuchtenkonzepts ein Beleuchtungskonzept erstellt, um das Erscheinungsbild des Kölner Innenstadtpanoramas bei Nacht hervorzuheben (vgl. Stadt Köln 2000: 2ff).

- *Prozessorientierte Lichtentwicklung*, bei der die jeweils einzelnen Lichtgestaltungsprojekte ohne Plangrundlage nach Mittel und Vermögen Fortführung finden, wie z. B. in der Stadt Castrop-Rauxel. Nachdem erste Lichtgestaltungen im öffentlichen Raum dauerhaft installiert wurden, folgten im Rahmen von politischen Sonderprogrammen der Stadtentwicklung weitere temporäre Inszenierungen, die später und aus der Veranlassung ansässiger Kaufleute und Immobilienbesitzer heraus vereinzelt umgesetzt wurden (vgl. ISG Castrop Altstadt o. J.: 4). Nach weiterer Sensibilisierung folgte später die Beauftragung zur Erstellung eines stadtweiten, übergeordneten Konzepts.

- *Lichtkoordination* oder *Lichtmanagement* von Einzelobjekten mit Moderations- oder Beratungsangeboten. Ein strukturelles Konzept wird nicht auf einer Plangrundlage entwickelt, sondern konstituiert sich selbstständig aus einzelnen Aktionen. Der Schwerpunkt liegt ausschließlich auf Lichtgestaltung. Die Befragung zeigte, dass nur wenige Städte und Gemeinden ihre Planung in dieser Form konzipieren (2 %). Als Beispiel kann die im Jahr 2001 eingerichtete Lichtkoordination der Stadt Essen dienen. Ein Projektbüro koordinierte hier die Maßnahmen zur Durchführung oder Pflege von Lichtprojekten im Rahmen eines Kulturpfads. Die Projekte wurden nach und nach in einem Plan verortet (vgl. Brdenk, Yaldizli 2008: 25).

4 Bewertung

4.1 Stadtgestalterischer Fokus und defizitäre Methoden

Hinter der wohlwollend systematisierten Gruppierung verschiedener Planungstypen verbirgt sich in der genaueren Studie des einzelnen Plans ein hoher Grad wechselnder Qualität. Gemeinsamkeiten lassen sich dabei auf zwei Punkte reduzieren: Der instrumentelle Charakter schafft es zum einen nur selten, wenn überhaupt nur sehr fragil, über den Status einer informellen Kommunikationsgrundlage hinaus und lagert sich dabei sehr inkonsequent in die alltäglichen Entscheidungsprozesse der Kommunen ein. Zum anderen unterliegen die Inhalte einem hohen Maß planerischer Willkür, was sich insbesondere in der räumlichen Verortung der Lichtobjekte und -projekte verdeutlicht. Denn methodisch sind sich viele Ansätze einig und so „(...) lassen sich durch gleiche Leuchtenformen und Lichtfarben wichtige Raumsequenzen herausheben, das heißt »Wege« unverwechselbar machen, »Bereiche« abgrenzen, »Brennpunkte« unterstreichen, »Merkzeichen« darstellen“ (Trieb 1977: 189). Just mit dieser Aussage übertrug Michael Trieb die Vorstellung der Stadtwahrnehmung, die durch Kevin Lynch 1961 vorgestellt wurde, in die städtische Lichtgestaltung – und damit eine Vorstellung, die sich im Laufe der Entwicklungsgeschichte städtischer Lichtmasterpläne durch konsequente Iteration von Planern konsolidierte, die in einer Zeit ausgebildet wurden, in der sich der Raumbegriff ehedem auf die gebaute Umgebung reduzierte.

Für die Produktion schneller Ergebnisse scheint eine solche Vorgehensweise zunächst recht pragmatisch. Doch selbst bei dieser Oberflächlichkeit „drängen sich Fragen (...) auf:

Welche Straßen sind hell zu beleuchten und welche weniger hell? Welche Straßenräume und Plätze sind durch Licht zu betonen, welche nicht?“ (Markelin 1991: 235). Statt eine erkenntnistheoretisch umfassende Antwort auf diese Frage einzufordern, überwog der zu stillende Bedarf an lukrativen Praxisplanungen. Es genügte schlichtweg, die sichtbare Stadtstruktur in beliebiger Vorstellung der Entwerfenden mit Licht zu überhöhen, statt die Lichtverwendung an die vielförmigen Vorstellungen der Bewohnerschaft mit all ihren Bedarfen und Erwartungen auszurichten. Hat sich die allgemeine Urbanistik von einem solchen, auf die dingliche Form reduzierten Stadtbegriff weitgehend emanzipieren können, erfreut sich diese Herangehensweise einer ungebrochenen Popularität entlang der bisher vorgelegten Lichtkonzepte, bei denen sich die Behauptungen von zu stiftender Identifikation, Atmosphäre und Orientierung mit szenisch gesetztem Licht an menschenlosen Gleisfeldern, Uferbereichen, Kirchtürmen oder Brücken konkretisiert.

4.2 Inhaltliche Verschiebung und Reduktion

Es darf behauptet werden, dass die Wurzeln kommunaler Lichtplanung in dem Bestreben liegen, unwirtliche Stadträume mit einem politisch legitimierten Finanzierungsprogramm zu ästhetisieren. Die Inhalte schafften es dabei nur selten über eine Ästhetik lichtvisualisierter Einzelobjekte oder heller Punktfolgen in geschwärzten Stadtgrundrissen hinaus. Die Wirklichkeit aus Werbe- und Funktionslicht blieb eher hinter substanzlosen Phrasen einer irgendwie gearteten Maßregelung zurück. So gerät der kommunale Wunsch nach Rahmenplänen, die Licht zum Thema der Stadtgestaltung machen, seit einiger Zeit zu recht ins Stocken. Mit den substanzlosen und lediglich über theoretische Beschwörungen aufgeladenen Planungen wurde zum einen klar, dass die Steuerungskomplexität der Stadtlichts weit mehr benötigt, als einen Vorsatz, der mit computergenerierten Silhouetten nächtlich illuminierter Städte befördert wird. Zum anderen versuchte die gestalterische Willkür in einen Handlungsbereich einzugreifen, der nicht auf Straßenhierarchisierung durch veränderte Lichttemperaturen gewartet hatte (zum Vergleich solcher Problematik in Großbritannien vgl. ILE 2005: 29). Vielmehr staute sich ein Druck in den Disziplinen des Tiefbaus, der sich infolge bundesrepublikanischer Subventionspolitik mit einem Mal durch Fördergelder entlang hoch verschuldeter Kommunen löste. Kommunen konvertierten zu prämierten Modellstädten, deren „überragende Leistung“ darin bestand, ihre konstante und konsequente Arbeit im Bereich Infrastrukturplanung lange Zeit vernachlässigt und Lichtkompetenzen an Großunternehmen abgetreten zu haben, um mit Auslobung entsprechender sog. „Wettbewerbe“ einen Quantensprung von Quecksilberhochdruck auf LED zu unternehmen (vgl. http://www.bundeswettbewerb-stadtbeleuchtung.de).

Der vergleichsweise plötzliche Fokus auf eine subventionierte, in irgendeiner Art innovative Straßenbeleuchtung überschwemmte sämtliche Planungen, die z. B. das gelbe Licht der Natriumdampflampe bis dato nur als orientierendes Mittel zur Straßendifferenzierung vorschlugen. Was hierbei massiv alle Fragen von Lichtqualität im Raum verschlang, ist die Reduktion der beleuchteten Stadt auf eine rein ökonomische Größe und der ausschließliche Fokus auf den Handlungsbereich Straßenbeleuchtung. Die von privaten Wirtschaftsprüfagenturen (vgl. pwc 2010) oder gemeindlichen Prüfanstalten praktizierte Methode des sog. „Benchmark“ erweckt nunmehr den Anschein einer Vergleichbarkeit von Aspekten, die weder ökonomisch verkürzt werden dürfen, noch interkommunal verglichen werden können. Doch auch wenn unterschiedlich basierte Kommunalvergleiche von Straßenlängen und Kilowattstunden oder Einwohnerzahlen und Leuchtstellen keine Aussagen zum qualitativen Grundverständnis von Licht in der Stadt

zulassen, fallen die wagen Kenngrößen im kommunalpolitischen Raum auf fruchtbaren Boden und produzieren unhaltbare Begehrlichkeiten durch Wahrheit behauptende Kennzahlen. Die daraufhin abgestellten Handlungsempfehlungen kennen so gut wie nur eine Lösungsformel: eine unhinterfragte, technische Bestandserneuerung. Selbstredend muss es zu einer effizienten Art der Energienutzung kommen, doch ist diese nicht ausschließlich mit einem 1:1 Wechsel der Leuchten, Lampen und Vorschaltgeräte oder einem beliebigen dreh am Dimmer zu beantworten (vgl. Köhler, Sieber 2011). Was zudem hinter den Werten des „Benchmarks" zurückbleibt, ist der Rückschluss auf Aspekte der Lichtquantität. Und so nützt der Verfahrenssicherheit die blanke Behauptung der vermeintlichen Einhaltung irgendwelcher Normwerte. Gewiss hat die konstruktive Auseinandersetzung mit den „anerkannten Regeln der Technik" eine gewisse Relevanz, doch darf die Auseinandersetzung mit Licht damit weder beginnen noch enden – insbesondere dann nicht, wenn gemeinhin bekannt ist, dass diese auf den wenigsten Straßen eingehalten werden. Eines sei am Rande bemerkt: Würde die aktuelle Normempfehlung als wirkliches Ziel nachweislich Umsetzung finden, wäre die sektorale Energieeinsparung gar nicht einlösbar und ökologische sowie kulturelle Konsequenzen (Bspw. „Lichtverschmutzung" usw.) verheerend.

5 Umrisse des Lösungswegs

An dieser Stelle kann konstatiert werden, dass finanzielle und energetische Einsparungen aktuell die bedeutendsten Gründe zur Erstellung von Rahmenplänen sind und vor allen anderen Motiven stehen – insb. vor sozialen und demografischen sowie stadtgestalterischen Aspekten. Doch heißt das nun, dass der Bedarf an Straßenlicht, dem nach gestalterischer Inszenierung überwiegt? Oder das andere Aspekte der nachhaltigen Lichtnutzung (z. B. ökologische und kulturelle) nur als Lippenbekenntnisse hinter einer vermeintlich ökonomischen Lichtplanung verbleiben müssen? Nein, nicht wenn wir die Lichtnutzung an heutige und zukünftige Herausforderungen und Bedarfe der Gesellschaft anpassen möchten. Der Rahmenplan als Instrument zur nachhaltigen Lenkung des gesamten, auf einander abgestimmten Stadtlichts benötigt dazu eine querschnittsorientierte Planungsbasis und eine integrierende Ausführung.

Die ganzen zuvor genannten Anstrengungen wären besser aufgehoben, wenn qualitative Lichtbedarfe entlang politisch legitimierter Raumkriterien benannt würden. D. h. Dunkel- und Lichtbedarfe, die auf fundierten Informationen von Betroffenen, ihren Zeiten, Nutzungen und Erwartungen im Raum beruhen. Die grundlegende Formel ist dabei recht einfach: Was ist wann und wo für wen und auf welche Bedarfe hin zu beleuchten oder eben nicht zu beleuchten? Und dann: Mit welchen technischen, betriebs- oder raumorganisatorischen Mitteln ist das Ziel in kurz-, mittel- oder langfristiger Perspektive erreichbar? Mit den heute zur Verfügung stehenden Erkenntnissen zur Lichtwirkung in der belebten und unbelebten Umwelt, die mit jüngsten unabhängigen Forschungsinitiativen immer deutlicher werden, und den heute zur Verfügung stehenden Rauminformationen über geografische Lokalisierung von Mensch und Tier im Zeitverlauf wird dann nahezu automatisch deutlich, welches Licht zur welcher Zeit und an welchem Ort „richtig" oder „falsch" wirkt. Und mit einer kommunalpolitischen Konkretisierung der Lichtquantität kann die Ausführungsebene verfahrenssicher agieren, ohne eine normgerechte Praxis behaupten zu müssen. Spätestens an diesem Punkt wird deutlich, dass sich die Rahmenplanung für städtisches Licht nicht überlebt hat oder sich in einzelnen Sanierungsprojekten auflöst, sondern ein neues Profil einfordert. Denn insbesondere mit voranschreitender technologischer Möglichkeit verlangt auch der noch so technische

Beleuchtungsakt nach einer qualitativen und ausgewogenen Zielperspektive, bei der ein ehrlicher Begriff von „Wachstum“ oder „Fortschritt“ nicht durch das Hinzufügen oder „Hellermachen“ von Licht an jedem Ort gleichgesetzt werden kann.

Für eine gezielte stadträumliche Integration des öffentlich wirksamen Lichtsystems müssen die lichtrelevanten „Schichten der Stadt“ berücksichtigt werden: dies sind zum einen die materiellen Raumstrukturen und zum anderen die immateriellen Bedeutungs-, Erwartungs-, Nutzungs- und damit verbundenen Zeitstrukturen. Das ressourcenschonende und gestaltwirksame Konzept der „integrierten Lichtleitplanung“ befasst sich dann mit den drei Handlungsbereichen „Lichtstruktur“, „Lichtkomposition“ und „Lichtwerbung“. Diese Begriffe nehmen Bezug auf die Steuerung einer qualitativen Grundbeleuchtung (Lichtstruktur) und auf eine besondere Akzentuierung und Raumkonstituierung mit Licht (Lichtkomposition) – dies wird in einzelnen Konzepten festgehalten. Die Lichtwerbung ist langfristig über Beratungs- und Kommunikationsprozesse kriteriengeleitet einzubinden und zuzuordnen. Unter kommunaler Koordination entsteht aus einem Zusammenschluss von Lichtstruktur und Lichtkomposition sowie der Lenkung der Lichtwerbung die „Lichtgestalt der Stadt“. Die Lichtgestalt ist dabei kein ästhetisiertes Produkt, sondern vielmehr ein handlungsorientierter Prozess – das Resultat der Abwägung ökologischer, ökonomischer, kultureller und sozialer Bedingungen (vgl. Köhler 2010: 182ff).

6 Kommunale Aufgabe

Das abendliche und nächtliche Lichtbild der Stadt wird heute von einer Vielzahl von Handelnden bestimmt, die zunächst in ihrer eigenen und einzelnen Bemühung stehen. Die anzustrebende Entwicklung muss jedoch von der gesellschaftlich legitimierten Kommunalpolitik bestimmt werden, die die Lichtverwendung an Grundsätzen der Nachhaltigkeit ausrichtet. Die Kommune benötigt dafür eine Selbstbindung, die über eine Plangrundlage konkretisiert werden kann. Jedoch ist weder der Instrumentenkanon noch die kommunale Anstrengung damit abgeschlossen. Denn das horizontal wirkende Straßenlicht ist über energetisch-ökologische Anforderungen hinaus in bestmöglichem Maße mit dem gemeinhin vertikal wirkenden Licht privater Akteure zu einer raumbildenden Beleuchtung zusammenzuführen. Der Weg zu einem dreidimensionalen Profil des umbauten Raums wird dabei besonders von der öffentlich-privaten Kooperation bestimmt. Hierbei tritt die Qualität der Plangrundlage zunächst in den Hintergrund, denn es wird ein kompetenter und extrem engagierter „Moderator“ notwendig. Ohne eine vermittelnde Person kann auch die beste Plangrundlage nicht greifen und private wie öffentliche Initiativen aktiv lenken, anregen oder auch unterbinden. Dabei ist die unermüdliche Geduld des Moderators von hoher Bedeutung, da jedes Maß der Lenkung gewiss auf Ablehnung stoßen wird – die Praxis der Lichtplanung und -gestaltung kannte bisher nur ein geringes Maß an Regulierung geschweige denn genehmigungspflichtiger Prüfung. Nicht zuletzt muss der Moderator in der fachkompetenten Lage sein, Disziplingrenzen diplomatisch zu überbrücken, da die harte Skepsis zwischen gestalterisch-künstlerischen und technisch-rationalen Akteuren gerade bei der Ausführung ganzheitlich angelegter Beleuchtung unmittelbar aufeinander trifft.

Die Umsetzung der Planung fordert lange Zeiträume ein und wird dabei vom technischen und gesellschaftlichen Fortschritt begleitet. Der materielle Ausbau öffentlicher Räume und die Nutzungsdauer der technischen Infrastruktur unterliegen langen, wirtschaftlich begründeten Zyklen. Die Konkretisierung von Empfehlungen in einem Plan muss somit von Prinzipien geleitet sein, um z. B. nicht mit der jeweils aktuell verfügbaren Technik zu

veralten. Insbesondere der technologische Fortschritt wird in den nächsten Jahren hochinnovative Möglichkeiten der Lichterzeugung und Handhabung in die breite Ausführung einbringen, die den stadträumlich nachhaltigen Umgang mit Licht vor neue Herausforderungen stellen werden. Hierbei sollte nicht die günstiger werdende Technik oder der dann aktuelle Zeitgeschmack die Art und Weise der Lichtnutzung bestimmen, sondern heute formulierten Zielen und Grundsätzen einer begründeten Lichtqualität folgen. Diese Bestimmung ist dabei weder starr noch unflexibel. Aufgrund des in der Gesellschaft immer bewusster werdenden Zusammenhangs von ökologischer und ökonomischer Verantwortung im Gemeinwesen und den sich verändernden Lebensweisen in sozialer und kultureller Hinsicht, wird Lichtnutzung in ihren positiven wie auch negativen Wirkungsweisen immer sensibilisierter wahrgenommen. Wir befinden uns dabei in einem steten Lernprozess über Umgang und Akzeptanz von Licht, was nicht zuletzt europäische Gesetzesinitiativen gegen die sog. „Lichtverschmutzung“ beispielhaft belegen. Und bezogen die Straßenbeleuchtung wird es mit Hilfe der Festkörperbeleuchtung erstmals möglich, Lichtquantitäten wirklich präzise einzustellen. Hierfür die „richtigen“, bzw. angemessenen Werte zu finden, wird noch ausreichend Forschungsarbeit verlangen.

7 Perspektive

Kommunen sollten sich bei Erstellung einer Rahmenplanung ihrer hieraus resultierenden Selbstbindung bewusst werden, die weit mehr einfordert, als die Darstellung zum Besitz eines Dokuments mit der Überschrift „Beleuchtungskonzept“ oder „Lichtmasterplan“. Die Planung als solche ist lediglich der Auftakt eines langfristig angelegten Entwicklungsganges. Bestenfalls einer integrierten Lichtleitplanung, die über eine fortentwicklungsfähige Kommunikationsgrundlage und einer legitimierten Institution bzw. einer die Umsetzung begleitenden Person gegründet ist. Neben einer Optimierung der Straßenbeleuchtung im Sinne ökologischer, ökonomischer und sozialer Aspekte der Nachhaltigkeit sind die Handlungsbereiche Lichtgestaltung und Lichtwerbung konsequent darin einzubinden. Da wir in den vergangenen Jahren beobachten konnten, dass das lichtbezogene Fachwissen den Kommunalverwaltungen in den vergangenen Jahrzehnten systematisch abhanden kam und nunmehr gleichsam vor komplexer werdenden Herausforderungen steht, sollte unseres Erachtens ein neuer Kompetenzaufbau stattfinden. Als Baustein zum Aufbau solcher Lichtkompetenz in den benannten Handlungsbereichen planen wir aktuell die Herausgabe eines Leitfadens für Kommunalverwaltungen. In diesem Leitfaden sollen praxisorientierte Methoden zur Optimierung aufgezeigt, umsetzungsorientierte Hinweise unterbreitet und ausführungsbegleitende Instrumente vorgestellt werden, um die Lichtentwicklung der Kommunen ganzheitlich zu qualifizieren.

8 Literaturhinweise

Brdenk, P.; Yaldizli, F. (Hg.) 2008: Licht.Stadt.Essen, Essen

Deleuil, J.M. 2006: Lyon: Weiterentwicklung des „Plan Lumiére“. In: Schmidt, A.J.; Töllner, M. (Hg.): StadtLicht – Lichtkonzepte für die Stadtgestaltung. Stuttgart

Gamma, Dr. 1934: Lichtarchitektur. In: Mächler, M. (Hg.): Deutsche Bauzeitung. Berlin

ISG Castrop Altstadt o.J.: ISG Castrop Newsletter – Die Erneuerung von Innen.

ILE – Institution of Lighting Engineers 2005: The Outdoor Lighting Guide. London

Köhler, D.; Walz, M. 2012: Viel Licht und starker Schatten – Zur Gestaltung von Stadt und Region nach Einbruch der Dunkelheit. In: Bohn, R.; Wilharm, H. (Hg.): Inszenierung der Stadt – Urbanität als Ereignis. Bielefeld

Köhler, D.; Sieber, R. 2012: Lichtmasterplan – Auf dem Weg zu einem zielführenden Instrument?. In: Professional Lighting Design, Nr. 82, Gütersloh

Köhler, D.; Sieber, R. 2011: Der Stadtraum zur Kunstlichtzeit – Positionen und Beobachtungen. In: Professional Lighting Design, Nr. 79, Gütersloh

Köhler, D. 2011: Stadtentwicklung und Lichtgestaltung – Hürden und Perspektiven. In: ders. (Hg.): bochum gerthe – licht zeit raum. Bönen

Köhler, D. 2010: Künstliches Licht im öffentlichen Raum als Aufgabe der Stadtplanung: Der Weg zu einer integrierten Lichtleitplanung. In: Köhler, D.; Walz, M. (Hg.): LichtRegion – Positionen und Perspektiven im Ruhrgebiet. Essen

Köhler, D. 2009: Artificially enlightened urban spaces at night – A matter of special importance for liveable cities. In: Széll, G.; Széll, U. (Hg.): Quality of Life & Working Life in Comparison. Frankfurt am Main

Köhler, D. 2008: Artificial Light in Urban Space. In: The international electronic scientific - educational journal, AMIT, 4/2008, Moskau

Kurilko, G.N. 1962: The visual analysis and design of city lighting. Boston

Landeshauptstadt Düsseldorf (Hg.) 2003: Lichtmasterplan Düsseldorf – Beiträge zur Stadtplanung und Stadtentwicklung in Düsseldorf.

Markelin, A. 1991: Die Stadt ins rechte Licht rücken. In: Flagge, I. (Hg.): Architektur-Licht-Architektur. Stuttgart

Narboni, R. 2006: Neue städtebauliche Lichtstrategien. In: Schmidt, A.J.; Töllner, M. (Hg.): StadtLicht – Lichtkonzepte für die Stadtgestaltung. Stuttgart

Pwc 2010: Ergebnisse der WIBERA Umfrage Straßenbeleuchtung – eine kommunale Aufgabe im Wandel. Düsseldorf

Reichow, H.B. 1959: Die Autogerechte Stadt - Ein Weg aus dem Verkehrs-Chaos.

Stadt Zürich, Amt für Städtebau (Hg.) 2004: Plan Luminére Zürich, Gesamtkonzept. Zürich

Stadt Zürich, Amt für Städtebau (Hg.) 2007: Plan Luminére, Das Beleuchtungskonzept.

Stadt Köln (Hg.) 2000: Beleuchtungskonzept für die Kölner Innenstadt 2000.

Trieb, M. 1977: Stadtgestaltung – Theorie und Praxis. Braunschweig

Vorschlag zu Kennzeichnung von LED-Außenleuchten

Dipl.-Ing. Norbert Wasserfurth , Prof. Dr. Paul Schmits
HAWK Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst,
Hildesheim/Holzminden/Göttingen, Fakultät Gestaltung, Kaiserstraße 43 – 45, 31134 Hildesheim

1 Problemstellung/ Hintergrund

In der Geschichte der Stadtentwicklung gab es schon immer eine sehr starke Verbindung zwischen den vorherrschenden Technologien und dem daraus resultierendem Stadtbild. Während im 19. Jahrhundert eine nächtliche Stadtlandschaft noch weitestgehend im Dunkeln lag, hat sich Verständnis und Haltung zu beleuchteten Straßen im Laufe der Zeit fundamental geändert.
Die Zeitintervalle von der Einführung der Öllampe bis hin zum Einsatz der LED-Technologie wurden stetig kürzer, die Entwicklungen der jeweiligen Technologien erfolgten immer schneller. Erst vor ca. 30-50 Jahren haben sich die Lichtplaner der Einführung der Hochdruck-Entladungslampen erfreut, welche auch in niedrigen Wattagen eine Feindosierung der Leistung sowie der Lichtmenge ermöglichte. Heute, im Jahre 2012 ist bereits die Technik der LED-Leuchte auf einem starken Vormarsch und nimmt auch in der Stadtbeleuchtung eine immer größere Rolle ein.
Die Einführung jeder neuen Technologie brachte neuartige und revolutionäre Gedanken mit sich. Beispielhaft dafür ist die Entwicklung der Bogenlampe im Jahr 1885, die dazu beitrug das Licht "demokratisch" in die Stadt zu tragen. Für die Bürgerinnen und Bürger brachte das eine ganz neue zeitliche Dimension mit sich und die Gedanken der Industrialisierung mit einer stetigen Effizienzsteigerung wurden in die Tat umgesetzt.

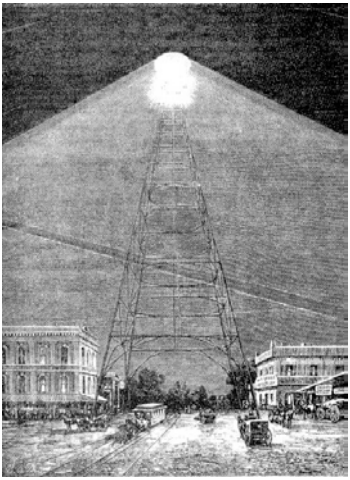


Abb. 1: Lichtturm Californien (San José 1885)

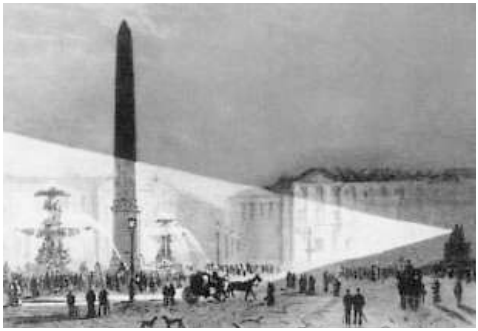


Abb. 2: Bogenlicht auf dem Place de la Concorde (1844)

Abb. 3: Berlin Hermannplatz 1929

Einer der nächsten Schritte in der Weiterentwicklung der Lichttechnologie im Stadtbild konnte im frühen 20. Jahrhundert verzeichnet werden. Besonders bei der Weltausstellung in Paris im Jahr 1900, sowie während der Lichtwoche in Berlin 1928 wurden erste Akzente hinsichtlich Architekturbeleuchtung gesetzt. Herausragende Bauwerke, wie der Eifelturm oder die Berliner Gebäude, wurden erstmals mit Licht geschmückt, wurden im Stadtbild sichtbar und erhielten somit auch bei Nacht einen besonderen Stellenwert.

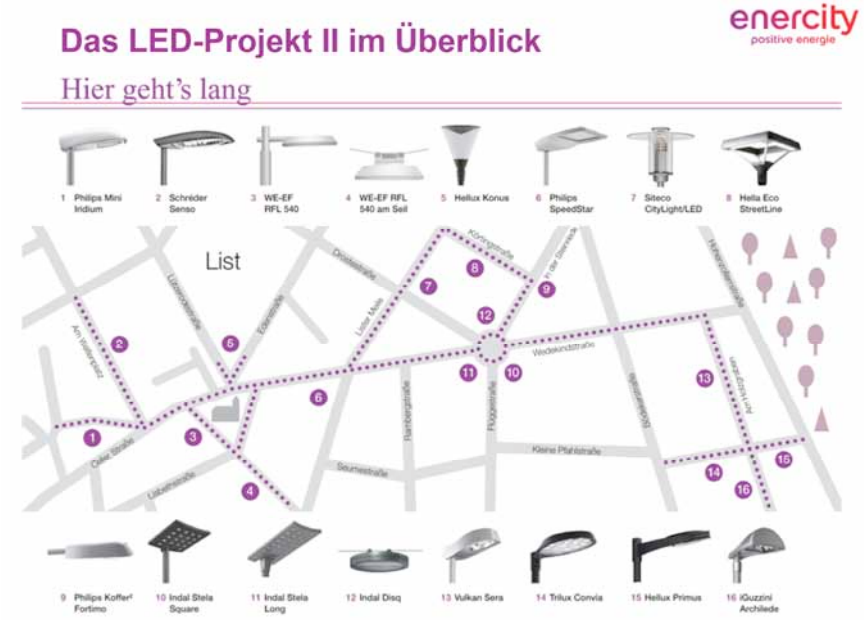
Der neu errungene Stellenwert des Lichtes im Stadtbild wurde jedoch in den 1930/40er Jahren zu weiterreichenden politischen Zwecken missbraucht und erhielt dadurch in der Nachkriegszeit einen faden Beigeschmack. Opulente und imposante Lichtinstallationen waren daher bis weit in die Nachkriegsgeschichte wenig angesehen und wenig verbreitet.
Da in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts der Autoverkehr stetig zunahm und sich in dem Zuge die Stadtlandschaften durch immer mehr Straßen veränderte, wurden hier neue Anforderungen an eine nächtliche Beleuchtung gestellt.

Neben technischen Kriterien rückten auch Gesichtspunkte der Beleuchtung in den Vordergrund, die die Wahrnehmung und Ästhetik und Emotion berücksichtigen.
Gütemerkmale, wie die Sehkomfort (Farbwiedergabe, harmonische Helligkeitsverteilung), Sehleistung (Beleuchtungsniveau, Blendungsbegrenzung) und visuelles Ambiente (Schattigkeit, Lichtfarbe, Lichtrichtung) wurden immer stärker gewichtet und stellten komplett neue Anforderungen an die Beleuchtungskomponenten und ihre Systeme.

Jeder Quantensprung in der technologischen Entwicklung, wie das Beispiel aus San José zeigt, brachte auch neue, manchmal visionäre Ideen für Lichtgestaltung in den Städten mit sich. Im Vergleich hierzu waren die stadtgestalterischen Innovationen die mit der Einführung der LED einher gingen von bescheidener Natur. Die Produktentwickler und Lichtgestalter konzentrieren sich vorwiegend auf die technische Optimierung des Systems aus Leuchte und Mast, nicht so sehr auf die raumgestalterischen Aspekte im Stadtbild. Eines der wichtigsten Argumente zum Einsatz von modernen LED-Außenleuchten liegt in der Effektivität der Ausleuchtung der Fahrbahn und es wurden dahingehend gute Ergebnisse erzielt. Bei dem Einsatz ein und desselben Produktes in unterschiedlichen Stadtgebieten kann sich der Vorteil jedoch sehr schnell als Nachteil herausstellen. Dass

das fehlende Streulicht das nächtliche Stadtbild entscheidend verändert, wurde eindrucksvoll in dem LED-Projekt der Enercity in Hannover gezeigt.

Die Stadt Hannover sowie der städtische Energieversorger Enercity haben in einem gemeinsamen Projekt zur Erneuerung und Effizienzsteigerung der Straßenbeleuchtung auf das Thema LED-Technologie gesetzt. In einem Praxistest wurden in einem Stadtteil exemplarische Straßenräume mit der neuen Technologie ausgeleuchtet. Bei der Wahl der Leuchten wurde auf Kriterien wie Praxistauglichkeit, Serienprodukte sowie ein wirtschaftlicher Kostenrahmen besonders Wert gelegt. Weiterhin wurden Hersteller ausgewählt, die sich auf dem Markt der Straßenbeleuchtung bereits durch langjährige Erfahrungen und Fachkompetenz auszeichnen.



Das Projekt wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit (Henrik Nolte) an der HAWK Hildesheim untersucht und ausgewertet. Als eines der ersten Ergebnisse dieser Arbeit entstand eine Fotodokumentation, die die Stadträume fotographisch vor und nach der Umrüstung darstellt. Besonders stark wurden die Veränderungen in der Parkanlage und im Straßenraum des Welfenplatzes sichtbar (vgl. Abb. 3 und 4). Beide Beispiele zeigen eindrucksvoll wie das Stadtbild durch den Wegfall des Streulichtes verändert wird.
In der Parkanlage erstreckt sich neben der Neuanlage mit dem hell ausgeleuchteten Fußweg eine dunkle und fast bedrohlich erscheinende Landschaft, die als neuer Angstraum wahrgenommen wird. Bezüglich des Sicherheitsaspektes in der nächtlichen Stadtlandschaft kann hier eher ein Rückschritt verzeichnet werden, denn diese Angsträume gilt es in der Stadtplanung zu vermeiden.

Das zweite Beispiel zeigt einen deutlichen Unterschied zwischen der Alt- und Neuanlage in Bezug auf die Sichtbarkeit der Fassaden. Diese bilden für den Welfenplatz eine eindrucksvolle und atmosphärische Umrahmung und sollten auch in den Abendstunden

diese Funktion erfüllen. Die "effiziente Beleuchtung" verhindert daher aus ästhetischer Sicht die Aufenthaltsqualität dieses Stadtraumes.

Abb. 4: Vergleich Beleuchtungswirkung Alt- (li) und Neuanlage (re) in der Parkanlage Welfenplatz

Abb. 5: Beleuchtungswirkung Alt- (li) und Neuanlage (re) im Straßenraum Welfenplatz

Zusammenfassend ist zu sagen, dass der Einzug der LED-Technologie in die Straßenbeleuchtung hinsichtlich der Energieeffizienz einen deutlichen Zugewinn bedeutet. Durch die Konzentration auf die technologischen und ökonomischen Werte traten jedoch stadtgestalterisch wichtige Aspekte in den Hintergrund. Schwachstellen sind immer noch in den Punkten wie Sicherheitsgefühl und Stadtbild zu verzeichnen.

2 Zielsetzung

Das Projekt in Hannover zeigt deutlich, dass der Übergang zur LED-Lichttechnik nicht nur die Sehgewohnheiten und das Stadtbild verändern wird. Er erzwingt so auch neue Kriterien der Leuchtenwahl für unterschiedliche Einsatzgebiete.

Der Anwender wird mit einer Vielzahl von neuen Formen, Techniken sowie ökologischen und ökonomischen Aspekten konfrontiert. Alte Beurteilungskriterien für die Stadtlichtplanung passen nicht mehr auf die neue LED-Technologie, sodass eine Neuorientierung dahingehend notwendig ist. Aus Sicht des Stadtlichtplaners besteht die Gefahr das nächtliche Stadtbild negativ zu beeinflussen. Um dieser Gefahr entgegenzutreten und grobe Fehler in der Planung zu vermeiden ist eine einfachere Prozedur der Vorselektion der Produkte vorzunehmen.
In Anlehnung an die drei Grundfunktionen des Lichts nach Richard Kelly aus den 1950er Jahren werden zusätzliche Kennzeichnungen der Außenleuchten vorgeschlagen, die sich wie folgt gliedern:

Name Kategorie	Funktion	Anlehnung an die Grundfunktion Licht (nach R. Kelly, 1950)
ROAD LIGHT	Leuchten für Fahrbahnbeleuchtung	Ambient light "Licht zum Sehen"
LIVING LIGHT	Leuchten für Wohn- und Stadtgebiete	Focal glow "Licht zum Hinsehen"
CITY LIGHT	Leuchten für Zentren und öffentliche Flächen	Play of Brilliance "Licht zum Ansehen"

Tab. 1: Neue Kategorien für die Klassifizierung der LED-Technologien

Im Rahmen seiner Bachelorarbeit untersuchte Herr Nolte die Lichtwirkung der neuen Lichtanlagen hinsichtlich deren Interaktion mit dem Fassaden, in dem das Verhältnis zwischen der Fahrbahn-Leuchtdichte (Feld 1 Abb. 6) und der Leuchtdichte des unteren und oberen Fassadenbereiches (Feld 2 und 3 Abb. 6) gemessen und im prozentualen Verhältnis zu einander ausgewertet wurde.

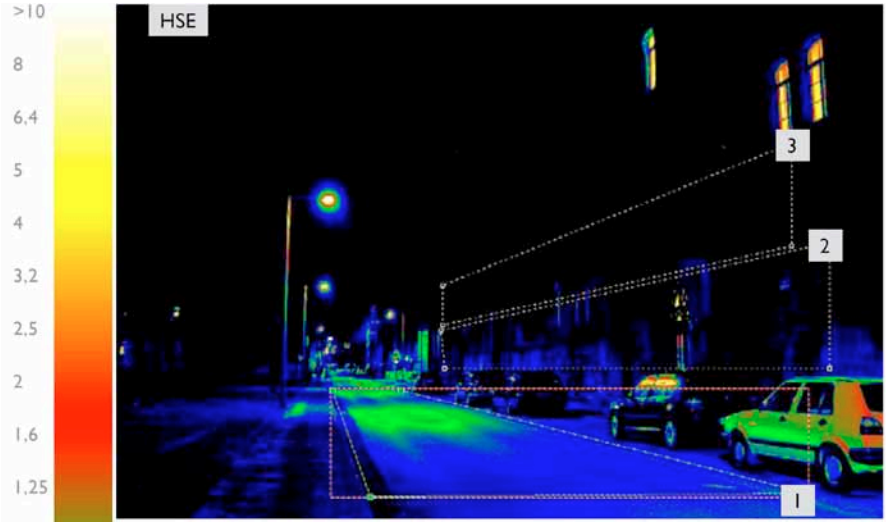


Abb. 6: Beispiel der Lichtmessfelder an der Fahrbahn und der Fassade

Die Auswertung der Messungen hat einen eindeutigen Rückgang der Fassadenaufellung bei Anwendung der im Projekt eingesetzten LED-Leuchten ergeben.

Hinweise auf ein durch den Betrachter als gut empfundenes Verhältnis zwischen der Straßen- und Straßenraumhelligkeit liefern die Ergebnisse aus der Tabelle 2. Die Fassadenaufhellung sollte in deren unteren Bereich demnach ungefähr die Leuchtichte der Fahrbahn aufweisen. Ein zu rascher Rückgang der Helligkeit (entsprechend einem zu hohem Leuchtdichtegardienten) im oberen Bereich führt ebenfalls zu einer schlechteren Bewertung durch den Betrachter.

Straße	Leuchtdichte [in % zur Fahrbahn]		
	Fahr-bahn	untere Fassade	obere Fassade
Durchschnittliche Bewertung			
gut [+ +]	100	102	65
mittel / gut [+]	100	67	76
mittel [+ / -]	100	117	29
mittel / schlecht [-]	100	25	14
schlecht [- -]	100	13	6

Tab. 2: Bewertung der Wahrnehmung der Aufhellung des Straßenraums im Verhältnis zu Helligkeit der Fahrbahn in .

Die Entwicklung der LED-Technologie wird neue Tendenzen in der ästhetische Sprache des Produktdesign mit sich bringen. Das kann dazu führen, dass eine Unterscheidung zwischen den klassischen Typen der bisherigen Produkte aufgehoben wird. Es ist auch anzunehmen und wünschenswert, dass die neue LED-Technoligie neue inteligente Lichtlösungen hervorbringt in denen zum Beispiel die Komponente der Umgebungsaufhellung steuerbar wir. Das Designmanagement solcher Produkte wird immer schwieriger, in vielen Fällen werden Entscheidungen zum Produkt und dessen Ausstattung in breiten Gremien gefällt, im Falle einer unzureichenden Fachberatung sind grobe Fehler bei der Wahl der Produkte vorprogrammiert. Eine einheitliche, leicht verständliche Kenzeichnung der Produkte hilft sowohl den Herstellern in der Beschreibung und Konzeption der Erzeugnisse, als auch den Stadtplanern und Landschaftsarchitekten in einer korrekten Vorauswahl der Lichtobjekte.

5 Bewertung und Zukunft

Die neue Form der Kennzeichnung könnte sich auf die Verwendung der Abkürzungen beschränken:

RL – **R**oad **L**ight I **LL** – **L**iving **L**ight I **CL** - **C**ity **L**ight

Oder mit eigenen Symbolen die optische Führung in den Unterlagen der Hersteller erleichtern.

Die Autoren der Publikation werden an eine zielgenaue Definition der drei Lichtarten arbeiten. Zurzeit sind die mit einfacher Beschreibung leicht zu identifizieren:

- **RL** – Leuchten für rein technische Fahrbahnbeleuchtung
- **LL** – Leuchten für bewohnte Stadtteile in denen die Aufhellung des Stadtraums nicht nur auf die Fahrbahnbeleuchtung reduziert ist
- **CL** – Leuchten für Stadtgebiete, in denen die Aufenthaltsqualität eine primere Rolle spielt und die reine Fahrbahnbeleuchtung in Hintergrund tritt.

Die meisten Lichtberechnungs-Programme ermitteln reine lichttechnische Parameter der Fahrbahnbeleuchtung und liefern keinen Hinweis auf die Komponente der Raumaufhellung diese Komponente sollte in die Praxis besser integriert werden.
Schlussendlich kann das neue Kennzeichnungs-System die Kommunikation und Auswertung in Planungsprozessen, wie das Beispiel aus der Tabelle 3 zeigt, helfen.

Typ	Beleuchtungsqualität ist			Beleuchtungsqualität sollte		
Situation	Road L.	City L.	Living L.	Road L.	City L.	Living L.
Welfenplatz	x x			x	x x	x
Am Welfenplatz	x x x	x		x x x	x x	
An der Apostelkirche	x x x	x x		x x x	x x	
Edenstraße	x x	x x x		x x x	x x x	x
Celler Straße	x x x	x x x		x x x	x	
Lister Meile	x x	x x		x	x x x	x x
Körtingstraße	x x x			x	x x x	x x
In der Steinriede	x x	x x		x x	x x	
Wedekindplatz	x x	x		x	x x x	x x x
Am Holzgraben	x x			x x	x x	
Kleine Pfahlstraße Trilux	x x	x x		x x	x x	
Kleine Pfahlstraße Hellux	x x	x		x x	x x	
Auf dem Lärchenberg	x x			x x	x x	

x	empfehlenswert
x x	wichtig
x x x	sehr wichtig

Tab. 3: Beispiel für Ist- und Sollsituation der in Hannover untersuchten Straßen.

Die Autoren der Publikation haben vor weitere Publikationen und detaillierte Vorschläge zu dem Vorschlag der Kennzeichnung der Lichtsysteme für die Stadträume zu veröffentlichen.

Quellen

Literatur:

Nolte, Henrik: LED-Straßenbeleuchtung. Veränderung des nächtlichen Erscheinungsbild unserer Städte. Bachelorthesis HAWK Hildesheim, Fakultät Gestaltung: Hannover 2011

Handbuch der Lichtplanung. E Edition. Rüdiger Ganslandt. Harald Hofmann. Vieweg.

Abbildungsverzeichnis:
Abb. 1: Lichtplanung im städtebaulichen Kontext S.17
Abb. 2: La Lumière électrique (1883)
Abb. 3: Mauruszat, Axel: http://www.berlin-hermannplatz.de/karstadt/pic2x.jpg: Berlin 2002-2006
Abb. 4: Fotos von der Enercity zur Verfügung gestellt
Abb. 5: Fotos von der Enercity zur Verfügung gestellt
Abb. 6: Henrik Nolte: LED Straßenbeleuchtung Seite 57
Tab. 2: Henrik Nolte: LED Straßenbeleuchtung Seite 77 (Auszug)
Tab. 2: Henrik Nolte: LED Straßenbeleuchtung Seite 80 (Auszug)

„Lichtmasterplan in 3D“

Dipl.-Ing. Norbert Wasserfurth, Dr. Marcin Ciupak, Dipl.-Ing. Johannes Käppler |
Studio DL Sedanstraße 42, 31134 Hildesheim

1 Problemstellung

In zahlreichen kleineren und größeren Projekten sind Planungsteams unterschiedlichster Fachkompetenzen in das Projektgeschehen involviert. Protokolle aus verschachtelten und beschreibenden Sätzen geben oft nur einen Teil des Planungsinhaltes wieder.
Im Bereich der Lichtplanung reißt der Faden der Vorstellungskraft bei der Interaktion zwischen Licht und Oberflächen, also bei der eigentlichen Beschreibung der „Lichtgesamtwirkung“.
Die Komplexität der Aufgaben eines Stadtlichtplaners wächst nicht nur in Bezug auf die Vielschichtigkeit der städteplanerischen Anforderungen, sondern auch im Bereich der Kommunikation zwischen breit gefächerten Gewerken, Planungspartnern und Entscheidungsgremien. Das Bearbeitungsfeld reicht von Elementen der Landschaftsarchitektur und Stadtplanung über Denkmalsschutz, Naturschutz, Energiemanagement bis zu Elementen des Marketings.
Die Bereichsübergreifende Projektplanung und -durchführung kann durch den Einsatz von 3D Modellen und Visualisierungen wesentlich transparenter und effektiver gestaltet werden. In großem Maßstab werden grundsätzliche stadtgestalterische Zusammenhänge analysiert, Perspektiven geprüft und ganzheitliche langfristige Entschlüsse getroffen. Je näher wir von der „Vision“ an das Projekt kommen, umso detaillierter und technischer werden auch die Aussagen zur Beleuchtung.
Während bei einer Masterplanung die Wirkung von Grundsatzregelungen dargestellt wird, geht es in einzelnen Stadtquartieren schon um proportionale Auseinandersetzungen mit Produkten, Formen und technischer Realisierbarkeit.
Auf Plätzen, Straßenzügen und an Gebäuden spielen Oberflächen, Farben und Umgebungshelligkeiten eine wesentliche Rolle, stets begleitet von Fragen und Antworten zu ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten.
Die Komplexität wächst und die Betrachtung verschiedener Varianten in allen Facetten übersteigt schlicht die Vorstellungskraft.
Die dreidimensionale und teilweise realitätsnahe Darstellung der Planung erlaubt uns die ursprünglichen und festgelegten Gestaltungsziele mit den projektbezogenen Eigenheiten zu vergleichen und Lösungsansätze vorzustellen, die in zahlreichen Punkten geprüft sind und anhand der Darstellungen gemeinsam diskutiert werden.

Abb. 1: Integration sämtlicher Planungsinhalte für die öffentlichen Bereiche der Hafeninsel Offenbach am Main, sowie zusätzliche Darstellung der möglichen Bebauung (Tag)

Abb. 2: Integration sämtlicher Planungsinhalte für die öffentlichen Bereiche der Hafeninsel Offenbach am Main, sowie zusätzliche Darstellung der möglichen Bebauung (Nacht)

2 Zielsetzung

Die Einführung von Produkt - und technologieneutralen Grundregeln, die eine nachhaltige und langfristige Entwicklung der Stadtbeleuchtung ermöglichen, stand im Vordergrund der Entstehung einiger neuen Planungstools und Methoden.
Als weiteres Ziel ist es 3D Modelle interdisziplinär in den Planungsteams anzuwenden. Hat sich beispielsweise ein Auftraggeber für die Erarbeitung einer Lichtplanung im 3D Modell entschieden ist es vergleichsweise einfach auch andere Planungsinhalte zu überprüfen. Zahlreiche Kommunen besitzen heutzutage bereits 3D Stadtmodelle, die unserem Team zur weiteren Bearbeitung zur Verfügung stehen. Unser Ziel ist es auch 3D Planung zu einem Planungs- und Kommunikationsstandard zu entwickeln und weiter an den zahlreichen Möglichkeiten und Vorteilen zu arbeiten.

Abb. 3: Dresdener Altmarkt. Visualisierung des Lichtentwurfs in 3D

Die Gebäude des Dresdner Altmarktes wurden uns als vereinfachtes 3D Boxenmodel-Stadtmodell zur weiteren Detaillierung zur Verfügung gestellt (Abb.3).

Der *Business and Science Park* in Enschede (NL) wurde von der Stadtplanung Enschede entwickelt. Bei der Lichtkonzeption des bestehenden Stadions (FC Twente) und des neuen Stadionvorplatzes wurden die Planungen aller Beteiligten in einem 3D Modell zusammengefasst und gemeinsam diskutiert. Die integrativen Planungsergebnisse die im Dialog zwischen den Stadtplaner, Landschaftsarchitekten, Stadtdiensten und der Verkehrsplanung erstanden sind, konnten plakativ und verständlich mit beteiligten Gremien und Vereinen kommuniziert werden. Durch die zügigen Abstimmungen in der Entwurfsphase wurde der knappe Termin für den Baubeginn eingehalten (Abb. 4 und 5).

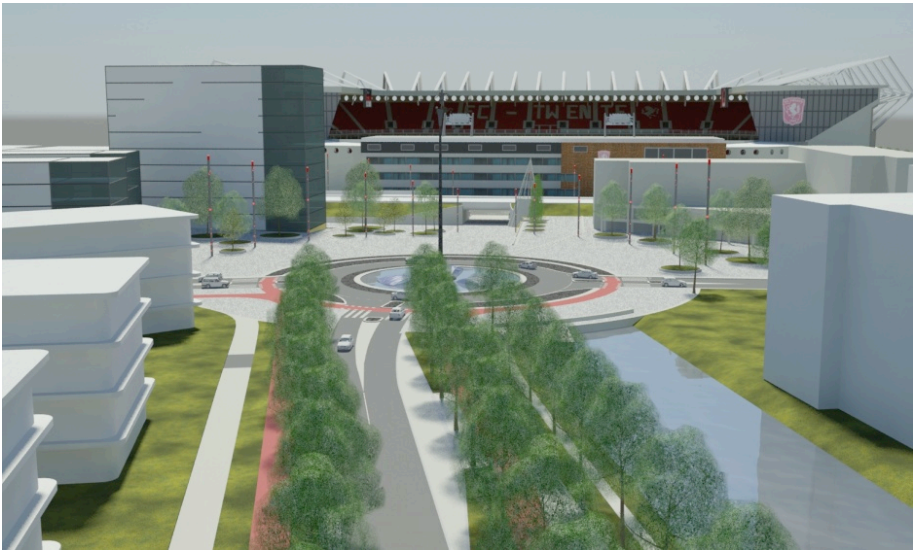


Abb. 4: Stadtmodell Business- und Sciencepark Enschede (NL)

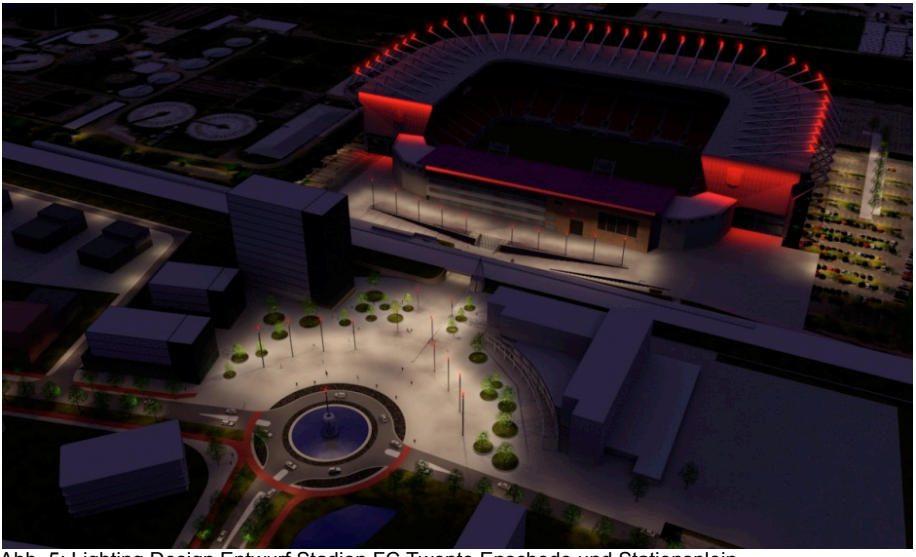


Abb. 5: Lighting Design Entwurf Stadion FC Twente Enschede und Stationsplein

3 Best Practice

Einer der wichtigsten Aufgaben und Zielsetzungen für die Erstellung des Masterplans für die historische Altstadt von Warschau war die Lichtgestaltung der UNESCO-geschützten Stadtsilhouette. Der nächtliche Anblick der Altstadt von der Flussseite erhielt daher einen sehr hohen Stellenwert in der Planung. Das steil ansteigende Ufer sowie die über der Altstadt ragenden Türme der historischen Bauten bilden einen faszinierenden Anblick. In der Gestaltung der nächtlichen Betrachtung musste daher die räumliche Zusammensetzung der einzelnen Fassaden und Gebäudeelemente, die die Stadtsilhouette bilden, genauestens beachtet werden. Dafür wurde das von der Stadt Warschau zur Verfügung gestellte 3D-Model genutzt. Die von der Flussseite sichtbaren Elemente wurden perspektivisch so gekennzeichnet, dass eine klare Identifizierung der in Frage kommenden Elemente aus jeder Perspektive möglich war. Diese Erkenntnisse flossen in die Kriterien der Lichtgestaltung der einzelnen Objekte so ein, dass ein harmonisches Gesamtbild der Altstadt entstand.

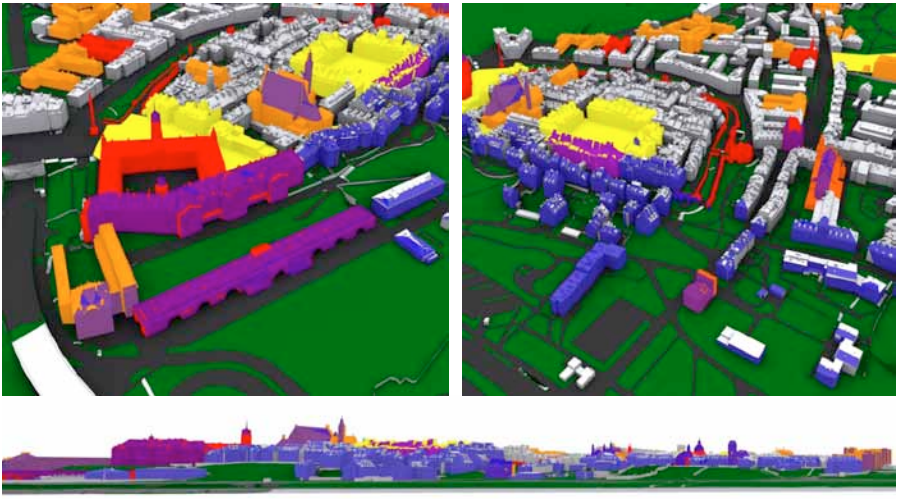


Abb. 6: Analyse der räumlichen Hierarchie der Warschauer Altstadt von der Flussseite

Die lichtgestalterischen Definitionen die für das Gebiet erarbeitet wurden, konnten in Zusammenarbeit mit dem Stadtplanungsamt, dem Denkmalschutz, den Verkehrsbetrieben und dem Amt für Grünflächen in einigen wenigen, transparenten und leicht einsetzbaren Regeln zusammengefasst werden. Diese Regeln bilden den Lighting-Design DNA-Code der Altstadt (Abb. 7). Die Stadtgestaltung stellt Regeln auf, weil der öffentliche Raum begehrt ist, viele wollen ihn nutzen und arrangieren. Satzungen halten verbindlich fest, welche Gestaltungsprinzipien gelten. Studio DL knüpft mit der der Bildung eines Lighting-Design DNA-Code an eine Jahrhundert alte Tradition an. Die aufgestellten Regeln sind technologisch unabhängig und sollen das Korallenriff-Prinzip ermöglichen: „Wachstum durch Vielfallt in einem abgestimmten System“.

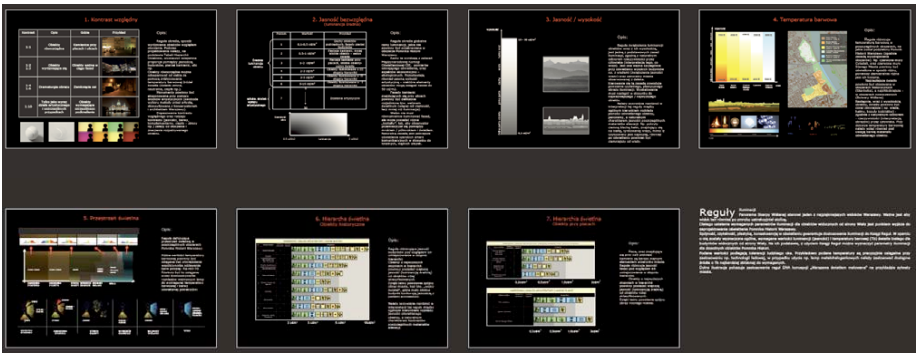


Abb. 7: Lighting-Design DNA-Code der Altstadt von Warschau

Als ein Ergebnis der räumlichen Analyse und der Anwendung der lichtgestalterischen Definitionen entstand die Licht-Skalierung der UNESCO-geschützten Stadtsilhouette.

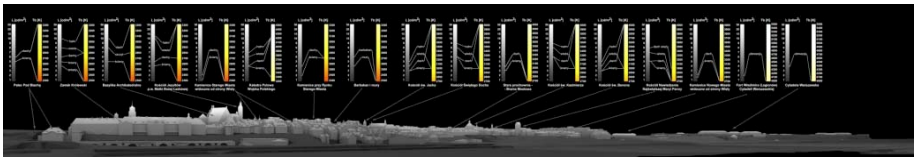


Abb. 8: Licht-Skalierung der der UNESCO-geschützten Stadtsilhouette

In der konventionellen Stadtlichtplanung konzentriert sich die Aufmerksamkeit des Planers auf die Ausleuchtung der raumbegrenzenden Flächen. Im Verständnis der Autoren gehört die Interaktion zwischen dem Publikum, also den tatsächlichen Akteuren des Stadtgeschehens, und dem Lichtraum zu den wesentlichen Aufgaben der Lichtgestaltung von öffentlichen Flächen. Am Beispiel der Lichtgestaltung für die zentrale Stadtachse von Amsterdam (Verbindung zwischen der *Amsterdam Central Station* und dem *Rijksmuseum Amsterdam*) wurden mit Hilfe eines 3D Stadt-Models vier Lichtsysteme nicht nur unter dem Kriterium der Effektivität der Straßenbeleuchtung, aber auf stark unter den lichtgestalterischen Kriterien der Stadtraumbildung untersucht. Die Diagramme der Abbildung 9 und 10 zeigen wie sich das Erscheinungsbild eines Passanten in unterschiedlichen Lichträumen in Abhängigkeit vom Standort und Lichtcharakteristik der eingesetzten Leuchten verändert.

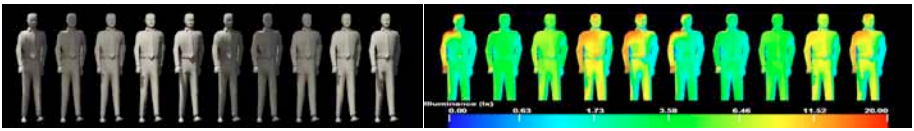


Abb. 9: Amsterdam. Lichtraumwirkung eines der vier untersuchten Lichtsysteme in Bezug auf das Erscheinungsbild der Passanten.

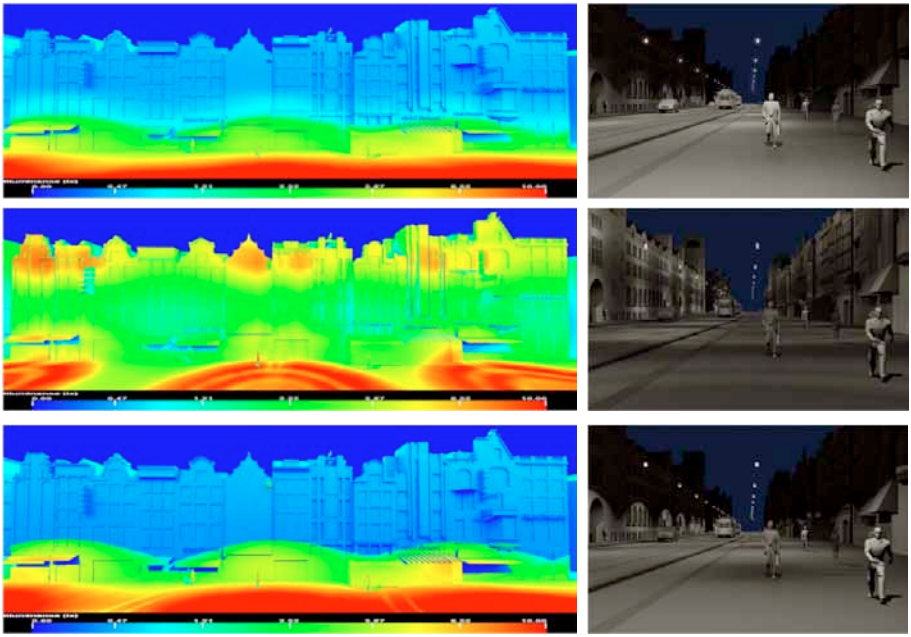


Abb. 10: Amsterdam. Darstellung der Interaktion zwischen dem Lichtraum und dem Stadtraum.

4 Realisierungsgrad und Bewertung

Die landschaftsarchitektonische Analyse des Stadtbildes in 3D eröffnet neue Möglichkeiten der Zieldefinitionen und deren Überprüfung. Als Ergebnis wurden folgende Planungstools entwickelt:

- Definition eines Lighting-Design DNA-Code
- Bestimmung eines Verfahrens zu Erstellung von Lichthierarchie der architektonischen Objekte
- Lichtskalierung der Stadtgebiete
- Lichtraum – Stadtraum Analysen

Die folgenden drei Bereiche profitieren zusätzlich in großem Maße von diesem neuen Werkzeug:

- Designmanagement
- Kostenplanung
- Zeitmanagement

Die oben genannten Methoden wurden erfolgreich in vielen europäischen Städten angewandt.

Das internationale Studio DL Team (NL, D, PL) erarbeitet in wissenschaftlichen Arbeiten und Projekten neue Methoden der Stadtlichtplanung. Dank der Zusammenarbeit von Landschaftsarchitekten, Lichtplanern, sowie Farbdesignern, der Anbindung an die HAWK in Hildesheim und an die TU in Warschau ist es uns gelungen, in der Systematik und Tiefe stets die neuesten Entwicklungen aus dem Bereich der Wissenschaft, Design und Technologie zu integrieren.

Verglichen mit zahlreichen anderen Darstellungsmethoden ist die 3D Darstellung für größere Planungsteams oder Berufsfremde am wertvollsten, da alle Fachdisziplinen die Beleuchtungswirkung sehen und sehr früh in einen Prozess einsteigen können. Sowohl Gestalter, Ästheten, Techniker, Ökonomen und auch Nichtfachleute finden rasch Zugang zum Lösungsansatz und können qualifiziert mitreden.
Je nachdem welche Ziele im Gesamtprojekt verfolgt werden, lassen sich durch die 3D Planung / Lichtplanung die Bearbeitungszeiten erheblich verkürzen. In unserer Arbeit dient diese Arbeitsmethode nicht ausschließlich zum Ideentransport oder der Gremienarbeit, wir nutzen die 3D Modelle ebenso zu komplexen Berechnungszwecken, Mengenermittlungen, Leuchtdichteanalysen und Klärung diverser baulicher Details.

Norbert Wasserfurth

Quellen

Alle Abbildungen und Diagramme stammen aus den Projektunterlagen und internen Forschungsvorhaben des Lichtplanungsbüros Studio DL / Dynamisches Licht.

Untersuchung der Aussagekraft von Lichtsimulationen am Beispiel von DIALux und Verifizierung anhand von Messungen

Dipl.-Ing. (FH) Tristan Schäfer, Prof. Dr.-Ing. Eva Schwenzfeier-Hellkamp

Fachhochschule Bielefeld, Fachbereich Ingenieurwissenschaften und Mathematik, Wilhelm-Bertelsmann-Straße 10, 33602 Bielefeld

1 Projektumfeld

Die Fachhochschule Bielefeld übernimmt die wissenschaftliche Betreuung der Kommune Rietberg im Rahmen des Bundeswettbewerbs „Kommunen in neuem Licht“. Der Wettbewerb ist Bestandteil der LED-Leitmarktinitiative des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF). Maßgebliches Ziel ist die Umsetzung von Forschungsergebnissen in die Praxis, um die Verbreitung der LED-Technologie voranzutreiben.

1.1 Lichtkonzept Historischer Stadtkern

Die Kommune Rietberg hat die Jury mit ihrem Lichtkonzept des Historischen Stadtkerns überzeugen können. Rietberg setzte sich gegen mehr als 100 Mitbewerber durch und konnte sich die Förderung in Höhe von bis zu 2 Mio. Euro sichern. In der Straßenbeleuchtung sollen insgesamt 200 Lichtpunkte durch neue LED-Leuchten ausgetauscht werden.

Das Konzept umfasst neben der Umstellung der Straßenbeleuchtung auf LED-Technologie die Erprobung eines taktilen Leitsteins für Sehbehinderte und -beeinträchtigte sowie die Anstrahlung von Baudenkmälern mit LED-Strahlern.

Es soll eine deutliche Verbesserung mit der Umstellung auf LED-Beleuchtung einhergehen. Als Bewertungsmaßstab werden die Angaben in der Norm DIN 13201 Straßenbeleuchtung genutzt. Auf diese Weise lassen sich Steigerungen des Beleuchtungsniveaus quantifizieren.

1.2 Aufgaben der Fachhochschule Bielefeld

Neben der Messung der Beleuchtungsstärke und der Befragung von Anwohnern, Geschäftsleuten und Verwaltungsmitarbeitern der Stadt Rietberg zur Akzeptanz und Empfindung der Beleuchtungssituation übernimmt die Fachhochschule Bielefeld auch den Aufgabenbereich Simulation und Optimierung. Im weiteren Projektverlauf soll zudem ein Energie-Monitoring und eine Energiebilanz aufgestellt werden.

Im Zuge der Planungsaktivitäten wurde der gesamte Stadtkern in Kooperation mit dem beteiligten Leuchtenhersteller abgebildet. So soll möglichst sichergestellt werden, dass durch die Umstellung auf die LED-Beleuchtung ein normgerechtes Beleuchtungsniveau entsteht. Mit Hilfe der Simulation sollen Abweichungen von der Norm in Bezug auf die minimale oder mittlere Beleuchtungsstärke bereits vor den Umbaumaßnahmen herausgearbeitet werden. Anschließend werden Optimierungsmaßnahmen entwickelt und umgesetzt.

Da die normgerechte Beleuchtung ein maßgebliches Ziel darstellt, werden die Simulationen von der Fachhochschule Bielefeld ausschließlich zur technischen Planung

und Optimierung eingesetzt. Die lichttechnischen Berechnungen werden nicht für Präsentationszwecke oder Betrachtung von ästhetischen Aspekten eingesetzt, wie sie beispielsweise von Architekten genutzt wird.

2 Voruntersuchung Simulation

Es existieren viele verschiedene Faktoren, welche Einfluss auf die lichttechnischen Berechnungen haben können. Unter anderem können folgende Aspekte die Aussagekraft von Lichtsimulationen beeinflussen:

- Position und Geometrie des Bewertungsfeldes
- Lichtpunkthöhe
- Reflexionsgrad
- Lichtstärkeverteilungskurve
- Schaufenster- und Fassadenbeleuchtung
- Wartungsfaktor

Im Folgenden werden die einzelnen Einflussgrößen untersucht und bewertet. Durch die Erstellung von Testsimulationen wurden bestimmte Faktoren näher untersucht.

2.1 Position und Geometrie des Bewertungsfeldes

Die Ausrichtung und Ausdehnung des Bewertungsfeldes kann einen Einfluss auf die entscheidenden Parameter der minimalen und mittleren Beleuchtungsstärke haben. Dieser Aspekt betrifft die Simulation und die Messtechnik gleichermaßen. Das Raster des Bewertungsfeldes muss mit dem Messraster übereinstimmen. Ein gekrümmter Straßenverlauf kann beispielsweise je nach Anordnung der Berechnungspunkte durch den Planer unterschiedliche Ergebnisse vorweisen.

Ein weiterer Punkt ist die Festlegung der zu betrachtenden Fläche. Falls diese Entscheidung auf Basis von CAD-Daten gefällt wird, muss sichergestellt werden, dass diese Daten genau und aktuell sind. Zudem muss gegebenenfalls ein einheitlicher Umgang mit Straßenverengungen zwischen den Arbeitsgruppen Simulation und Messung abgestimmt werden.

2.2 Lichtpunkthöhe

Die Lichtpunkthöhe (LPH) ist insbesondere für das meist gerichtete Licht von LED-Leuchten von großer Bedeutung. Bei dieser Beleuchtungs-Technologie ergibt sich oft ein Lichtkegel. Dies hat zur Folge, dass eine erhöhte LPH sowohl in einer besseren Gleichmäßigkeit als auch in Verbesserungen im Hinblick auf die minimale Beleuchtungsstärke resultiert.

Die Lichtpunkthöhe ergibt sich durch die Mastlänge, die Leuchtengeometrie und Niveaudifferenz zwischen Straßenoberfläche und Baufläche (beispielsweise Bürgersteig). Es muss beachtet werden, dass mit dem Einbau der Masten eine große Unsicherheit bezüglich LPH verbunden ist. Je nach Bodenbeschaffenheit und Standsicherheit kann die tatsächliche LPH durch die Tiefbaumaßnahmen um bis zu 40 cm variieren.

In der Norm DIN 13201 wird darauf hingewiesen, dass Bewertungsfelder in Simulationen auf Straßenniveau positioniert werden können. Da im Rahmen des Forschungsprojekts die Simulation im engen Zusammenhang mit der Messung der Beleuchtungsstärke steht, werden Simulationen von der Fachhochschule Bielefeld mit Bewertungsfeldern in 20 cm Höhe durchgeführt, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen.

2.3 Reflexionsgrad

Für die Untersuchung der Auswirkungen des Reflexionsgrades wurden im Simulationsprogramm Reflexionsebenen mit unterschiedlichem Reflexionsgrad eingesetzt. Der direkte Vergleich zweier Reflexionsflächen mit $\rho = 0.9$ und $\rho = 0.1$ zeigt, dass der Reflexionsfaktor in der Realität nur unter außergewöhnlichen Umständen eine nennenswerte Auswirkung auf die Erfüllung der normativen Anforderungen hat. Tatsächlich ist der Einfluss auf die Beleuchtungsstärke nur dann relevant, wenn sich eine große Fläche mit extrem hohem Reflexionsgrad in unmittelbarer Nähe des Bewertungsfeldes befindet.

2.4 Lichtstärkeverteilungskurve

Es muss Wert darauf gelegt werden, dass es sich bei den Lichtstärkeverteilungskurven (LVK) in den genutzten EULUMDAT-Dateien um gemessene Werte handelt. Simulierte LVKs können Genauigkeitsdefizite aufweisen und können somit die Lichtsimulation verfälschen. Der Fachhochschule Bielefeld wurde vom Leuchtenhersteller versichert, dass die Leuchtendatei ausschließlich gemessene Werte beinhaltet.

2.5 Schaufenster- und Fassadenbeleuchtung

Im Historischen Stadtkern Rietbergs treten insbesondere in der Rathausstraße vermehrt Schaufenster und Fassadenbeleuchtung auf. Die Wirkung der Schaufensterbeleuchtung ist schwer zu erfassen und nachzubilden. Da es sich um Zusatzbeleuchtung handelt, muss diese nicht in die Simulation einbezogen werden. In der Regel sind die Schaufenster mehrere Meter vom Bewertungsfeld entfernt, so dass kein entscheidender Einfluss auf die Messungen zu erwarten ist.

2.6 Wartungsfaktor

Der Wartungsfaktor ist ein viel diskutierter Punkt in der Lichttechnik. In der Simulation wurde in Abstimmung mit dem kooperierenden Leuchtenhersteller ein Wartungsfaktor von 0,8 gewählt. Diesen vergleichsweise hohen Wartungsfaktor begründete der Kooperationspartner mit einer Lichtstromnachführung, welche die Degradation der Leuchtmittel ausgleichen soll. In DIALux wird der Wartungsfaktor ebenso wie Dimmwerte mit dem Lichtstrom multipliziert.

3 Detailgrad der Simulation

Ergänzend zu den Voruntersuchungen wurden mehrere Bewertungsfelder in verschiedenen Detailgraden nachgebildet. Abb. 1 zeigt eine Nachbildung mit extrem hohem Detailgrad. Die Reflexionseigenschaften von Fassaden, Straßenschildern, Reflektoren wurden anhand von Tabellenwerken nachgebildet. Objekte, die zur Verschattung beitragen könnten, wurden vermessen und nachgebildet.

Abb. 1: Hoher Detailgrad

Eine detailgetreue Nachbildung ist mit hohem Zeitaufwand verbunden. Da die Fachhochschule Bielefeld den gesamten Historischen Stadtkern Rietbergs nachbildet, muss eine alternative Herangehensweise entwickelt werden. Aus den Voruntersuchungen wurden folgende Einschränkungen für Simulationen mit verringertem Detailgrad entwickelt:

- Im Zweifelsfall keine Nachbildung von Verschattungsobjekten
- Pauschalisierung von Fassaden mit Reflexionsgrad 0,35
- Pauschalisierung von Straßen und Bürgersteigen mit Reflexionsgrad 0,35
- Gesonderte Angabe von Reflexionseigenschaften nur für direkt an die Leuchte oder das Bewertungsfeld angrenzende, stark reflektierende Flächen
- Keine Betrachtung von Umgebungslicht wie etwa Schaufensterbeleuchtung
- Angabe von Berechnungsergebnissen nur unter Beachtung der örtlichen Gegebenheiten

Unter Beachtung dieser Punkte lassen sich lichttechnische Berechnungen zeiteffizient umsetzen, ohne die Genauigkeit der Simulationsergebnisse maßgeblich zu beeinträchtigen. Abbildung 2 zeigt eine Nachbildung mit angepasstem Detailgrad.

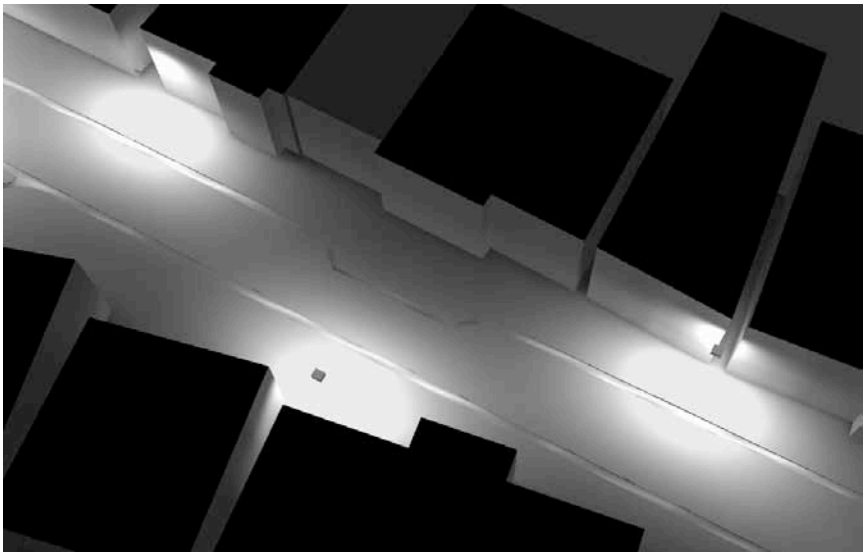


Abb. 2: Verringerter Detailgrad

4 Rathausstraße: Bewertungsfeld 3

Das Bewertungsfeld 3 liegt in der Rathausstraße der Stadt Rietberg und ist eines von 28 ausgewählten Bewertungsfeldern, in denen neben der Simulation auch eine Messung der Beleuchtungsstärke erfolgt. Im Folgenden wird die Aussagekraft von Lichtsimulationen am Beispiel dieses Bewertungsfeldes exemplarisch überprüft.

4.1 Klassifizierung

Im historischen Stadtkern von Rietberg gilt für Fahrzeuge eine maximal zulässige Geschwindigkeit von 20 km/h. Diese Geschwindigkeitsbegrenzung wird durch Fahrbahnverengungen gestützt. Die Rathausstraße wurde in Abstimmung mit der Stadt Rietberg eine S3 Klassifikation gemäß der Norm DIN 13201 angesetzt.

4.2 Anordnung von Rasterpunkten

Das Bewertungsfeld ist 3,25 m breit und 38,30 m lang. Gemäß DIN 13201 ergibt sich dadurch ein Raster mit 3 * 13 Punkten. Da es sich bei der Rathausstraße um eine Einbahnstraße (Ausnahme: Fahrradfahrer) handelt, wurde als Bemessungsgrundlage für die Breite des Bewertungsfeldes der engste Fahrbahnbereich genutzt, so dass der relevante Bereich abgedeckt wird.

4.3 Verschattungen im Historischen Stadtkern

Abbildung 3 zeigt exemplarisch eine Situation in der Rathausstraße. Die Leuchte steht zwar relativ nah am Fahrbahnrand, wird jedoch durch Bepflanzung oder sonstige Dekorationsobjekte teilweise abgeschirmt.

Mögliche Verschattungen sollten laut Norm DIN 13201 durch Auswahl eines geeigneten Messfeldes vermieden werden. Durch die örtlichen Gegebenheiten im Historischen Stadtkern lässt sich der Einfluss von Verschattung jedoch nicht vollkommen ausschließen. Insbesondere in der Rathausstraße haben sowohl Parkplätze als auch die Bepflanzung durch Bäume und Sträucher durchgängig Einfluss auf die Beleuchtungssituation.

In der Simulation lassen sich Verschattungen nicht realitätsgetreu nachbilden. Zwar bieten verschiedene DIALux Plug-Ins Objekte für Bäume, Sträucher oder parkende Fahrzeuge an, dabei handelt es sich jedoch um Dekorationsobjekte, welche keinen realistischen Schattenwurf erzeugen. Insbesondere der komplexe Schattenwurf durch Bäume und Sträucher lässt sich nicht detailgetreu nachbilden. Aus diesem Grund werden Verschattungen in der Simulation nicht berücksichtigt. Für den Vergleich mit Messwerten darf dieser Aspekt jedoch auf keinen Fall außer Acht gelassen werden.

Abb. 3: Verschattung durch Dekorationsobjekte

4.4 Messtechnische Überprüfung

Die vorangegangenen Untersuchungen werden validiert, indem die Simulationsergebnisse aus dem zuvor beschriebenen, vereinfachten Modell den tatsächlichen Messwerten gegenübergestellt werden. Bei der Gegenüberstellung muss bedacht werden, dass sowohl Messung als auch Simulation fehlerbehaftet sind. Tabelle 1 zeigt zunächst die Messwerte für die Beleuchtungsstärke in Lux. Bei den Feldern mit der Beschriftung L 1.18, L 1.19 und L 1.20 handelt es sich um Leuchtenstandorte.

	L 1.18												L 1.20	
		N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	N_8	N_9	N_{10}	N_{11}	N_{12}	N_{13}	
	n_1	19,40	12,90	7,60	5,10	4,40	4,15	4,60	3,60	3,40	5,10	8,50	16,20	24,10	
	n_2	11,00	8,00	5,60	4,70	5,50	7,14	8,20	4,00	2,90	6,90	7,50	10,90	13,30	
	n_3	6,51	5,10	4,00	4,60	6,60	11,56	9,70	13,00	14,90	8,60	7,00	7,50	7,50	
								L 1.19							

Tab. 1: Messwerte

Aus diesen Werten ergeben sich eine mittlere Beleuchtungsstärke von **8,24 lx** und eine minimale Beleuchtungsstärke von **2,9 lx**. Die Tabelle 2 beinhaltet die Ergebnisse der Simulation.

	L 1.18												L 1.20	
		N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	N_8	N_9	N_{10}	N_{11}	N_{12}	N_{13}	
	n_1	17	12	6,94	4,61	4,44	5,21	5,82	5,94	5,70	5,84	8,32	15,00	22,00	
	n_2	10	8,01	5,6	4,62	5,61	8,01	10,00	10,00	8,26	6,60	7,14	9,97	13,00	
	n_3	6,49	5,44	4,51	4,65	7,01	12	17,00	17,00	12,00	7,53	6,16	6,72	7,26	
								L 1.19							

Tab. 2: Ergebnisse der lichttechnischen Berechnung

Hier ergibt sich eine mittlere Beleuchtungsstärke von **8,70 lx** und eine minimale Beleuchtungsstärke von **4,44 lx**. In Tabelle 3 sind die Abweichungen der einzelnen Werte dargestellt. Auf diese Weise lassen sich kritische Bereiche besser erkennen.

	L 1.18												L 1.20	
		N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	N_8	N_9	N_{10}	N_{11}	N_{12}	N_{13}	
	n_1	2,40	0,90	0,66	0,49	-0,04	-1,06	-1,22	-2,34	-2,30	-0,74	0,18	1,20	2,10	
	n_2	1,00	-0,01	0,00	0,08	-0,11	-0,87	-1,80	-6,00	-5,36	0,30	0,36	0,93	0,30	
	n_3	0,02	-0,34	-0,51	-0,05	-0,41	-0,44	-7,30	-4,00	2,90	1,07	0,84	0,78	0,24	
								L 1.19							

Tab. 3: Abweichungen zwischen Messung und Simulation

Während die Werte der Simulation größtenteils mit den Messungen übereinstimmen, fällt jedoch der Bereich in der Nähe der Leuchte L 1.19 durch hohe Abweichungen auf.

Während der Messungen empfiehlt es sich, Fotos von den örtlichen Gegebenheiten zu machen. Abbildung 4 zeigt eine Aufnahme der örtlichen Gegebenheiten von besagtem Bewertungsfeld. Es ist erkennbar, dass ein Baum direkt vor der Leuchte 1.19 steht, welcher das Messfeld verschattet. Die Beleuchtungsstärke auf der Fahrbahn wird zudem teilweise durch das Blattwerk beeinträchtigt. In diesem Fall ist also der Faktor Verschattung maßgebliche Einflussgröße für Diskrepanzen zwischen Simulation und Messung. Verschattungen sollten laut DIN 13201 im Messprotokoll vermerkt werden. Auf diese Weise lassen sich Abweichungen leichter erklären.

Abb. 4: Verschattung im Bewertungsfeld 3

5 Fazit

Die Straßen des Historischen Stadtkerns zeichnen sich durch variable Straßenbreiten und ihren unstetigen Verlauf aus. Insbesondere im Hinblick auf diese Faktoren ist die Verwendung eines flexibel zu bedienenden Simulationstools wie DIALux zu bevorzugen.

Bei der Auswertung von Simulationsergebnissen müssen die örtlichen Gegebenheiten individuell beachtet werden. Mögliche Störgrößen sollten erfasst und bewertet werden. Die Projektpartner wurden wiederholt darauf hingewiesen, dass Simulationen nur modellhafte Nachbildungen der Realität sind und somit fehlerbehaftet sein können. Die Genauigkeit der Berechnungen hängt zudem maßgeblich von der Genauigkeit der Datenbasis (geometrische Informationen, EULUMDAT etc.) ab.

Die Erkenntnisse aus der Simulation hatten direkte Auswirkungen auf die Planungsaktivitäten der Stadt Rietberg. So wurde im gesamten Historischen Stadtkern eine LPH von 5 Metern gewählt, während diese ursprünglich mit 4 Metern vorgesehen war.

Auf Basis der Simulation wurden zudem Optimierungsmaßnahmen eingeleitet. Diese beinhalten neben der Verdichtung von Leuchtenstandpunkten auch das regelmäßige Beschneiden von Bäumen.

Mobiles Messsystem zur automatisierten, geokodierten Messung des Beleuchtungsniveaus von Straßen- und Außenbeleuchtungsanlagen

Klaus Bellgardt

STEPConsult GmbH

Marktstraße 1

67487 Maikammer

Inhaltsverzeichnis

1 Ziele der Beleuchtungsniveaumessung 3
2 Beschreibung des Messsystems 4
3 Horizontaler Beleuchtungsstärkesensor 5
4 Messwertdarstellung 6
5 Messdaten aus Auswertungssoftware 7
6 Messwertdarstellung mit GPS Visualizer 8

1 Ziele der Beleuchtungsniveaumessung

Die mobile geokodierte Messung der horizontalen Beleuchtungsstärke kann zur Unterstützung folgender Themenkomplexe eingesetzt werden:

- großflächige Erfassung und Darstellung des aktuellen Beleuchtungsniveaus
- Bewertung der Verbesserung durch Umbau bzw. Sanierungsmaßnahmen mittels vorher/nachher Messung (auch bei Umbau auf LED-Leuchten) bzw. Verifizierung der Beibehaltung des Beleuchtungsniveaus
- Dokumentation / Beweissicherung, z.B. bei KAG-Maßnahmen
- mögliches Aufzeigen von Energieeinsparpotenzialen

Darüber hinaus können durch Vergleich der lichttechnischen Kennwerte aus der Klassifizierung der betroffenen Straßen(abschnitte) nach DIN 13201 und der Ergebnisse der Beleuchtungsniveaumessung Aussagen darüber getroffen werden, ob ein Straßenzug 'ausreichend' und gleichmäßig beleuchtet wird. Somit wird eine flächendeckende Bewertung ermöglicht.

Mit der bisherigen vorhandenen Technik, einer zeitaufwendigen und kostenintensiven manuellen Messung, wurde pro Leuchte ein Aufwand in einer Größenordnung von zwei Mannstunden benötigt. Mit dem automatisierten mobilen Messsystem kann das Beleuchtungsniveau aller Straßen kleinerer Kommunen in einer Nacht und in größeren Städten in wenigen Nächten erfasst werden.

2 Beschreibung des Messsystems

Abb. 1: Messfahrzeuge

- Messsystem aus 6 horizontalen Beleuchtungsstärkesensoren (jeweils 3 an Heck und Front des Fahrzeuges)
- Die Sensoren befinden sich ca. 20cm über der Fahrbahndecke
- Messwerte werden bei einer Geschwindigkeit von bis zu 50km/h aufgenommen und additiv verarbeitet
- Zur Positionsbestimmung: DGPS (Genauigkeit bis in den Submeterbereich)
- Mittels Echtzeitrechner werden die Messwerte den Positionsdaten zugeordnet; Weiterleitung an Rechner mit Bearbeitungssoftware „Geomess“
- Rohdaten werden nach der Messung in ein Auswertetool eingeladen und nachbearbeitet
- Durch eine Verortung können Messwerte (Minimal-, Maximal- ,Mittelwert und Gleichmäßigkeit) straßen(profilbezogen) angezeigt werden

3 Horizontaler Beleuchtungsstärkesensor

Abb. 2: Beleuchtungsstärkesensor

- Horizontaler Beleuchtungsstärkesensor für photopische (Tag-/Farbsehen) und skotopische (Nachtsehen) Anpassung nach DIN 5032-7
- Streuendes Abdeckglas und abschattender Ring für cosinus-getreue Bewertung
- Sensor mit 2 Abschattungen
- Obere Abschattung: Reduktion der Einflüsse von Reflexionen am eigenen Fahrzeug, Abschattung des eigenen Abblend-/Bremslichtes; Messung des vorderen Viertelraumes
- Untere Abschattung: Reduktion der Einwirkung des Abblendlichtes von entgegenkommenden und folgenden Fahrzeugen
- Schwarze Lackierung, um Licht zu absorbieren und keine weiteren Reflexionen hervorzurufen

4 Messwertdarstellung

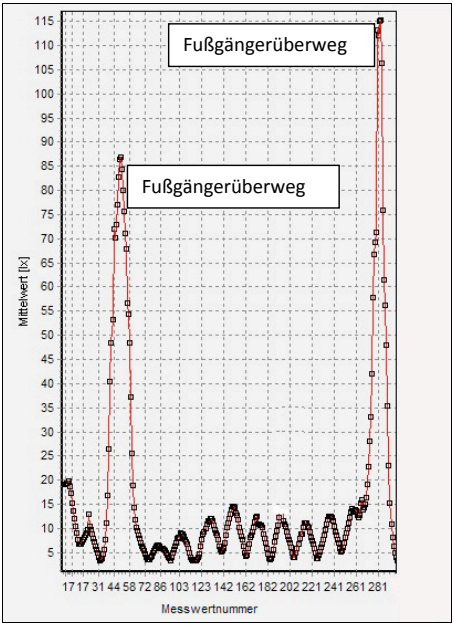


Abb. 3: Messwertkurve 1

Messwertkurve 1:

- Messwertkurve mit zwei Maxima bei Fußgängerüberwegen; Darstellung der Messwerte über die Straßenlänge; Peaks = Position Leuchte; Tal = zwischen den Leuchten

Messwertkurve 2:

- Messbereich zwischen 2 Lichtpunkten; Abstand 46m
- die horizontale Beleuchtungsstärke ist auf ca. 30 m Länge < 1 lx

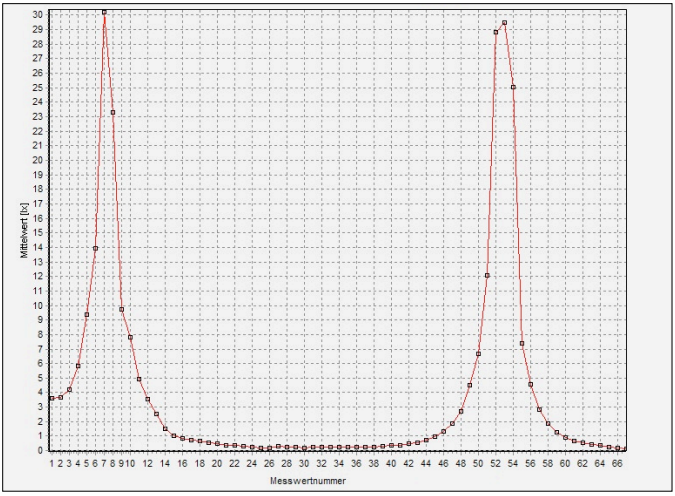


Abb. 4: Messwertkurve 2

5 Messdaten aus Auswertungssoftware

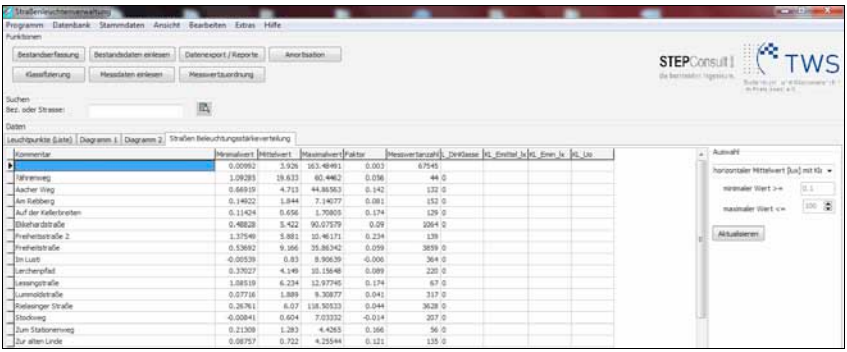


Abb. 5: screenshot aus Auswertungssoftware

In Abbildung 5 ist ein Ausschnitt der Beleuchtungsstärkeverteilung von gemessenen Straßen zu erkennen.

Mit dem Auswertungstool kann einer Verortung der Messwerte nach der Messung der horizontalen Beleuchtungsstärke vorgenommen werden. So werden die Messwerte (Minimal-, Maximal-, Mittelwert und Gleichmäßigkeit) den gemessenen Straßen zugeordnet. Optional können die Messwerte mit den Referenzwerten der Straßen, welche aus den Beleuchtungssituationen nach DIN 13201 ermittelt werden, verglichen werden.

Des Weiteren können Diagramme zum Leuchtmittel-, oder Leuchtenbestand, bzw. Mast-Typ oder Alter des Mastes erstellt werden.

6 Messwertdarstellung mit GPS Visualizer

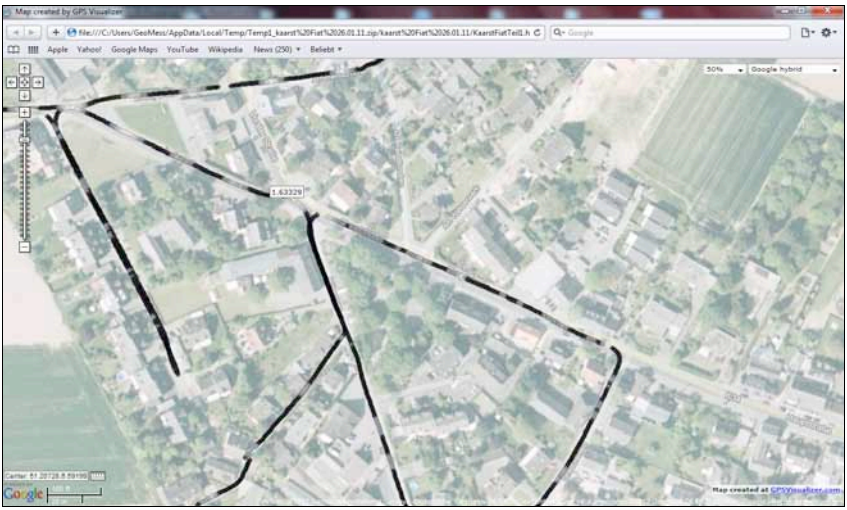


Abb. 6: Ausschnitt aus Messfahrt

Die Messwerte lassen sich neben der tabellarischen Darstellung auch in Google-Maps visualisieren

In dem Bildausschnitt sind helle und dunkle Bereiche zu erkennen. Diese entsprechen den Peaks und Tälern der Messkurven, d.h. die helleren Bereiche stellen den Bereich der Leuchten dar, die dunklen Abschnitte den Bereich zwischen den Leuchten.

Somit erhält man auch einen visualisierten 'Eindruck' des Beleuchtungsniveaus bzw. der Beleuchtungsqualität.

Wirkungen von Licht auf den Menschen
6. DIN-Expertenforum 2012

Dieter Lang, Andreas Wojtysiak
Osram AG, R&D SIM, München, Deutschland

1. Einleitung

Die Wirkungen von Licht auf den Menschen sind weiterhin ein zentrales Thema des Normenausschusses Lichttechnik FNL im DIN. Sowohl Grundlagenforschung als auch anwendungsnahe Studien bauen mittlerweile ein mehr und mehr geschlossenes Bild dieser häufig als „biologische" Wirkungen bezeichneten Effekte. Mit dieser Erwartung wurde beim Deutschen Institut für Normung schon im Jahre 2007 der Arbeitsausschuss 058-00-27 AA (FNL 27) eingerichtet, der sich dieses Themas im Hinblick auf Normungsfragen annimmt. Unterstützung erfährt die Initiative inzwischen im sechsten Jahr vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aus Mitteln des Projektes Innovationen durch Normen und Standards (INS).

Es ist mittlerweile belegt, dass jede Anwendung von Licht, sei es Kunst- oder Tageslicht, nicht unabhängig von ihren Wirkungen auf das biologische System des Menschen gesehen werden kann. Jede Beleuchtung zu jeder Tages- oder Nachtzeit wirkt auf das biologische System des Menschen. Auch die allgegenwärtig eingesetzte Standardbeleuchtung und sogar die Dunkelheit haben Wirkungen auf die Biologie des Menschen.
Diese neuen Erkenntnisse sind bisher nur ansatzweise in die Beleuchtungsplanung eingeflossen. Der FNL 27 hat sich die Aufgabe gestellt, die normativen Voraussetzungen dafür zu schaffen, dass dies in Zukunft möglich ist. Die biologischen Lichtwirkungen sollten bei der Beleuchtung von Innenräumen gleichrangig mit den bereits etablierten Qualitätsmerkmalen einer guten Beleuchtung für den Sehvorgang berücksichtigt werden können. Es ist nicht mehr ausreichend, nur gutes Licht für gutes Sehen bereitzustellen, sondern das richtige Licht zur richtigen Zeit wird zur Unterstützung und Aufrechterhaltung wichtiger biologischer Funktionen benötigt. Die Beleuchtung - gleich ob mit Tageslicht oder künstlichen Lichtquellen - sollte soweit möglich angepasst sein an die biologischen Bedürfnisse des Individuums und falls dies nicht möglich ist zumindest nicht im Widerspruch dazu stehen.

2. Standardisierung und Normung

Der FNL 27 hat es sich zum Ziel gesetzt, den über die lichtempfindlichen Ganglienzellen in der menschlichen Netzhaut vermittelten biologischen Wirkungen des Lichts (hier immer kurz „biologische Wirkungen" genannt) einen Stellenwert in der nationalen und langfristig auch internationalen Normung zu verschaffen, der sich an der Bedeutung orientiert, die diese Wirkungen für Gesundheit und Wohlbefinden haben.
Neben fachlichen Arbeiten wie Literaturrecherchen zur Aufarbeitung des wissenschaftlichen Standes und der Förderung von kleineren Forschungsprojekten zur Klärung offener wissenschaftlicher Fragestellungen veranstaltet der FNL 27 seit 2007 jährlich ein DIN - Expertenforum. Das mittlerweile 6. DIN Expertenforum findet am 28.06.2012 in Berlin statt.
Diese Expertenforen haben das wesentliche Ziel, den aktuellen Stand der Forschung auf dem Gebiet der biologischen Wirkungen von Licht einem größeren Fachpublikum darzustellen und zu diskutieren. Damit bilden die Expertenforen eine wesentliche Grundlage für den Transfer von wissenschaftlichen Ergebnissen in die Standardisierung.
Da es zu diesem relativ neuen Fachgebiet in vielen Punkten noch keine eindeutig

festgelegte und allseits akzeptierte Lehrmeinung gibt, kommt der Präsentation und Diskussion der neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse ein besonders hoher Stellenwert zu, wenn es um die Gestaltung zukünftiger Beleuchtungslösungen geht.

Ein besonderes Ziel der Expertenforen ist es, aufzuzeigen in welchen Punkten die wissenschaftlichen Erkenntnisse als so gefestigt und allgemein akzeptiert angesehen werden können, dass eine Umsetzung in die Praxis begonnen werden kann. Aufgrund der erheblichen Bedeutung, welche biologische Lichtwirkungen für Menschen haben, sieht es der FNL 27 als eine zentrale Aufgabe an, die Möglichkeit zu schaffen, dass gefestigte Erkenntnisse in den lichttechnischen Fachkreisen bekannt werden und somit in die Beleuchtungspraxis einfließen können.

Ein weiteres Ziel ist es, die grundlegenden Erkenntnisse und Empfehlungen zum Umgang mit den biologischen Wirkungen des Lichts über die Lichttechnik hinaus zu verbreiten. Daher sind nicht nur als Referenten sondern auch im Zuhörerkreis verschiedenste Fachrichtungen und interessierte Kreise vertreten.
Das ursprünglich nur im Hinblick auf die Normung beim DIN als Veranstaltung mit deutschsprachigen Referenten und Teilnehmern begonnene Expertenforum hat sich inzwischen zu einer internationalen Konferenz entwickelt. Nachdem mittlerweile über das für Licht und Beleuchtung zuständige europäische Normungsgremium CEN/TC 169 die Arbeitsgruppe WG 13 “Effects of light on humans” gegründet wurde und Kooperationen mit Arbeitsgruppen der internationalen Beleuchtungskommission CIE bestehen, ist die Internationalisierung sinnvoll und notwendig geworden.

3. Das 6. DIN-Expertenforum 2012

Die Veranstaltung wird wie in den Vorjahren vom DIN in Berlin ausgerichtet. Im Programm sind zunächst sechs Vorträge zu wissenschaftlichen Grundlagen geplant:

- **Präventionsstrategien in Unternehmen aus Sicht der VBG**
  Dr. Andreas Weber, Direktor Prävention, VBG, Hamburg
- **Sozialer Jetlag: Herausforderung für die Arbeitszeitgestaltung und gesundheitliche Implikationen**
  Dr. Céline Vetter, Institute of Medical Psychology, LMU München
- **OnTime: a chronobiology consortium in The Netherlands works towards applications**
  Prof. Martha Merrow, IMP LMU München
- **Melatoninmessung als Indikator: Methodik und Randbedingungen**
  Priv.-Doz. Dr. med Markus J. Schwarz,.Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie, Klinikum der Universität München
- **Voraussage der inneren Uhrzeit durch Licht**
  Prof. Till Roenneberg,
  Institute of Medical Psychology, LMU München
- **Sleep/Wake disruption in mental health: An opportunity for light-based intervention**
  Prof. Russell G Foster, Nuffield Laboratory of Ophthalmology, University of Oxford

Ebenso wie in den Vorjahren wird der Grundlagenteil durch eine moderierte Podiumsdiskussion mit Fragen von allen Teilnehmern ergänzt.
Im Anschluss daran folgen mehrere Vorträge zu Anwendungsbeispielen:

- **Dynamische Beleuchtung in Schaltwarten –Ergebnisse einer 2 Jahres Feldstudie**
  Dr. Herbert Plischke, Generation Research, Bad Tölz
- **Nutzerzentrierte Entwicklung von Steuerungskennlinien für dynamische Beleuchtung**
  Prof. Guido Kempter, UCT Research, University of Applied Sciences Vorarlberg, Dornbirn, AT
- **Emotionale Wirkung von farbigem Licht am Beispiel von Flugzeugkabinen**
  Alexandra Ehrlitzer, Dipl.-Ing. (FH), Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Hamburg
- **Gaining comfort on long-haul flights by chronobiologically improved cabin lighting**
  Prof. Jarek Krajewski, Experimental Industrial Psychology, Bergische Universität Wuppertal
- **Efficacy and protection ratios for bright light therapy lamp spectra**
  Luke L A Price, MSci, Health Protection Agency, Didcot, Oxfordshire, UK
- **Effekte der Beleuchtung auf die Befindlichkeit und auf die Leistungsfähigkeit von Senioren - Konsequenzen für die Beeinflussung der circadianen Rhythmik**
  Dr. Helmut Piazena, Charité - Universitätsmedizin Berlin und Technische Universität Berlin
- **Wirkung biologisch optimierter Beleuchtung auf die kognitive Leistung von Schülern**
  Dr. Katrin Hille, ZNL TransferZentrum für Neurowissenschaften und Lernen, Ulm
- **Wirksamkeit von Licht in der kinder- und jugendpsychiatrischen Klinikanwendung**
  Nino Wessolowski, Dipl.-Psych., Klinik für Kinder- und Jugendpsychiatrie, Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf
- **Lichttherapie und Burnout – eine Pilotstudie**
  Markus Canazei, MSc, Visual Perception Department, Bartenbach Lichtlabor, Aldrans, AT

3 Ergebnisse

Die wesentlichen Inhalte der Präsentationen, die Kernaussagen der Teilnehmer sowie die Ergebnisse der Diskussionen werden dokumentiert und bilden die Grundlage für den Vortrag auf der Licht 2012 zu dem dieses Papier wegen der zeitlichen Abläufe nur als Vorabankündigung gestaltet werden kann. Der Tagungsband zu der Veranstaltung wird vom Beuth Verlag zu beziehen sein.

Einfluss der Beobachtungsfeldgröße auf Farbabgleichversuche mit LED-Lichtquellen

Saskia Polster, Christoph Schierz
Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik
Prof.-Schmidt-Str. 26, D-98693 Ilmenau

1. Problemstellung

Grundlage für jede psychooptische Untersuchung, bei der Farbabgleiche vorgenommen werden, ist die Festlegung der Beobachtungsbedingungen und damit eines definierten Beobachterfeldes. Bisherige Untersuchungen beschränkten sich in der Regel auf Farbabgleichversuche bei einer bestimmten Beobachterfeldgröße. Aufgrund der unterschiedlichen verwendeten Spektren in den verschiedenen Untersuchungen konnten bisher kaum konkret die Auswirkungen der Beobachterfeldgröße verglichen werden.
Um zu ermitteln, wie stark die Wahl des Beobachterfeldes die Ergebnisse einer Untersuchung zu Metamerie-Effekten bei LED-Lichtquellen beeinflusst, wurden dieselben Referenz- und Testspektren mit unterschiedlichen Beobachterfeldgrößen untersucht.

2. Ziel

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

3. Stand der Wissenschaft

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

4. Forschungshypothesen

Es wird vermutet, dass der Einfluss der Beobachterfeldgröße beim Vergleich von zwei LED-Licht-Feldern abhängig von deren spektraler Zusammensetzung unterschiedlich stark hervortritt. Des Weiteren wird die Hypothese untersucht, dass dieser Effekt im Extremfall bei der Beleuchtung mit LED Lichtquellen stark unterschiedlicher Spektren so deutlich

hervortreten kann, dass es zu einem Invertierungseffekt kommt. Dies bedeutet, dass bei einer Änderung der Beobachterfeldgröße der Farbeindruck wechselt, sodass in einer Feldgröße die Testfläche grünlich wirkt während in einer anderen Feldgröße das Referenzfeld grünlich wahrgenommen wird.

5. Versuch

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

5.1 Versuchsaufbau

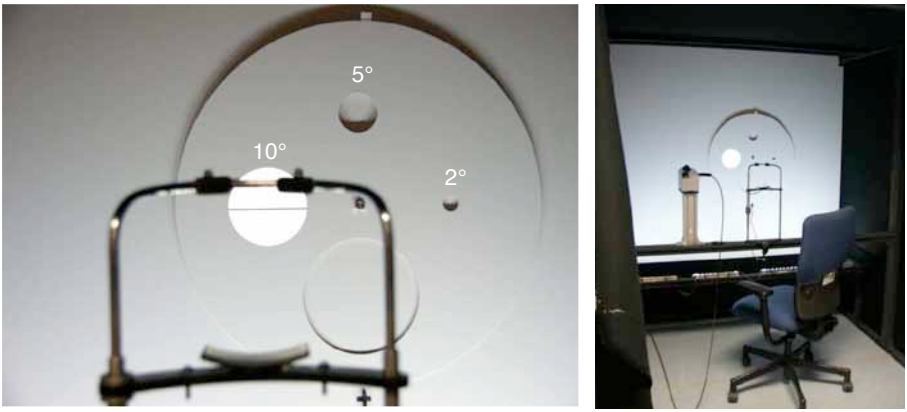


Abb. 1: Abgleichstand mit zweigeteiltem Bewertungsfeld und änderbaren Beobachterfeldausschnitten

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

5.2 Versuchsablauf

Die Probanden machten Abgleichversuche bei denen durch gezielte Steuerung der Testlichtquelle visuelle Gleichheit zwischen Testlichtfeld und Referenzlichtfeld hergestellt wur-

de. Ausgangssituation für jeden Abgleich war jeweils der messtechnisch an die Referenzlichtquelle angeglichene Farbort im CIE-Farbraum von 1976. Der Proband bewegte sich in zwei Dimensionen auf der Achse grün-rot und der Achse blau-gelb mit Hilfe von Richtungstasten. Realisiert wurde die Ansteuerung über einen Mischalgorithmus im CIE 1976 u'v'- Farbraum basierend auf den 2°-Spektralwertfun ktionen von 1931. Zudem konnte die Testperson die Helligkeit des Testfeldes wenn nötig visuell anpassen. Der Proband wurde angewiesen den visuell gleich empfundenen Farbort in jeder Richtung einmal zu verlassen bis er eine visuelle Differenz wahrnahm und dann wieder zum gewünschten Farbort zurückzukehren.

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

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

5.3 Untersuchte Spektren

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

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

	2°	5°	10°
3500K	9 Abgleiche je Versuchs-situation		
5000K			
6500K			

Legende:

SW voll	LED Vollspektrum
SW ACB	RGB-Mischung ((R: λ_{Peak}=595nm, G: λ_{Peak}=497nm, B: λ_{Peak}=467nm)
TLr RGBW	RGBW- Mischung mit leuchtstoffkonvertierter weißer LED ($\lambda_{Peak\ blau}$=440nm)
TLr RGBW+C	RGBW- Mischung(siehe TLr RGBW) mit konstanter Cyan-Beimischung
TLg RGBW	RGBW- Mischung mit leuchtstoffkonvertierter weißer LED ($\lambda_{Peak\ blau}$=460nm)
TLr RGB	RGB Mischung (R: λ_{Peak}=642nm, G: λ_{Peak}=534nm, B: λ_{Peak}=447nm)
TLg RGB	RGB Mischung (R: λ_{Peak}=640nm, G: λ_{Peak}=525nm, B: λ_{Peak}=450nm)

Tab. 1: Überblick über Versuchssituationen V1-V7 und Versuchsparameter

In Versuchssituation V3 wurde die deutliche Lücke bei 480nm im Spektrum der Referenzlichtquelle TLr RGBW durch Beimischen des Spektrums einer Cyan-LED aufgefüllt und wiederum mit der Testlichtquelle TL RGBW verglichen.
Um die Abhängigkeit des Einflusses der Beobachterfeldgröße von der Spektralzusammensetzung der verglichenen Spektren abschätzen zu können, wurden in Versuchssituation V2 zwei RGB Spektren, mit geringer Abweichung im grünen Bereich, miteinander verglichen. Außerdem wurde ein „Worst-Case“-Szenario mit möglichst unterschiedlichen Spektren generiert, indem RGB-LEDs mit einer Amber-Cyan-Blau Mischung verglichen wurden.

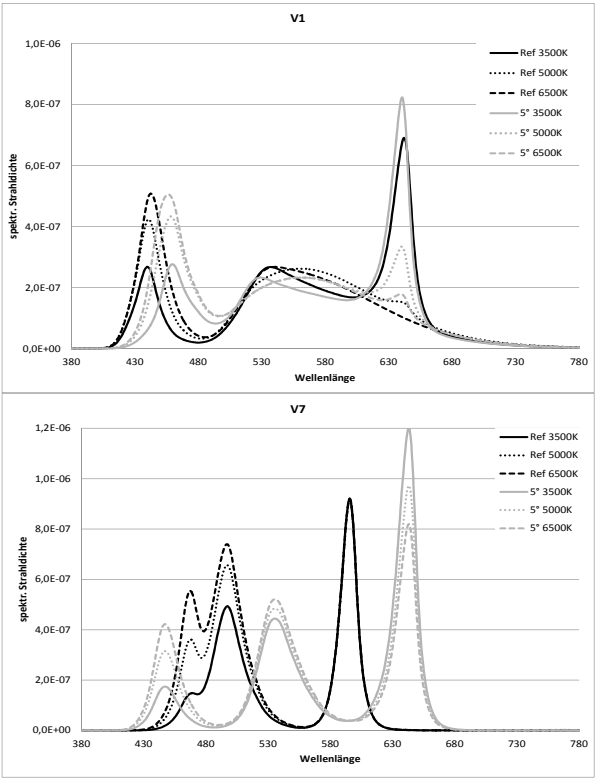


Abb. 2: Exemplarische Darstellung der Vergleichsspektren für Versuchssituation V1 und V7 bei 35000K, 5000K und 6500K

6. Ergebnisse

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

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

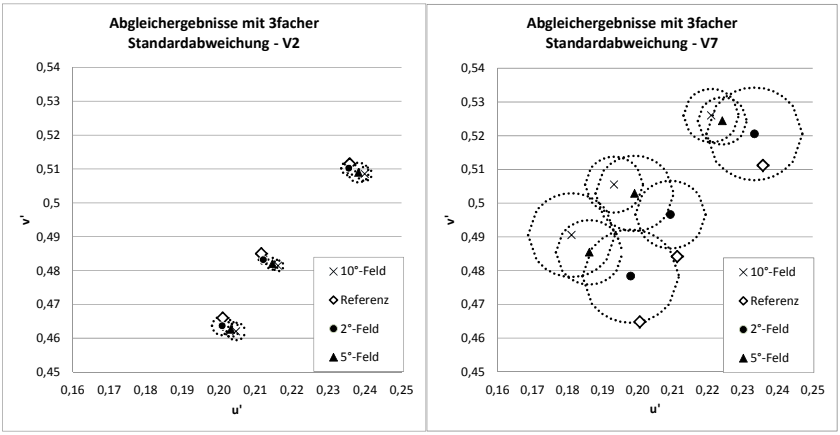


Abb. 3: Darstellung der Abgleichergebnisse mit 3facher Standardabweichung im u'v'-Farbraum (CIE-1931)

6.1 Farbabstand zur Referenz

Die unterschiedlichen Spektralwertfunktionen wurden für jeweils spezifische Beobachterfeldgrößen ermittelt. Daher wäre zu erwarten, dass die Farbabstände zwischen den abgeglichenen Test- und Referenzfeldern in den entsprechenden Systemen gleich Null werden. Beispielsweise sollten im Farbraum basierend auf den Spektralwertfunktionen von 1931 alle Abgleiche, welche unter einem 2°-Sehwinkel vor genommen werden auf denselben Farbort wie die Referenz abgebildet werden. Abb. 4 zeigt, dass dies nur in wenigen der Versuchssituationen tatsächlich der Fall ist. Größtenteils rutschen die Ergebnisse der modellierten Beobachterfeldgröße in den Bewertungssystemen näher an die Referenz als die Ergebnisse aus den anderen Abgleichen in anderen Beobachterfeldgrößen. Aus Abb.4 wird deutlich, dass die Farbabstände zur Referenz durch die Verwendung der CIE-2006-2°-Spektralwertfunktionen im Gegensatz zu denen von 1931 um mehr als die Hälfte reduziert werden können.
Je stärker sich die verglichenen Spektren in den Versuchssituationen voneinander unterscheiden, desto größer bleibt der Farbabstand zwischen Abgleichergebnis und Referenz. So bleibt auch bei Verwendung der neuen Spektralwertfunktionen ein maximaler Farbabstand von $\Delta E_{u'v'(Ref)}$=0,01 bestehen. Vergleicht man dies allerdings mit der Standardabweichung der Abgleichergebnisse (siehe oben), so stellt man fest, dass die Farbabstände der Abgleichergebnisse zur Referenz in derselben Größenordnung wie die 3fache Standardabweichung liegen. Die Metamerieeffekte beim Vergleich unterschiedlicher LED-Spektren werden demnach mit den CIE-2006-2°-Spektra lwertfunktionen gut modelliert.

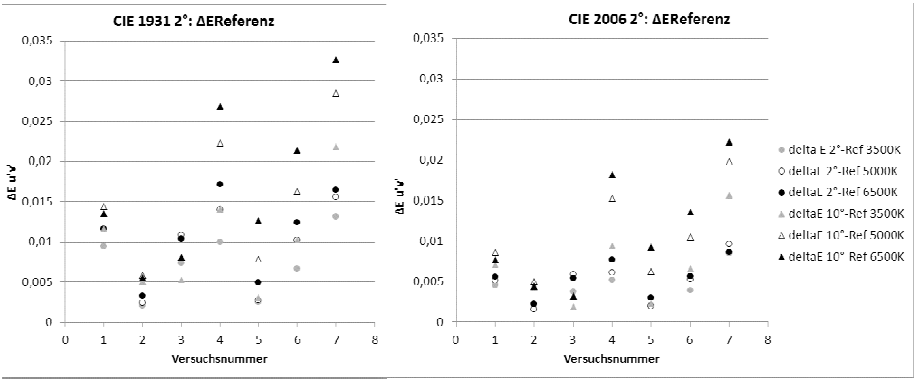


Abb. 4: Exemplarische Ergebnisse der Auswertung der Farbabstände $\Delta E_{u'v'(Ref)}$ der Abgleichwerte im 2° und 10° Feld zur Referenz, basierend auf den Spektralwertfunktionen von 1931 (links) und basierend auf den Spektralwertfunktionen ermittelt auf Grundlage der Sehzapfen-Grundfunktionen aus CIE170-1:2006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

6.2 Farbeindruck bei Beobachterfeldwechsel und Invertierungseffekt

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

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

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

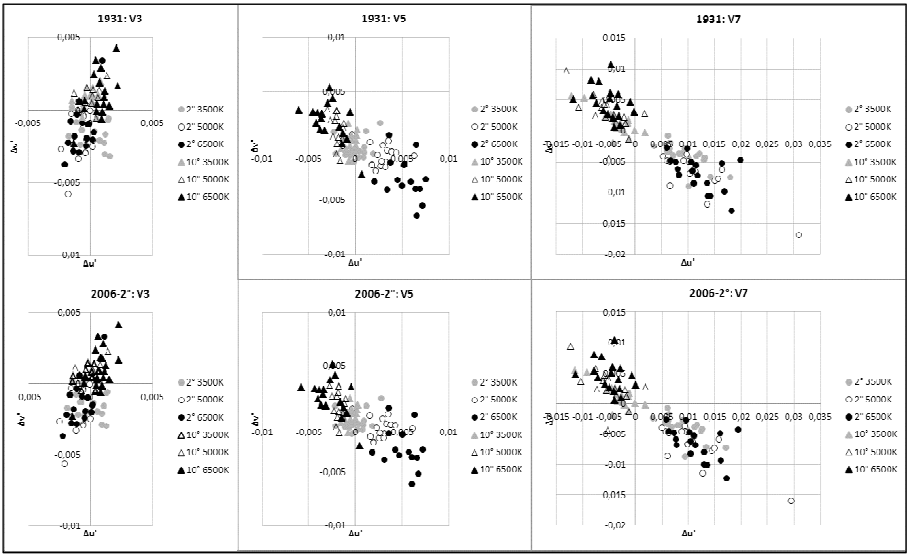


Abb. 5: Farbortverschiebungen der 2° und 10° Abglei che exemplarisch für Versuchssituationen V3, V5 und V7 dargestellt im u'v' Diagramm nach CIE-1931 (oben) und CIE-2006-2° (unten)

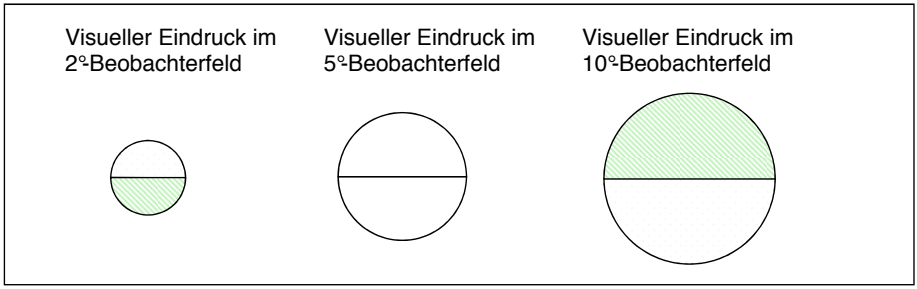


Abb. 6: Illustration des von den Probanden beschriebenen Invertierungseffekts (Schraffur stellt grünlich wahrgenommene Fläche dar)

7. Zusammenfassung und Diskussion

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

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

8. Literatur

/1/ Bieske K, Csuti P, Schanda J: *Colour appearance of metameric lights and possible colorimetric description*. CIE expert symposium on Visual Appearance, Paris, 2006

/2/ Csuti P, Schanda J, Petluri R, McGroddy K, Harbers G: *Improved color matching functions for better visual matching of LEDsources*. CIE 27th Session, Sun City/ZA, 2011

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

Dipl.-Ing. (FH) Nathalie Krause, Dipl.-Ing. Stefan Brückner, PD Dr.-Ing. habil. Peter Bodrogi, Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh (TU Darmstadt)

1 Zusammenfassung

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

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

2 Einleitung

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

Zu diesem Zweck besteht unsere neue Forschungsidee darin, in einer 3-Kammer-Box neben der Referenzlichtquelle gleichzeitig mit zwei Testlichtquellen zu arbeiten, die die gleichen farbigen Testobjekte beleuchten. Damit besteht die Möglichkeit, die Farbqualitätsaspekte zweier marktüblicher Lichtquellen (z.B. weiße LEDs oder Kompaktleuchtstofflampen) gleichzeitig direkt mit einer Referenzlichtquelle zu vergleichen. In diesen Paarvergleichen [2] werden, im Gegensatz zu früheren Arbeiten, statt der kontinuierlichen Bewertungsskalen auch kategorische Skalen (sehr gut, gut, mäßig, usw.) eingesetzt, die den alltäglichen Entscheidungsvorgängen der Benutzer besser entsprechen [3]. Somit soll mit dieser Arbeit untersucht werden, inwieweit sich die heute marktüblichen Lichtquellen der Innenraumbeleuchtung hinsichtlich der oben erwähnten Farbqualitätseigenschaften unterscheiden.

3 Untersuchungsmethodik

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

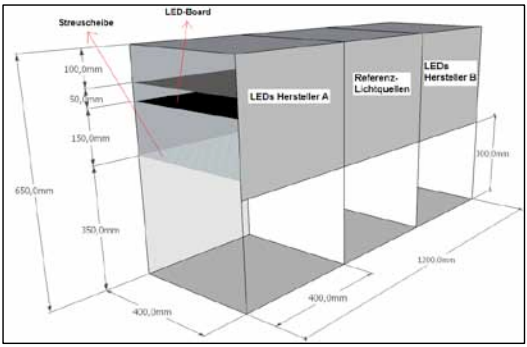


Abb. 1: Schematischer Boxaufbau

Abb. 2: 3-Kammer-Box mit allen Objekten

Folgende Testbedingungen sind gegeben:

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

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

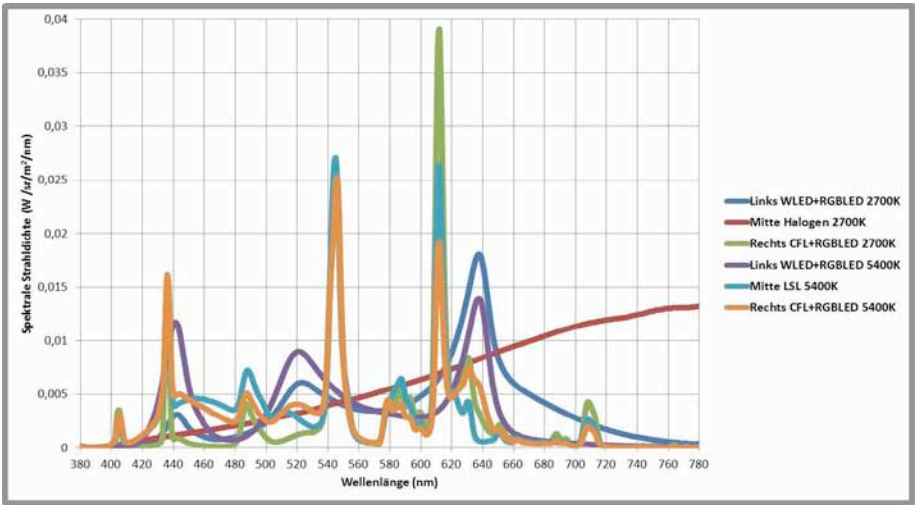


Abb. 3: Spektrale Strahldichte der sechs marktüblichen Lichtquellen

3.1 Untersuchte Parameter

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

Die Farbpräferenz bedeutet eine Entscheidung, welche Farberscheinung des gleichen Objekts bevorzugt wird. Die Probanden wurden aufgefordert, eine Reihenfolge festzulegen, die angibt, welche Beleuchtung ihnen am besten gefällt, wobei sie alle Objekte gleichzeitig betrachteten. Von allen Lichtquellen wurde der CQS Q_a-Wert (Colour Quality Scale) [5] berechnet und mit den Probanden-Ratings in Korrelation gebracht.

3.2 Versuchsablauf

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

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

3.3 Fragebogen

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

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

Tab. 1: Fragebogen. Die Antwortmöglichkeit besteht bei beiden Entscheidungen aus „links“, „Mitte“ oder „rechts“.

3.4 Testpersonen

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

4 Ergebnisse

4.1 Messzahlen der Farbqualität

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

Lichtquelle	Links_2700	Mitte_2700	Rechts_2700	Links_5400	Mitte_5400	Rechts_5400
T_C:	2633	2616	2777	5409	5412	5449
CIE R_a:	69	99	84	71	91	81
CQS Qa:	80	100	83	80	91	87
R_1	63	98	91	79	93	86
R_2	88	99	97	92	99	95
R_3	81	100	50	63	70	55
R_4	51	99	84	53	92	77
R_5	63	98	94	79	98	93
R_6	78	99	88	91	94	87
R_7	77	99	89	65	95	80
R_8	47	98	82	44	89	76
R_9 (rot)	**4**	94	31	**-15**	53	71
CQS Q_1 (rot)	**90**	99	83	**81**	87	95

R_{10}	77	98	58	81	76	64
R_{11}	36	98	90	47	92	83
R_{12}	71	97	52	75	83	71
R_{13}	68	98	88	88	91	89
R_{14}	86	100	65	78	79	70

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

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

4.2 Farbpräferenz

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

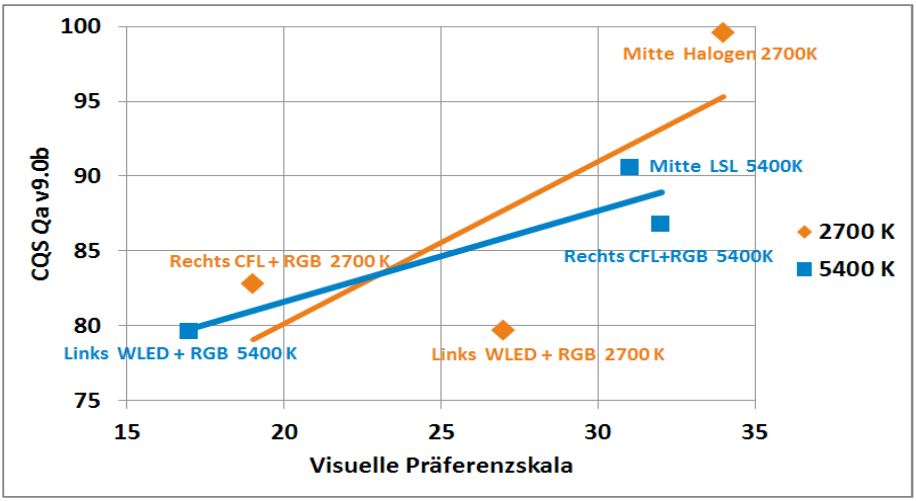


Abb. 4: Visuelle Farbpräferenzskala und CQS-Farbpräferenzmetrik Q_a

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

4.3 Chromatische Helligkeit

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

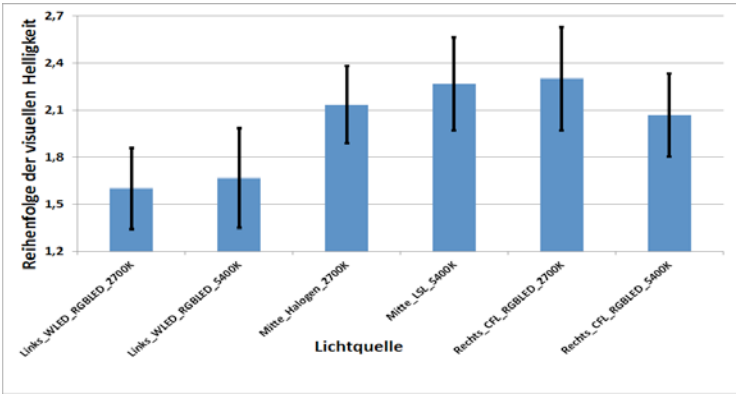


Abb. 5: Reihenfolge der Lichtquellen nach den visuellen Helligkeitsbewertungen der einzelnen farbigen Testobjekte als kontinuierliche Variable. Mittelwerte für alle 30 Testobjekte und 95%-Konfidenzintervalle, für alle Lichtquellen

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

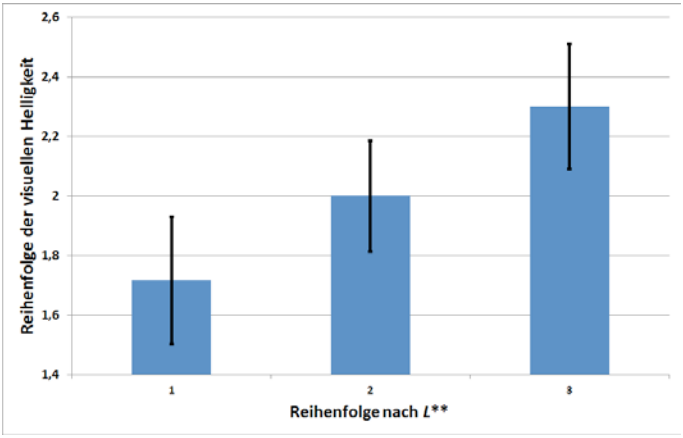


Abb. 6: Reihenfolge der Lichtquellen nach den visuellen Helligkeitsbewertungen der einzelnen farbigen Testobjekte: Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle für alle 30 Testobjekte (Ordinate), gruppiert nach der Voraussage der Reihenfolge nach der *L***-Metrik (Abszisse)

5 Danksagung

Diese Forschungsarbeit wird mit der Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Forschungsprojekts UNILED (Förderkennzeichen: 13N10751) durchgeführt. Die Autoren bedanken sich herzlich beim BMBF für diese Finanzierungsmöglichkeit.

6 Literatur

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

Blendung – Ein Rückblick über 100 Jahre Forschung

Stephan Völker, TU Berlin

Problemstellung

Mit der Einführung des elektrischen Lichtes begann die Ingenieurwissenschaft sich intensiv mit dem Phänomen der Blendung weltweit auseinanderzusetzen. Besonders gravierend tritt das Problem in der Sportstätten-, Kfz- und der Außenbeleuchtung auf. Maximale Sichtbarkeit bei geringstmöglicher Blendung ist hier das hohe Ziel einer guten Beleuchtungsplanung. Dass dies nur bedingt gelingt, zeigen unzählige Beispiele. Nicht immer lag und liegt dies an der mangelnden Umsetzung des vorhandenen Wissens. Gerade bei neuen Produkten reicht einfach das Wissen über das Phänomen der Blendung nicht aus.

Dies ist z. Z. bei der Umsetzung neuer Projekte mit LED in der Straßenbeleuchtung immer wieder erlebbar. Anwohner äußern: „Diese Leuchten blenden aber." Politiker und Stadtplaner sagen: „Die LED-Leuchten sind schön, aber sie blenden. Können wir diese nicht dunkler machen?"

Was ist der Grund dieses Erlebens? Analysiert man die Leuchtdichteverteilung einer LED-Leuchte mit einer Leuchte, welche eine konventionelle Natriumdampfhochdrucklampe enthält (siehe Abbildung 1), so fallen zwei wesentliche Unterschiede auf:

1. die Leuchtdichteverteilung bei der LED-Leuchte
    a. ist deutlich inhomogener
    b. weist sehr helle Einzelpeaks auf nahezu dunklem Hintergrund auf
    c. ist extrem winkelabhängig;
2. das Spektrum und damit
    a. die Farbtemperatur und
    b. die Farbwiedergabe unterscheiden sich signifikant.

Welche Folgen haben diese unterschiedlichen Erscheinungsformen?

Um eine Technologie hinsichtlich ihrer Güte bewerten zu können, werden zunächst Bewertungskriterien aufgestellt. Um möglichst frühzeitig die Güte eines Produktes beeinflussen zu können, benötigt der Lichtplaner Modelle, in welche diese Kriterien eingehen. Die Modellerstellung erfolgt dabei anhand empirischer Versuche mit der vorhandenen Technik. Diese Herangehensweise hat den gravierenden Nachteil, dass jede Technologieänderung die Modellbildung infrage stellt. Besser wäre daher eine Modellbildung basierend auf den photometrisch relevanten Eingangsdaten und neurologisch interpretierbarer Ausgangsdaten (Gehirnströme, deren Wirkung bekannt ist). Im Falle der Blendung erweist sich dieser Weg aber als nicht durchführbar, da noch immer zu wenig Wissen über neurologische Mechanismen hinsichtlich der Blendung bekannt sind.

Es bleibt daher nur der empirische Versuch, unser Wissen über das Phänomen der Blendung weiter zu vervollständigen. Ergänzend hierzu hilft eine Analyse der unzähligen Publikationen. Der vorliegende Artikel möchte aufbauend auf diesen Publikationen insbesondere die Ergebnisse der Kfz-Lichttechnik zu dem Phänomen der Blendung integrieren.

Stand der Wissenschaft / Technik

Lichttechniker haben in den vergangenen knapp 100 Jahren Blendungsbewertungsmodelle für viele Einsatzgebiete erstellt. In der Innenbeleuchtung findet das UGR-Verfahren Anwendung, die Außenbeleuchtung nutzt den TI-Wert, in der Kfz-Beleuchtung werden Beleuchtungsstärken in 25 m über der Hell-Dunkel-Grenze überprüft und die Sportstättenbeleuchtung kontrolliert einen GR-Wert (Glare Rating).

Zunächst muss man sich fragen, warum werden so viel unterschiedliche Maßzahlen verwendet, die doch alle das gleiche Phänomen versuchen zu beschreiben? Die Antwort ist schnell gefunden: Unterschiedliche Methoden führen anwendungsbezogen zu unterschiedlichen Zahlenwerten. Dies mag zwar praktikabel klingen, aber wissenschaftlich müsste sich Blendung für jede Operationalisierung mit einer Zahl beschreiben lassen. Ansätze hierzu hat es immer wieder gegeben (z. B. Voss 1990); diese wurden jedoch nie konsequent weiter verfolgt.

Für eine entsprechende Systematisierung ist es zunächst erforderlich, alle möglichen Einflussgrößen der Blendung zu erfassen. Untersuchungen zu diesen Faktoren gibt es zahlreiche[1]. Als abhängig Variablen für die Blendung wurden sowohl Schwellenkontrast, Reaktionszeit und Sehschärfe verwendet, als auch verschiedene Blendurteilsskalen. Entsprechend ihrer Wirkung - Reduktion der Sehleistung - beschreibt man mit den ersten drei Größen die physiologische Blendung (englisch disability glare), während man mit einem Blendurteil ein unangenehmes Gefühl erfasst. Letzteres wird auch psychologische Blendung genannt (englisch discomfort glare). Entsprechend dieser Einteilung sollen im Folgenden die wichtigsten Einflussfaktoren kurz erläutert werden.

Physiologische Blendung in Abhängigkeit von

I. Hornhautbeleuchtungsstärke, Blendwinkel und Adaptationsleuchtdichte[2]
Mit steigender Hornhautbeleuchtungsstärke, sinkendem Blendwinkel und geringerer Adaptationsleuchtdichte steigt die physiologische Blendung. Die Wirkung der Blendung ist dabei axialsymetrisch. Verschmutzung an Scheinwerfern und Leuchten erhöht die Blendung, da in der Regel die Lichtstärke in Richtung des Beobachters steigt.

$$Blendung \sim \frac{E_H^a}{L_{ad}^b \cdot \theta^c}$$

II. Wirkung mehrerer Blendquellen[3]
Die Blendwirkung von mehreren gleichzeitig wirkenden Blendquellen lässt sich durch Addition der Blendbeleuchtungsstärke jeder einzelnen Blendquellen berechnen.

$$Blendung = \sum_{i=1}^{n} Blendung\ der\ Quelle\ i$$

[1] [CIE99] 135-1 Disability glare; [CIE02] 147 CIE TC 3-01 Report: Glare from small, large and complex sources. In CIE Collection on Glare 2002
[2] Adrian [Adr61], [Adr75], Fisher/Christie [FiCh67], Fry [Fry55], Hartmann [Har61], [Har68] Schmidt-Clausen [SC71], Völker [Voe05]
[3] Crawford [Cra36]; Schmidt-Clausen/Bindels [SCB71]

III. Einfluss des Alters[4]
Die Dämmerungssehschärfe sinkt mit zunehmendem Alter bei Blendung deutlich stärker als ohne Blendung. Ab einem Alter von 40 Jahren steigt die Readaptationszeit stark an. Die interindividuellen Streuungen sind hoch.

$$Blendung \sim Blendung_{25-j\ddot{a}hrig}\left(1+\frac{Alter}{70}\right)^4$$

IV. Scheinwerfergröße und Leuchtdichte[5]
Der Einfluss der Scheinwerfergröße bzw. der Leuchtdichte ist bei konstanter Beleuchtungsstärke als gering einzustufen, liegt aber - wie Völker [Vö05]) zeigte - in der gleichen Größenordnung wie der Einfluss des Alters. Wählt man den Wertebereich der unabhängigen Variable Scheinwerfergröße zu klein, so findet man keine Abhängigkeit, wie die Untersuchungen von Hartmann, Bullough, Schmidt-Clausen, Khanh und Locher beweisen.

$$Blendung \sim L_Q^2 \cdot \Omega_Q$$

V. Lichtfarbe und Lampenart[6]
Beim Vergleich der Blendung von Glühlampe, Leuchtstofflampe Natriumdampf- und Quecksilberdampfhochdrucklampe zeigte sich kein signifikanter Einfluss der Lampenart auf den Schwellenkontrast, solange die Beleuchtungsstärke identisch war. Das gleiche Ergebnis berichtet auch Hartmann [Har68], welcher gelbes versus weißes Licht für Autoscheinwerfer untersuchte. Ebenfalls ergab sich kein Unterschied zwischen Halogenlampen (3200 K) und Gasentladungslampen (4500 K) für gleiche Beleuchtungsstärken. Bei 200 Feldmessungen stellte Diem [ScDi97] jedoch fest, dass die Beleuchtungsstärken nicht identisch waren. Sie lagen bei Gasentladungsscheinwerfern im Punkt B50L im Mittel bei 1,2 lx lagen, während sie bei Halogensystemen 0,87 lx betrugen. Dies bedeutet fast 40 % höhere Beleuchtungsstärken für Gasentladungsscheinwerfer und damit auch eine höhere Blendung dieser Systeme gemäß Gleichung 1.

Psychologische Blendung in Abhängigkeit von

A. Hornhautbeleuchtungsstärke (Lichtstärke), Blendwinkel und Adaptationsleuchtdichte[7]
Bei Erhöhung der Beleuchtungsstärke um eine Dekade, erhöht sich nach Bindels/Schmidt-Clausen die psychologische Blendung um 2 Punkte auf der de Boer Skala. Alferdinck bestätigt die Tendenz, kommt aber zu deutlichen Abweichungen sowohl im Absolutwert der de-Boer-Skala, als auch für den Anstieg der Geraden.

---

[4] Aulhorn und Harms [AuHa70]; Ijspeert [Ijs90]; Chinn [Chi02]
[5] Holladay [Hol26], Spiller [Spi38], Lukiesh/Gut [LuGu49], Petherbridge [Pet50], Putmam [Put51], Hopkinson [Hop57], [Hop67] Guth [Gut63], de Boer [dBo67], Lindae [Lin70], Hartmann [HaUc74], LiTG [LiT96], Levitin [Lev97], Alferdinck [Alf99], Manz [Man00]; Bullough et al. [BVDC03], Völker [Voe05]
[6] Jainski [Jai62]; Hartmann [Har68]; Alferdinck/Varkevisser [AlVa91]; Flannagan [Fla99], Chinn et al. [CKD02], Bullough et al. [BVDC03], [BuRe04], Sivak et al. [SSMF05], Van Derlofske et al. [DeBu06], Sivak et al. [SFSA03]
[7] Östenberg et al [ÖSB74], CIE-Report 55 [CIE55], Eichhoff [Eic62], Schmidt-Clausen und Bindels [BiSC74], Sivak und Alferdinck [Alf98]; Bullough et al. [BDF02]

$$Blendung \sim k \cdot \lg\left(\frac{{E_H}^a}{{L_u}^b \cdot \theta^c}\right)$$

k.. Altersfaktor (siehe C)

B. Wirkung mehrerer Blendquellen[8]

Die durchgeführten Studien kommen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen. Während Bindels/Schmidt-Clausen für die Bewertung der Blendung von der einfachen Addierbarkeit der Blendbeleuchtungsstärke jeder Blendquelle ausgehen, erzeugen nach Alferdinck [Alf98] zwei Blendquellen mit gleicher Lichtstärke die gleiche Blendung wie eine Blendquelle mit einer um 25 % höheren Lichtstärke.

C. Einfluss des Alters[9]

Ältere fühlen sich erwartungsgemäß bei geringeren Hornhautbeleuchtungsstärken stärker geblendet als Jüngere, wobei der Einfluss relativ gering war.

$$Altersfaktor = k = 9,05\left[1+\left(\frac{Alter}{66,4}\right)^4\right]$$

D. Einfluss der Erhebungsmethode[10]

Bei der Untersuchung unterschiedlicher Erhebungsmethoden wurden folgende Einflussgrößen ermittelt:

a. keine Altersdifferenzen in der Blendungsbewertung auf der 9-stufigen De-Boer-Skala;
b. bei Verwendung der Schwelle zwischen ‚Komfort' und ‚Diskomfort' fühlten sich ältere Menschen stärker geblendet, als jüngere;
c. Blendung unter realen Fahrsituationen wird geringer empfunden, als im Labor.

E. Scheinwerfergröße und Leuchtdichte[11]

Bei gleicher Beleuchtungsstärke ist der Einfluss der Leuchtdichte bzw. der Größe deutlich geringer als der Einfluss der Beleuchtungsstärke. Dennoch zeigen einige Untersuchungen, dass der direkte Blick in Scheinwerfer bei kleinen Durchmessern (< 70 mm) ein höheres subjektives Blendempfinden auslöst als der Blick in größere Scheinwerfer (zwischen 0,25 und 0,5 de Boer Skalen-Werte). Alferdinck gibt an, dass bei Blendquellen größer 100 mm die psychologische Blendung von der Leuchtdichte abhängig ist, während sie für kleine Blendquellen allein von der Lichtstärke bestimmt wird. Völker weist nach, dass die psychologische Blendung über den gesamten geometrischen Bereich der heute verfügbaren Scheinwerfer eine deutliche Abhängigkeit von der Scheinwerfergröße aufweist.

$$Blendung \sim L_Q^2 \cdot \Omega_Q$$

---

[8] Bindels und Schmidt-Clausen [BSC74]
[9] Olsen [OlSi84]; CIE Pub. 146-2002 [CIE146]
[10] Theeuwes und Alferdinck [ThAl96]
[11] Lindae [Lin70], Manz [Man01]; Sivak [Siv]; Schmits [Sch89]; Varkevisser und Alferdinck [VaAl92]; Alferdinck [Alf99]; Raphael [Rap04], Völker [Voe05]

F. Leuchtdichteverteilung[12]
An konventionellen Leuchten mit Glühlampen oder Gasentladungslampen konnten bisher keine Unterschiede gefunden werden. Neue LED-Leuchten weisen ein deutlich anderes Leuchtdichteprofil auf. Während Leuchtdichtepeaks in konventionellen Leuchten sich in einem relativ hellen Umfeld befinden, erscheint ein der Leuchtdichtepeak einer einzelnen LED vor einem nahezu dunklen Hintergrund. Da jeder Leuchtdichteunterschied im Auge verstärkt wird (helle Flächen erscheinen heller, während dunkle Flächen dunkler wirken), liegt es nahe, dass eine Vielzahl von Einzelpunkten deutlich blendender empfunden wird, als eine Peak auf einer relativ hellen Fläche.

Für die Blendungsbewertung ist es daher nicht ausreichend, nur die Hellzonen einer Blendquelle zu mitteln. Bereits Eberbach erwähnt, dass für die Beurteilung der Blendung die Leuchtdichteverteilung einer Blendquelle berücksichtigt werden muss. Warum er jedoch angibt, bei hohen Leuchtdichtekontrasten (deutlich größer 100 (K >>100)) darauf verzichten zu können, bleibt nach dem zuvor Gesagten offen.

G. Spektrum und Wellenlänge[13]
Die psychologisch Blendung ist von der spektralen Verteilung abhängig. Während sich bei monochromatischem Licht ein Minimum der psychologischen Blendung bei 577 nm ergibt, steigt diese zu den Randbereichen der spektralen Wahrnehmung an. Entsprechend sollten Natriumdampfhochdrucklampen eine geringere Blendung aufweisen, als Leuchtstofflampen oder LED.

Die Vergleiche im Bereich Automotiv Lighting zeigen jedoch, dass die Unterschiede für weißes Licht nicht so groß sind, wie zunächst erwartet. Einige der durchgeführten Studien[14] weisen eine Differenz von 0,5 bis 1 Skalenstufe auf der 9-stufigen de Boer Skala auf. Andere Untersuchungen fanden keine Unterschiede.

I. Farbtemperatur und Lichtfarbe[15]
Mit Anstieg der Farbtemperatur steigt die Blendung. Selbiges Ergebnis wurde auch gefunden, wenn man den Blauanteil einer Lichtquelle zugrunde legt. Je höher dieser war, desto stärker blendend und unangenehmer wurde die Blendquelle beurteilt.
Ergänzend hierzu bemerkte Chinn: Die "blaue" Farbe der Gasentladungsscheinwerfer wird unter 0,75 lx stärker blendend empfunden als das Licht der "gelben" Halogenlampen. Über 0,75 lx werden Halogen- und Gasentladungsscheinwerfer gleich beurteilt.

H. Erhebungsmethode[16]
In Laborversuchen wird die psychologische Blendung nach Lindea kritischer bewertet, als in dynamischen Fahrversuchen. Dies deckt sich auch mit Untersuchungen von Sivak, welcher die Blendung in Abhängigkeit des Schwierigkeitsgrades bewerten ließ. Je schwieriger die Aufgabe, desto unkritischer wurden Versuchspersonen hinsichtlich der psychologischen Blendung. Die gleiche Wirkung ließ sich nachweisen, wenn mehrere Aufgaben gleichzeitig zu erfüllen sind. Die Begründung für diesen Effekt sieht Sivak in einer Veränderung des Wahrnehmungsniveaus für Sehstörungen.

---

[12] Eberbach [Ebe74]
[13] Sivak et al. [SFES89]; Bullough und Rea [BuRe04], Flannagan [Fla99]; Sivak et al. [SSMF05] und VanDerlofske und Bullough [VaBu06]
[14] Olsen und Sivak [OlSi84b], Varkevisser und Alferdinck [VaAl92]; Sivak et al. [SFTB93]; Lachenmayr [Lac97]; Bullough et al. [BDF02]; Sivak et al. [SSF06]
[15] Hartmann [Har68]; Alferdinck [Alf98]; Chinn et al. [CKD02], Bullough, van Derlofske [BVDC03]
[16] Lindea [Lin67], [Lin70], Olson [OlSi81]; Sivak [Siv97]

In einer anderen Studie berichtet Sivak, dass deutsche Versuchspersonen identische Scheinwerfer um 0,7 de-Boer-Skalenwerte blendender bewerteten als amerikanische Versuchspersonen. Offensichtlich spielt auch die Gewöhnung an ein bestimmtes Blendniveau eine Rolle, da dies bei älteren amerikanischen Fahrzeugen deutlich höher liegt.

Ebenso führt das Tragen von Sehhilfen zu einer im Mittel um 0.5 de-Boer-Skalenwerte höheren Blendung. Ursache dürften Kratzer und Schlieren auf den Sehhilfen sein, die nur bei neuwertigen Sehhilfen ganz auszuschließen sind.

Vergleich der Modelle

Vergleicht man nun die einzelnen Berechnungsmodelle, so ergibt sich folgendes Bild (siehe Tabelle 1):

	Innenbeleuchtung	Außenbeleuchtung	Kfz-Beleuchtung
Physiologische Blendung	$L_{säq} = k \cdot \frac{E_g}{\theta^2}$	$TI = 65 \cdot \frac{k \cdot E_g}{L_{ad}^{0,8} \theta^n}$ $n = 2,3 - 0,7 \cdot \log\theta$ für n < 2°;n=2 für n>2°	$E_{max}(25\ m) \le 0,4\ lx$ für Halogen $E_{max}(25\ m) \le 0,5\ lx$ für Xenon
Psychologische Blendung	$UGR = 8 \cdot \log\left(\frac{0,25}{L_b}\right)\sum\left(\frac{L_g{}^2 \Omega_g}{p^2}\right)$ VCP (Visual Comfort Probability)	GCM siehe unten	W siehe unten nach Manz[17]
Psychologische Blendung	$GI = 10 \cdot \log\left[0,45 \cdot \sum_i \left(\frac{L_g{}^{1,6} \Omega_g{}^{0,8}}{L_b \cdot p^{1,6}}\right)\right]$		$W = 9 - 8\left[\frac{E^{0,5}}{E^{0,5} + (0,0147 \cdot d^{0,47})^{0,5}}\right]$
Psychologische Blendung	$CGI = 8 \cdot \log\left[2 \cdot \frac{1 + E_d / 500}{E_i + E_d} \cdot \sum_i \left(\frac{L_g{}^2 \Omega_g}{p^2}\right)\right]$		

$$GCM = G = 13,84 - 3,31 \cdot \log I_{80} + 1,3\left(\log\frac{I_{80}}{I_{88}}\right)^{0,5} - 0,08 \cdot \left(\log\frac{I_{80}}{I_{88}}\right) + 1,29 \cdot \log F + 0,97 \cdot \log L_b + 4,41 \cdot \log h' - 1,45 \cdot \log p$$

$$W = 5 - 2 \cdot \lg\left(\frac{E_g \cdot 1000 \cdot \frac{5}{\sqrt{D}}}{3\left(1 + \sqrt{\frac{L_u}{0,04}}\right) \cdot \theta^{0,46}}\right)\left(1,1 - 6,0 \cdot 10^{-5} \cdot T\right)$$

G.. Blendungsbeurteilung auf einer 9-Punkte-Skala; F.. leuchtende Fläche gesehen aus 80° vertikal; h.. Leuchtenhöhe; p.. Anzahl Leuchten/km, W.. de Boer Blendurteil (9-stufig); D.. Durchmesser Scheinwerfer; T.. Farbtemperatur Scheinwerfer

[17] Manz [Man08]

Während die Bewertung der physiologischen Blendung mit einem fast identischen Modell erfolgt, scheinen die Berechnungen der psychologischen Blendung zwischen Innen- und Außen-/ Kfz-Beleuchtung sehr unterschiedlich zu sein. Vos [Vos03] zeigte jedoch bereits vor gut 10 Jahren, dass sich GI und GM ineinander umrechnen lassen.
Insofern stellt sich die Frage, ob nicht für die Bewertung der Blendung ein einziges Modell mit angepassten Koeffizienten einen sinnvollen Ansatz darstellen könnte. Für die Automobilbeleuchtung ergeben sich mit den Untersuchungen von Völker [Voe05] folgende Zusammenhänge:

$$GI_{car} = c_1 + c_2 \cdot \frac{L_Q^2 \cdot \Omega^1}{L_{ad}^{c_3} \cdot p^{c_4}}$$

	Ohne Angabe LQ	Halogenlampe	Xenonlampe
C_1	0,0001	0,0001	0,00009
C_2	6,6464	6,5145	5,3587

Die Koeffizienten c3 und c4 sollten für vergleichende Betrachtungen der Blendung im Punkt B50L gleich Null gesetzt werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Beitrag zeigt, dass es möglich scheint, die vorhandenen Blendungsbewertungsmodelle auf ein Modell zurückzuführen. Zurzeit fehlen noch einige Einflussgrößen, welche aber bereits in Kürze vorliegen dürften. Diese müssen anschließend für alle Anwendungsfälle (Innen-, Außen-, Kfz-, Sportstättenbeleuchtung, etc.) validiert werden.

Heute gehen in die vorhandenen Blendungsbewertungsmodelle neben der Beleuchtungsstärke auf der Hornhaut, der Blendwinkel, teilweise Größe und mittlere Leuchtdichte der Blendquelle, die Umfeldleuchtdichte, die Anzahl der Leuchten, das Alter der Versuchspersonen und die Farbe der Regenbogenhaut ein. Die Leuchtdichteverteilung bzw. das Spektrum werden nicht berücksichtigt. Gerade die Aufnahme der Leuchtdichteverteilung lässt eine deutliche Verbesserung der Blendvorhersage für moderne LED-Leuchten erwarten.

Am Fachgebiet wird z. Z. ein Perimeter aufgebaut, mit welchem anschließend sowohl der spektrale Einfluss auf die Blendempfindung als auch die der Leuchtdichteverteilung (hohe Leuchtdichtegradienten) untersucht wird. Entsprechende Ergebnisse werden auf im Tagungsband der kommenden Licht 2014 veröffentlicht.

Literatur (Auswahl)

Adrian, W. [Adr61]: Einfluss störender Lichter auf die extrafoveale Wahrnehmung des menschlichen Auges. Lichttechnik 13 (1961) 9; 10; 11, S. 450
Alferdinck, J.W.A.M., Varkevisser, J. (1991) [Al91]: Discomfort glare from D1 headlamps of different size. TNO IZF C-21
Aulhorn, E; Harms, H. [AuHa70]: Über die Untersuchung von der Nachtfahreignung von Kraftfahrern mit Mesoptometer. Klinisches Monatsblatt der Augenheilkunde Nr. 157, S. 843-873 1970
Crawford, B. M. [Cra36]: The integration of the effects from a number of glare sources. Proc. Phys. Soc. London Vol 48, 1936 p 35
Chinn, B; et. al. [Chi02]: Primary Safety New Car Assessment Programme- Annual

Report 2001/2002; TRL Limited August 2002, S. 84 – 100
De Boer, J. B. [dBo67]: Visual perception in road traffic and the field methodology for evaluating discomfort glare. In De Boer, J.B. (ed.), Public Lighting. Eindhoven, Netherlands: Philips, Technical Library. 1967
Eberbach, K.: [Ebe74]: Der Einfluß der Leuchtdichtestruktur von Lichtquellen auf die Blendempfindung, Lichttechnik, 26. Jahrgang Nr. 6, 1974
Flannagan, M. et. al. [Fla89]: Effect of wavelength on discomfort glare from monochromatic sources. The University of Michigan Transportation, Research Institute, Report No. UMTRI-89-30, Nov 1989
Fry, G. A. [Fry55]: Physiological bases of disability glare. Proceedings CIE Zürich 1955, Vol I 1. 42 U-F/4 p. 2
Hartmann, E. [Har61]: Untersuchungen zur physiologischen Blendung. Dissertation; Universität München 1961
Hartmann, E. [Har63]: Die Schwelle der physiologischen Blendung; LICHTTECHNIK15 1963, Nr. 10 S. 503
Hartmann, E; Moser, E. A. [HaMo68]: Das Gesetz der physiologischen Blendung bei sehr kleinen Blendwinkeln, LICHTTECHNIK 20 Nr. 6 1968 S. 67 A-69A
Holladay, L. L. [Hol26]: The fundamentals of glare and visibility. J.Opt. Soc. Amer. 12 (1926) S.271 -319
IJspeert J. K. et. al. [IJs90]: The intraocular straylight function in 129 healthy volunteers; dependence on angel, age and pigmentation, Vision Res. 1990, Vol. 30, pp 699-707
Jainski, P. [Jai62]: Das Verhalten der Unterschiedsempfindlichkeit bei Blendung mit verschiedenen Lichtarten. LICHTTECHNIK 14 Nr. 2, S. 60-65, 1962
Lindae, G [Lin67].: Einige Möglichkeiten zur Verbesserung des Abblendlichtes, ATZ 1967 Nr. 7 S. 225-230
Luckiesh, M.; Holladay, L. L. [LuHo25]: Glare and Visibility, Journal of the illuminating Enginee-ring Society, Vol 20, 1925, p 221
Manz, K. [Man00]: Der Einfluss der Größe eines Scheinwerfers auf die psychologische Blendung, Manuskript, unveröffentlicht, 2000
Manz, K. [Man08]: Vorlesungsskript Optische Technologien im Automobil Kap. Blendung 2008
Raphael, S. [Rap04]: Blendungsbewertung von Scheinwerfern. Diplomarbeit, L-LAB/Technische Universität Ilmenau, 2004, S.: L-LAB
Schmidt-Clausen, H. J.; Bindels, J. Th. H. [SCB71]: Die Schwellenleuchtdichteerhöhung als Blendungsbewertungskriterium, LICHTTECHNIK Nr. 10, S. 547-552, 1971
Schmidt-Clausen, H. J. Bindels, J. Th. H. (1974) [BSC74]: Assessment of discomfort glare in motor vehicle lighting. Lighting Research & Technology, Vol. 6 /2,p 79–88.
Sivak, M; Olsen, P. [SiOl84]: Glare and Headlighting Design. International Congress & Exposition Detroit, Michigan February 27-March 2, 1984
Sivak, M. Simmons, C.J. Flannagan, M.J. [Si88]: Effect of headlamp area on discomfort glare. The University of Michigan Transportation Research Institute, Report No. UMTRI-88-41, Oct 1988, Nr. UMTR88
Sivak, M., Schoettle, B., Minoda, T. & Flannagan, M. [Si05]: Blue content of LED headlamps and discomfort glare (UMTRI 2005-2). Ann Arbor, MI: University of Michigan Transportation Research Institute. 2005, Nr. SSMF05.
Völker, S. [Voe05]: Brauchen wir Leuchtdichte-Obergrenzen für eine Blendungsreduktion von Kraftfahrzeugscheinwerfern? Zeitschrift Licht 57 (2005) 6, S. 520 – 525 Teil 1, ISSN 0024/2861 und Teil 2: Zeitschrift Licht 57 (2005) 7/8, Teil 2
Vos, J. J. [Vos03]: Reflections on glare, Lighting Research Technologie, Vol. 35 No. 2 pp 163-176, 2003

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

Mathias Niedling, Daniel Kierdorf, Stephan Völker
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik, Einsteinufer 19, 10587 Berlin

1. Abstract

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

2. Einleitung

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

3. Stand der Wissenschaft

Bereits 1955 stellte De Boer /1/ fest, dass bei gleichem Grad der psychologischen Blendung bei Natrium-Niederdrucklampen höhere Leuchtdichten als bei Quecksilberdampf-Hochdrucklampen zulässig sind. Mit dem Einsatz von Gasentladungslampen in Automobilscheinwerfern wurden dann vermehrt Stimmen laut, die sich über erhöhte Blendung im Straßenverkehr beklagten. Untersuchungen von Völker /2/ dazu haben ergeben, dass im

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

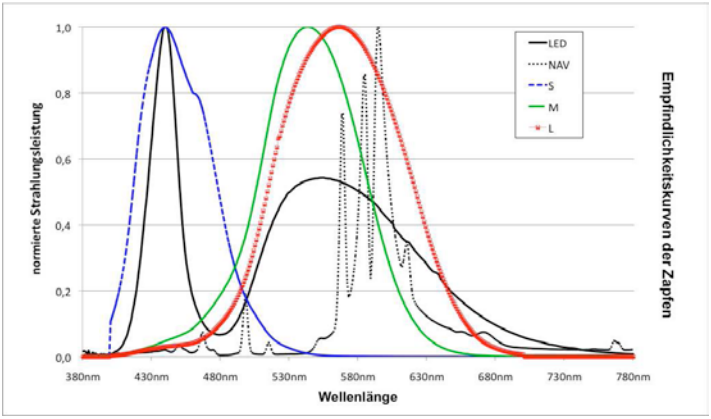


Abbildung 1: Spektrum einer Konversions-LED und einer NAV-Lampe und der Empfindlichkeitskurven der Zapfen

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

4. Untersuchung

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

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

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

5. Ergebnisse

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

6. Literatur

/1/ De Boer, J.B., Observations on discomfort glare in street lighting; influence of the colours of light. 13. CIE Kongress Zürich, 1955

/2/ Völker S., Habilitationsschrift, L-LAB Paderborn, 2008

/3/ Sivak et al., Blue content of LED headlamps and discomfort glare, University of Michigan, Report No. UMTRI-2005-2, 2005

/4/ Bodgrogi et al., Spectral sensitivity and additivity of discomfort glare under street and automotive lighting conditions, 27. CIE Kongress, Sun City - Südafrika, 2011

/5/ Fekete et al., Spectral discomfort glare sensitivity investigations, Ophthalmic and Physiological Optics, 2010:30

/6/ http://www.goochandhousego.com/products/life-science-instrumentation/spectral-imaging-synthesis/ol-490-agile-light-source, letzter Zugriff am 14.06.2012

Wahrnehhmungsbasierte Lichtplanung – Theorie und Praxis

Arne Hülsmann und Katja Schiebler (geb. Schölzig)
vom Büro Peter Andres Lichtplanung
Tarpen 40, Valvo Park 1
22419 Hamburg

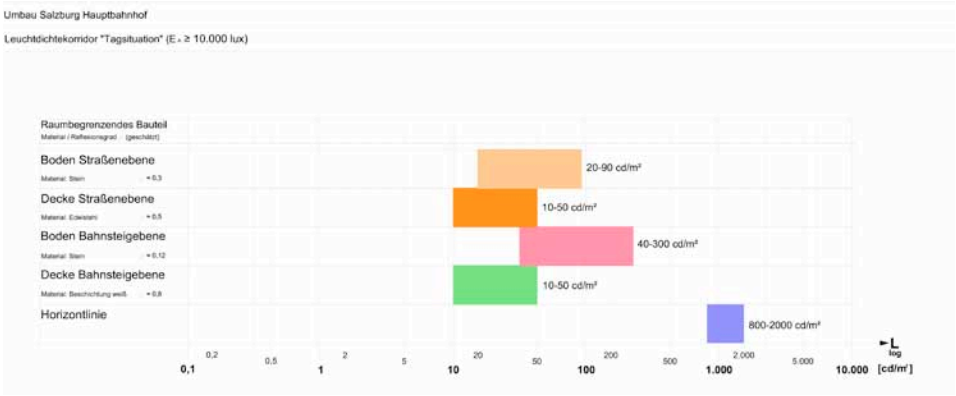
Für eine wahrnehmungsbasierte Lichtplanung muss man über die Grenzen der normbasierten Leuchtenplanung hinausgehen und verschiedenste Einflussfaktoren berücksichtigen. Eine vollständige Lichtplanung ist viel mehr als nur die Sicherstellung einer ausreichenden Lichtmenge. Erst nach einem ausreichenden Verständnis und einer Analyse des Tageslichtverhalten eines Gebäudes, der Materialität, der Räumlichkeit, der Nutzung und der Umgebung sowie der biologischen Voraussetzungen des menschlichen Organismus kann eine für das jeweilige Gebäude angemessene Lichtplanung erfolgen. Dabei darf der Lichtplaner keine Angst haben auch in den analysierten Bereichen 'ungewöhnliche' Verbesserungsvorschläge zu machen um ein optimales Zusammenspiel der Licht-Raum-Atmosphäre zu gewährleisten.

1 Bahnhof Salzburg

Bauherr : *ÖBB Infrastruktur*
Architekt: *kada wittfeld architektur*
Leistungsumfang: *Tageslicht- Kunstlichtplanung*

1.1 Bewertung des Tageslichts

Beim Bahnhof Salzburg haben die Lichtplaner mit den Architekten Hand in Hand gearbeitet und gemeinsam Normen überschritten um die gewünschte Wirkung auf die Besucher zu erzielen.
Der historische Bahnhof sowie die hinzukommenden Bauabschnitte wurden zunächst durch eine rechnergestützte Simulation auf ihr Tageslichtverhalten untersucht. Hierzu war es wichtig nicht nur die vorhandenen und geplanten Geometrien genau nachzubilden, sondern auch die Reflexionsgrade der verschiedenen Materialien zu berücksichtigen. Aus den Ergebnissen konnten sogenannte Leuchtdichtekorridore bei Tag erstellt werden. Leuchtdichten sind ein wichtiges Werkzeug der Lichtplanung, da das menschliche Auge nicht in der Lage ist, Beleuchtungsstärken direkt und unmittelbar zu sehen bzw. zu bewerten - erst über die Reflexion eines Materials wird das Licht für das Auge sichtbar. So stellen Leuchtdichten vom Menschen wahrnehmbaren Helligkeiten dar. Mit den Leuchtdichtekorridoren und ihrer systematischen Darstellung ist es möglich sämtliche auf das Auge eindringenden Leuchtdichten untereinander in ein kontrolliertes Verhältnis zu bringen, um sogenannte stabile Wahrnehmungszustände zu erreichen. Sie sind ein wichtiges Hilfsmittel um das Tages- und Kunstlicht in Räumen, gleichzeitig aber auch um Materialien zu bewerten.



Tab 1: Bahnhof Salzburg Leuchtdichtekorridore am Tag

1.2 Auswirkungen auf Architektur und Kunstlicht

Um die Besucher in den Shoppingbereich des Untergeschosses zu locken, musste dieser attraktiv wirken und durfte lichttechnisch nicht wesentlich vom tagesbelichteten Außenbereich abfallen. Anhand der Leuchtdichtekorridore stellte sich heraus, dass, um dieses Ziel zu erreichen, die benötigte Lichtmenge und der damit verbundene Energieaufwand ökologisch nicht mehr zu vertreten war. Daher mussten nicht nur die Lichtmengen sondern auch die Materialien angepasst werden, um den benötigten Helligkeitswert (die gewünschte Leuchtdichte) zu erreichen, damit Aufmerksamkeit zu erzeugen und gleichzeitig ein harmonischen Zusammenspiel zwischen der Atmosphäre des Ober- und Untergeschosses zu realisieren.
Der Boden der Bahnsteigebene wurde nun dunkel gestaltet, während das ursprünglich dunkler gestaltete Untergesschosses nun hohe Reflexionsgrad aufweisen sollte. Trotz dieser Maßnahme, mußten die tageslichtarmen Bereiche im Untergeschoss immer noch mit 1000lx angeglichen werden, damit beim Durchschreiten der unteren Ebene eine Kontinuität der Lichtatmosphäre zu erfahren/ erleben ist.

Bild 1: Bahnhof Salzburg – ursprüngliches Materialkonzept
Bild 2: Bahnhof Salzburg – aktuelles Bahnsteigfoto (Foto: Lutz Langer)

An dem Tageslicht- Kunstlichtmodells im Maßstab 1:32 in den Dimensionen 2,3m x 1,4m und der Höhe von 1,6m waren die Planungsbeteiligen im Rahmen des Planungsprozesses in der Lage sowohl Materialitäten als auch Beleuchtungsstärken flexibel einzustellen. Dieses Werkzeug hat Entscheidungsprozesse im Planungsverlauf stark vereinfacht.

Bild 3: Bahnhof Salzbug - Arbeitsmodell

2 Schule Stübenhofer Weg

Bauherr : *GWG Gewerbe*
Architekt: *Architekturbüro Mathez*
Leistungsumfang: *Tageslicht- Kunstlichtplanung*

2.1 Optimierung des diffusen Tageslichts

In einer Lichtplanung geht es nicht immer 'nur' darum Tageslichtdefizite auszugleichen sondern im ersten Schritt sollte zunächst das maximale Tageslichtpotential ermittelt und gegebenenfalls mit entsprechenden Maßnahmen die Architektur, in Absprache mit den Architekten, hinsichtlich des Tageslichteintrags optimiert werden. Dabei können Tageslichtöffnungen, Lichtumlenksysteme, Materialien usw. angepasst werden. Ist der Tageslichteintrag weitestgehend definiert, besteht die wesentliche Aufgabe einer tageslichtabhängigen Lichtplanung zunächst darin, die Dynamik des Tageslichts in hellen, fassadennahen Bereichen auf ein notwendiges, aber funktionelles Maß zu reduzieren und in weniger gut natürlich belichteten Bereichen mit geeigneten Maßnahmen anzuheben, sodass der Raum ausreichend und blendfrei beleuchtet ist. Ziel ist, tagsüber die Innenräume eines Gebäudes hauptsächlich mit Tageslicht zu beleuchten. Erst wenn das nicht mehr möglich ist, muss durch Kunstlicht ergänzt werden.

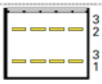
Ein natürlicher, geregelter Tag-/Nachtrhythmus ist ausschlaggebend für unsere Gesundheit und nachhaltiges Leistungsvermögen. Biologisch betrachtet unterstützt Licht weit mehr als nur das Sehen. Es steuert viele Organfunktionen und Verhaltensweisen des menschlichen Körpers und entscheidet wesentlich über den Schlaf-Wach-Rhythmus.
Auf der Grundlage diverser Studien, sowie an der Orientierung des natürlichen Tageslichts wurden Beleuchtungsstärken von ca. 1.000 lx als Grundvoraussetzung für Arbeitsbereiche mit erhöhtem Konzentrations-und Lernanspruch, wie z. B. die in den Klassenräumen von Schulen, angenommen. Die Notwendigkeit von biologisch wirksamem Licht in Klassenräumen ist bereits durch viele Institutionen anerkannt worden, jedoch ist es auch im gleichen Maße wichtig, die Nachhaltigkeit der Beleuchtungsanlage nicht aus den Augen zu verlieren. Wird jeder Raum durch Kunstlicht mit einer Lichtintensität von 1 000 lx ausgestattet, hat dies entsprechende energetische und wirtschaftliche Folgen. Bauherren schrecken aufgrund erheblich erhöhter Investitionskosten zurück und da momentan die Grundbeleuchtung solcher Institutionen zwar durch recycelbare aber quecksilberhaltige Lampen erfolgt, hat eine Überbestückung der Leuchten in den Klassenräumen auch umwelttechnische Folgen.

Um nun aber allen Parteien, den Schülern, den Investoren und der Umwelt, eine optimale Lösung anzubieten, wurde das sogenannte „Kompensationsprinzip“ entwickelt. Dieses Prinzip nutzt vor allem das Tageslichtpotential jedes einzelnen Raums aus und erzeugt die biologisch wirksame Lichtmenge (von mind. 1.000 lx) durch eine Addition von Kunstlicht und Tageslicht. Hierzu muss für sämtliche Klassenräume des Schulgebäudes eine Tageslichtuntersuchung durchgeführt werden, um die Klassenräume in verschiedene Tageslichtkategorien einzuteilen und die jeweilige notwendige Kunstlichtzugabe genau zu ermitteln.

2.1 Kunstlichtplanung anhand der Tageslichtanalyse

Die Räume, die bereits durch Tageslicht biologisch wirksames Licht in ausreichender

Quantität erhalten, werden nur für den Nachtfall mit einem von der DIN geforderten Minimum an künstlichem Licht für Unterrichtsräume (300 lx für Grundschulen) ausgestattet. Bei allen anderen Kategorien sollte je nach Tageslichteinfall morgens für mindestens ein bis zwei Stunden und je nach Tageslichtkategorie die notwendige Kunstlichtmenge zugesteuert werden, um die 1 000 lx zu erreichen. Es stellte sich heraus, dass für das Kompensationsprinzip bei einem durchschnittlich großen Klassenraum eine dreireihige Leuchtenanordnung sinnvoll ist. Sie ermöglicht eine angepasste Leuchtenbestückung entsprechend der definierten Kunstlichtzugaben und eine optimale Lichtkegelüberschneidung mit ausgezeichneten Gleichmäßigkeitswerten. Eine gute Gleichmäßigkeit unterstützt zudem moderne Unterrichtsformen mit flexibler Möblierung, da die Schüler sich in jeden Bereich des Raumes aufhalten können, ohne in dunklere Zwischenzonen zu gelangen. Bei der dreireihigen Leuchtenanordnung werden jeweils vier Leuchten pro Reihe montiert (außer für die niedrigste Tageslichtkategorie - den reinen Kunstlichtfall von 1 000 lx). Diese Leuchten können ein- oder zweilampig bestückt werden. Durch das gleiche äußere Erscheinungsbild der ein und zweilampigen Leuchten kann auch innerhalb eines Raumes die Bestückung der Leuchtenreihen variieren. So kann das optisch einheitliche Architekturkonzept der Klassenräume gewährleisten werden.
Für die niedrigste Tageslichtkategorie sind fünf Leuchten pro Leuchtenreihe notwendig, um annähernd die biologisch wirksame Lichtmenge zu erreichen. Weil diese Räume mit sehr wenig Tageslicht ausgestattet sind, sollte hier die natürliche Farbdynamik des Tages durch eine leichte Veränderung der Farbtemperaturen im Raum unterstützt werden. Jede Leuchte wird daher mit zwei verschieden farbigen Leuchtstofflampen bestückt (jeweils einer warm- und eine kaltweiße) die automatisch, je nach Tageszeit zugeregelt werden.

Tageslichtkategorie	Basisprogramm	Komfortprogramm
1 Tageslichtquotient 7 - 10 %		- 3reihige Anordnung je 4 Leuchten - 1fache Bestückung - tageslichtabhängige Steuerung auf 300 lx Gesamtlichtmenge - biologisch wirksame Lichtmenge wird durch Tageslicht erreicht
2 Tageslichtquotient 4 - 7 %	 3 2 3 1 - 2reihige Anordnung je 4 Leuchten - 2fache Bestückung - manuelle Schaltung nach T_L-Einfall - Leuchtmittel werden getrennt voneinander geschaltet (siehe Schaltgruppen)	- 3reihige Anordnung je 4 Leuchten - fensternahe und mittlere Reihe 1fach bestückt - 3. Reihe 2fach bestückt - tageslichtabhängige Steuerung auf 300 lx Gesamtlichtmenge - biologisch wirksame Lichtmenge wird durch Tageslicht erreicht
3 Tageslichtquotient 2 - 5 %	2 3 1 3 1 - 3reihige Anordnung je 4 Leuchten - fensternahe Reihe 1fach bestückt - 2. und 3. Reihe 2fach bestückt - manuelle Schaltung nach T_L-Einfall Leuchtmittel werden getrennt voneinander geschaltet (siehe Schaltgruppen) - Schaltgruppe 3 – biologische Wirkung	– 3reihige Anordnung je 4 Leuchten - fensternahe Reihe 1fach bestückt - 2. u. 3. Reihe 2fach bestückt - tageslichtabhängige Steuerung auf 300 lx Gesamtlichtmenge - biologisch wirksame Lichtmenge wird autom. zugesteuert wenn TL einen festgelegten Wert überschreitet
4 Tageslichtquotient 0 - 4 %		- 3reihige Anordnung je 4 Leuchten - 1fache Bestückung - tageslichtabhängige Steuerung auf 300 lx Gesamtlichtmenge - biologisch wirksame Lichtmenge wird autom. zugesteuert wenn TL einen festgelegten Wert überschreitet
5 Tageslichtquotient 0 - 2 %	3 2 3 1 3 1 - 3reihige Anordnung je 5 Leuchten - 2fache Bestückung - manuelle Schaltung nach T_L-Einfall - Leuchtmittel werden getrennt voneinander geschaltet (siehe Schaltgruppen) - Schaltgruppe 3 – biologische Wirkung	- 3reihige Anordnung je 5 Leuchten - 2fache Bestückung - tageslichtabhängige Steuerung auf 300 lx Gesamtlichtmenge - biologisch wirksame Lichtmenge wird autom. zugesteuert wenn TL einen festgelegten Wert überschreitet - Lichtfarbe wird T_L-abhängig gesteuert

Tab. 2: Schule Stübenhofer Weg – Tageslichtkategorien und Kunstlichtbestückungen

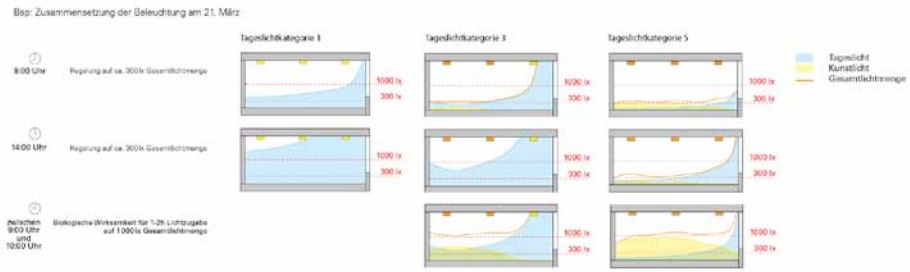


Bild 4: Schule Stübenhofer Weg – Tageslicht und Kunstlichtmengen in den Klassenräumen

Bild 5: Schule Stübenhofer Weg – Klassenraum (Foto: Bernadette Grimmenstein)

Um das Kompensationsprinzip optimal und energiesparend nutzen zu können, empfiehlt sich generell eine tageslichtabhängige Steuerung der Kunstlichtanlage. Diese Steuerung regelt die Beleuchtung in den Klassenräumen automatisch auf eine Beleuchtungsstärke von 300 lx (DIN-Grundschule) je nach Tageslichteintrag. Wenn nun zusätzlich vormittags im Außenraum ein definierter Schwellwert (von 10 000 – 15 000 lx) durch das natürliche Tageslicht überschritten wird, wird das jeweilige Kunstlichtsystem in den Tageslichtkatagorien 2 bis 5 in den Klassenräumen für ein bis zwei Stunden auf das Maximum geregelt, um in Addition mit dem noch in die Klassenräume eindringenden Tageslicht die biologisch wirksame Lichtmenge (von 1000 Lux) in zu erreichen.

In verschiedenen Studien über Tageslicht in Schulen wurde bereits erwiesen, dass das Lernverhalten, die Aufmerksamkeit, der Gemütszustand, die Gesundheit und das Verhalten der Schüler durch ausreichend Tageslicht positiv beeinflusst werden. Die positive Wirkung des Lichts soll mit diesem Beleuchtungsprinzip und beiden Programmen auch auf die vom Tageslicht benachteiligten Räume ausgeweitet werden, um jedem Schüler ähnliche Lichtbedingungen und eine maximal mögliche Lichtqualität für seine freie Entfaltung anzubieten. Gleichzeitig bleiben die Investitionskosten so gering wie möglich.

3 Flughafen Hamburg

Bauherr : *Flughafen Hamburg*
Architekt: *Luethje Soetbeer Architekten*
Leistungsumfang: *Tageslichtplanung*

Damit sich Nutzer in Innenräumen wohlfühlen, müssen diese aber nicht nur ausreichend hell sein, sondern sind auch vor zu viel Sonneneinstrahlung durch geeignete Maßnahmen zu schützen. Ansonsten drohen sowohl eine Überhitzung der Räume als auch die Blendung der Nutzer. Der Wunsch nach einem (sonnen-) „geschützten" Innenraum steht also in der Regel nicht im Widerspruch zu einer guten Tageslichtversorgung. Bei direktem Sonnenlicht gibt es eine eindeutige Lichtrichtung, vor der man den Nutzer gezielt schützen kann. Aus dem Thema „Sonnenschutz" wird dann ein Thema der Steuerung und des „intelligenten Umgangs" mit den Rahmenbedingungen.

Dies sei anhand eines weiteren Beispiels kurz erläutert. Bei dem Bauvorhaben „Flughafen Hamburg" war das Ziel, alle ständigen Arbeitsplätze vor direkter Besonnung zu schützen. Zu diesem Zweck und um das gut tagesbelichtete Terminal in seiner preisgekrönten Erscheinung zu belassen, wurde in die vorhandenen Oberlichter eine bewegliche Sonnenschutzanlage in Form von Rollos mit Glasfasergewebe integriert. Die einzelnen Elemente sind in Gruppen steuerbar und werden von einer zentralen Steuereinheit geregelt.
Im Rahmen der Planungsphase wertete man für jeden der 35 Arbeitsplätze aus, wann und wie lange durch welches Fenster Sonne auf den entsprechenden Platz scheint. Diese Informationen wurden in einer Steuerungsmatrix zusammengeführt, sodass immer nur diejenigen Bausteine der Sonnenschutzanlage aktiviert werden, die tatsächlich in diesem Moment benötigt werden, um den betroffenen Arbeitsplatz vor direkter Sonneneinstrahlung zu schützen.
Das Ergebnis ist ein scheinbar 'willkürliches' Verfahren von Blendschutzrollos im Dach des Terminals welches einer genau ausgearbeiteten Choreographie folgt.

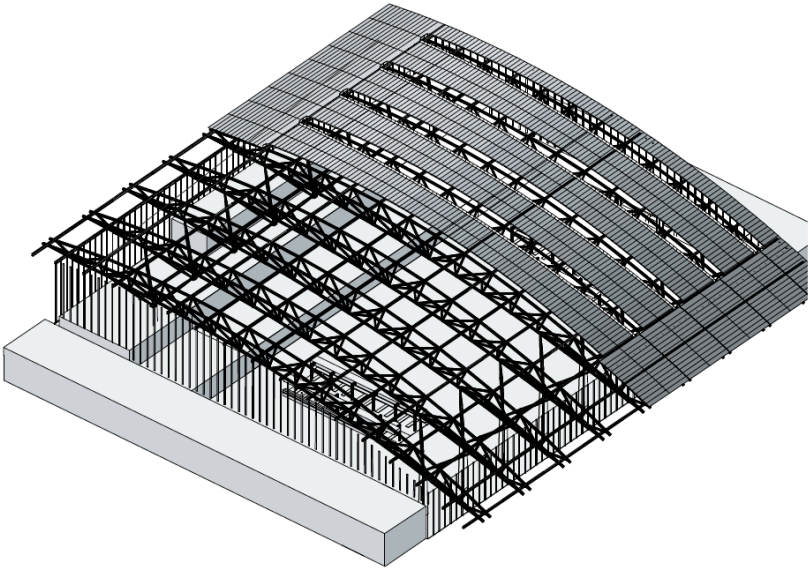


Bild 6: Flughafen Hamburg – Dachstruktur

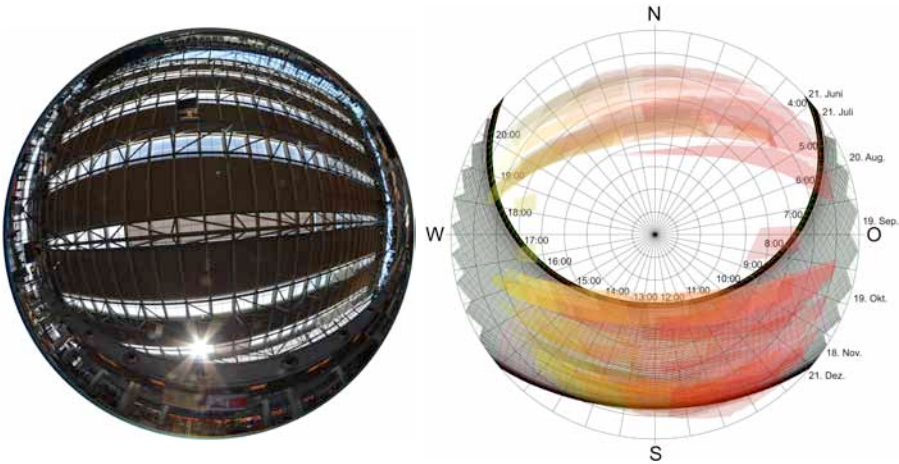


Bild 7 und Bild 8: Schaltgruppen der Oberlichtbänder mit Sonnenschutzanlage

Bild 8: Flughafen Hamburg – Blendschutz am Arbeitsplatz

Wie die Beispiele zeigen, erreicht man mit sorgsamer Tageslichtplanung nicht nur eine energetische und kostenseitige Optimierung. Die hervorragende Lichtqualität der Innenräume trägt zum Wohlbefinden bei und, je nach Gebäudetyp, zu einer gesteigerten Leistungsfähigkeit der Nutzer. In diesem Sinne erweist sich Tageslichtplanung als integraler Bestandteil des architektonischen Entwurfs, auch in ästhetischer Hinsicht.

Licht als sensibles Werkzeug im sakralen Raum

am Beispiel der Pfarrkirche Lingenau, Vorarlberg

DI Gudrun Schach, Zumtobel Licht GmbH, Lichtforum Wien

Vom Kirchentraum zum Kirchenraum

Selten zuvor wurde ein liturgischer Raum in Vorarlberg derart radikal umgebaut. Die 140 Jahre alte neuromanische Kirche war zuletzt in den 60er Jahren des vergangenen Jahrhunderts renoviert und damals viele Bilder von Decken und Wänden entfernt worden. Daher gab es vor der aktuellen Renovierung nicht mehr viele Elemente in der Kirche, die einem großen Umbau denkmalpflegerisch entgegengestanden wären. Somit stand auch einer zeitgemäßen Lichtlösung nichts im Wege.

Architektenwettbewerb

Es wurde 2008 ein Architekten- und Künstlerwettbewerb ausgeschrieben. Gewonnen haben ihn die in Wien tätigen Architekten Anja Fischer und Ernst Beneder. Von ihnen stammt auch die Idee der bemerkenswertesten Neuakzentuierung der Kirche.

Die Architekten sind mittlerweile im „Ländle“ (Vorarlberg) gut bekannt. Über die gesamte Bauzeit bezogen sie Quartier in unmittelbarer Nachbarschaft zur Kirche, hielten engen Kontakt zu den Mitgliedern der Pfarrgemeinde, recherchierten vor Ort lokale Handwerkstraditionen und lebten mit den Menschen, die sich mit der neu gestalteten Kirche identifizieren sollten.

Umgestaltung

Beim Umbau wurde der Chorraum auf einheitliches Niveau zurückgebaut. Es ergaben sich dadurch neue Möglichkeiten mit flexibler Bestuhlung für kleinere Feiern, Versammlungen und Andachten. Eine völlig neue Situation entstand mit der Verschiebung des Altars nach vorne in das Langhaus. Die Gemeinde rückt dadurch bei der liturgischen Feier näher um den Altar. Durch flexible Details ist der Altar richtungsneutral und es kann in jede Himmelsrichtung die Messe gelesen werden.

Neuinterpretation

In der Apsis steht nun ein 280 Jahre alter Olivenbaum. Er schlägt dort Wurzeln und treibt Blätter. In der Topographie der Kirche sind die Schauplätze der wesentlichen Geschehnisse der Evangelien markiert und stellen der mächtigen Halle Orte und ablesbare Spuren am Boden entgegen: die Taufe am Jordan, das sich Zurückziehen in die Wüste, den Weg Jesu durch Jerusalem zum Ölberg und das Grab Jesu.

Das Erzählen von Geschichten

Als liturgische Orte werden sie neu interpretiert: der Kreuzweg als Lichtplastik im Kirchenraum, der Jordan mit Taufbrunnen, der Ölberg mit echtem Olivenbaum.

Material für die Ausstattung ist Naturstein in massiven Quadern.

Der Altar ein zentraler Monolith mit rundum zwölf unterschiedlichen Steinen, den zwölf um den Tisch versammelten Aposteln entsprechend.

Der Ambo in vier Steinarten, die Zahl der Evangelisten.

Der Tabernakel mit Schrein in farbigem Glas und Stein.

Das Taufbecken ist ein Brunnen, Wasser fließt zur Taufe oder zu besonderen Festen und versickert am Fuße des Olivenbaums.

Abb.1: Blick in die Apsis

Lichtlösung

Bei der Planung des richtigen Lichtes war es besonders wichtig für das architektonische bis ins Detail gestaltete Konzept den reduziert gestalteten Raum mit den passenden Leuchten auszustatten. Aber nicht nur die Leuchte spielte eine Rolle, der Fokus lag vor allem auf einer dem Raum angemessenen Lichtqualität. Durch Bemusterungen vor Ort wurde die richtige Leuchtmittelwahl getroffen. Eine Halogenbestückung für die Indirektbeleuchtung des Kirchenschiffes gewährleistet die gewünschte Brillanz des Lichtes und beim Dimmen stellt sich die gewünschte Farbveränderung ins Rötliche ein. Die Direktkomponente wurde mit LED Spots mit warmweißer Lichtfarbe ausgestattet. So wurde eine bestmögliche Leuchtmittelwahl getroffen um den Spagat zwischen energieeffizienter und anwenderfreundlicher Lösung bei gleichzeitiger Erhaltung der Lichtqualität zu realisieren.

Nachhaltige Zufriedenheit

Eine Einheit von Licht und Architektur zu schaffen war das Ziel der Architekten. Trotz einer radikalen Neustrukturierung des Kircheninnenraumes ist die Bevölkerung stolz auf ihre „neue“ Kirche und das ist einem sensiblen Umgang mit dem spezifischen Ort, dem Licht und der zeitgemäßen Architektur durch Anja Fischer und Ernst Beneder zu verdanken. Es ist nicht selbstverständlich, dass im Bregenzer Wald Architektur aus Wien derart angenommen wird.

Über die Blendungsbewertung von reflektiertem Sonnenlicht bei Solaranlagen

Christoph Schierz, TU Ilmenau, FG Lichttechnik, PF 100565, 98684 Ilmenau

1 Problemstellung

Im Zuge der Bestrebungen nach CO_2-Reduktion in der Atmosphäre und für einen Ausstieg aus der Kernkraft werden verstärkt Solaranlagen gebaut. Freiflächensolaranlagen überdecken ganze Mulden und Hügelzüge in der Landschaft und umfassen zum Teil mehrere Hektaren. Dachanlagen sind kleiner, dafür aber nicht immer im Sinne optimaler Lichtabsorption ausgelegt, da sie sich an der Gebäudearchitektur orientieren.

Solche Anlagen sollen zwar Licht absorbieren, ein nicht unerheblicher, mehr oder weniger gerichteter Anteil wird aber in die Umgebung reflektiert. Dadurch kann das Spiegelbild der Sonne in der Nachbarschaft solcher Anlagen zu erheblicher Blendung von Anwohnern und gegebenenfalls auch von Verkehrsteilnehmern führen. Besonders kritisch sind östlich oder westlich zum Beobachtungspunkt gelegene Anlagen. Unproblematisch sind Solarkraftwerke, welche die Strahlung mit Spiegeln auf einen Absorber fokussieren und Photovoltaikanlagen, deren Ausrichtung der Sonne nachgeführt wird. Letztere reflektieren das Licht in Richtung Sonne zurück und können daher nicht zu Blendung in der Umgebung führen.

Zur Bewertung der Blendung durch Photovoltaik-Elemente (im Folgenden „PV-Elemente“ genannt) fehlen bislang einheitliche Bewertungsgrundlagen. In dem Beitrag werden erste Grundlagen für die Bewertung der Blendwirkung von Dach- und Freiflächensolaranlagen bei vorgegebenem Beobachterort dargestellt.

2 Ausgangslage

In Deutschland und der Schweiz bestehen derzeit keine offiziellen oder einheitlichen Immissionsgrenzwerte oder -richtwerte zur Beurteilung von Blendungen durch reflektiertes Sonnenlicht. Großflächige Solarkraftwerke fallen in Deutschland als betriebliche Anlage unter das Bundes-Immissionsschutzgesetz – BimSchG[1]; die von Privaten auf ihren Hausdächern montierten Solaranlagen werden hingegen nach dem Baurecht oder Nachbarrecht beurteilt. Im Gegensatz dazu gilt das Schweizerische Umweltschutzgesetz USG für betriebliche und private Betreiber. Gemäß dem Bayerischen Landesamt für Umwelt LfU kann die Reflexion von Sonnenlicht an Photovoltaikanlagen mit einer erheblichen Belästigung der Nachbarschaft verbunden sein, da die hohe Leuchtdichte der reflektierten Sonne die Grenze der Absolutblendung überschreiten kann. Wird das LfU bei Baubewilligungsverfahren von den Landkreisen hinzugezogen, versucht es im Vorfeld solche erhebliche Belästigungen über die zu erwartenden Blendzeiträume abzuschätzen und rät gegebenenfalls zu Minderungsmaßnahmen. /6/

In Deutschland sind mindestens sechs Urteile bekannt, die reflektiertes Sonnenlicht betreffen und auf deutschem Nachbarrecht basierend gefällt worden sind. Werte zur Intensität liegen in den Urteilstexten nicht vor, ab wann eine Beeinträchtigung als erheblich angesehen wird, stützt sich auf die Zeitdauer pro Tag. Werte über 20 bis 30 Minuten pro Tag werden als erheblich angesehen. Die Zahlen beruhen auf Untersuchungen zur Dauer von störendem periodischem Schattenwurf bei Windkraftanlagen /5/. Angesichts der völlig unterschiedlichen Wirkung, die bei Sonnenlichtreflexionen im Prinzip sogar bis zur Gefährdung des Auges reichen kann, fragt es sich, ob diese Analogie sachgerecht ist und damit sowohl den Erbauern von solchen Anlagen Planungssicherheit, wie auch den Anwohnern einen adäquaten Schutz im Sinne der Immissionsschutzgesetze ermöglichen kann.

[1] Auffassung des Unterausschusses „Recht/RUV“ des LAI Immissionen /6/.

Empirische Untersuchungen zum Ausmaß der erzeugten Blendung sind dem Autor nicht bekannt und stehen noch aus. Eine Arbeit /2/ beschreibt die Möglichkeiten zur Berechnung der Blendungswahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung geometrischer und klimatischer Aspekte wie etwa die Position und Ausrichtung der PV-Elemente, die Topographie oder der örtliche jahreszeitabhängige Bedeckungsgrad. Die Arbeit aus dem Jahr 2009 kommt ebenfalls zum Schluss, dass bislang keine Untersuchungen bekannt sind, welche die eigentliche Blendwirkung zum Beispiel in Form eines Blendungsindexes beschreibt.

In diesem Beitrag wird die Ansicht vertreten, dass die Blendwirkung von Solaranlagen unabhängig vom Bedeckungsgrad des Himmels zu beurteilen ist, da es sich hier um mehr als nur eine Belästigung sondern auch um eine Gefährdung handeln kann, die mit einer „Worst-Case"-Betrachtung zu bewerten ist. Zudem wird der Außenraum von Liegenschaften wie zum Beispiel der Garten oder die Terrasse an sonnigen Tagen besonders stark genutzt, wodurch sich gerade dann ein psychologisches Belästigungsschema entwickeln kann. Wolkenbedeckte Tage ohne Blendung hingegen bleiben von den Betroffenen unbeachtet, da sie sich vermehrt im Gebäudeinneren aufhalten.

Das Vorgehen zur Bewertung der Blendung durch PV-Elemente gliedert sich in diesem Beitrag in folgende zwei Aspekte:

a) Ermittlung von Datum und Uhrzeit möglicher Störungen

b) Kriterien zur Beurteilung der Blendwirkung

3 Ermittlung von Datum und Uhrzeit möglicher Störungen

Prinzipiell kann die Berechnung von Datum und Uhrzeit einer möglichen Störung eines Beobachters durch ein PV-Element mit Hilfe von Simulationssoftware durchgeführt werden. Sie kann aber auch relativ einfach mittels eigenen Berechnungen in zwei Schritten erfolgen: 1. Ermitteln der Himmelskoordinaten, welche der Beobachter im PV-Element als Spiegelbild sehen kann und 2. Ermitteln von Datum und Uhrzeit zu welchen sich die Sonne an diesen Himmelskoordinaten befindet.

3.1 Ermitteln der Himmelskoordinaten

Gegeben sei die Mitte einer PV-Elementfläche mit dem Ortsvektor $\vec{p}$ und ein Beobachter mit dem Ortsvektor $\vec{b}$. Die Ortsvektoren beziehen sich auf ein geografisches Koordinatensystem und haben ihren Ursprung in einem beliebig gewählten Nullpunkt (in Abb. 1 liegt er in der südwestlichen Ecke der Anlage). Im Folgenden wird angenommen, dass die x-Richtung gegen Osten und die y-Richtung gegen Norden verläuft und dass die z-Koordinate die Höhe über Normalnull beschreibt. Zudem seien der Neigungswinkel β (Winkel zwischen der Flächennormalen und der z-Richtung), sowie der Azimutwinkel α (Winkel der Drehung aus der Südausrichtung um die z-Achse im Uhrzeigersinn) des PV-Elements gegeben. Für optimale Energieeffizienz liegt der Neigungswinkel bei PV-Elementen in Deutschland zwischen 25° und 30° und bei Wärmekollektoren zwischen 30° und 45°. Die Elemente sollten mit einem Azimutwinkel von 0° nach Süden ausgerichtet sein, was aber bei Dachanlagen nicht immer erfüllt werden kann.

Gesucht wird die für diese Konstellation kritische Sonnenhöhe γ_S und das kritische Sonnenazimut α_S. Als Zwischenschritt wird erst der Normalenvektor $\vec{n}$ des PV-Elements, sowie der Richtungsvektor $\vec{r}$ vom Beobachter zum PV-Element bestimmt:

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} -\sin\beta \cdot \sin\alpha \\ -\sin\beta \cdot \cos\alpha \\ \cos\beta \end{pmatrix} \quad (1)$$

und $$\vec{r} = \vec{p} - \vec{b} \tag{2}$$

Danach wird ein Richtungsvektor $\vec{d}$ ermittelt, der parallel zu $\vec{n}$ senkrecht auf der Ebene des PV-Elements (= erweiterte Fläche des PV-Elements) steht und auf den Beobachter zeigt:

$$\vec{d} = -(\vec{n} \cdot \vec{r}) \cdot \vec{n} \tag{3}$$

Der vorzeichenbehaftete Abstand des Beobachters von der Ebene des PV-Elements beträgt dann:

$$d = \vec{n} \cdot \vec{d} \tag{4}$$

Ist $d < 0$, sieht der Beobachter die Rückseite des PV-Elements und eine Spiegelung ist nicht möglich. Ein an der PV-Ebene gespiegelter virtueller Beobachter „schaut" durch das PV-Element hindurch zur gesuchten Himmelsposition. Das heißt, dass der Richtungsvektor $\vec{r}'$ vom PV-Element zu den gesuchten Himmelskoordinaten gleich dem an der PV-Ebene gespiegelten Richtungsvektor $\vec{r}$ ist:

$$\vec{r}' = \vec{r} + 2 \cdot \vec{d} \tag{5}$$

Für die winkelabhängige Beschreibung des PV-Reflexionsgrads könnte es nützlich sein, den Ein- bzw. Ausfallswinkel χ zu kennen. Er lässt sich wie folgt ermitteln (mit $r = |\vec{r}|$):

$$\chi = \arccos \frac{-\vec{n} \cdot \vec{r}}{r} \tag{6}$$

Die gesuchten Himmelskoordinaten Sonnenhöhe γ_S und α_S ergeben sich mit:

$$\gamma_S = \Delta\gamma_S + \arcsin \frac{r'_z}{r'} \tag{7}$$

und $$\alpha_S = \Delta\alpha_S - \arctan \frac{-r'_x}{r'_y} \tag{8}$$

Bei Gleichung (8) ist auf das Vorzeichen zu achten; in MS-Excel wird dazu am einfachsten die folgende Funktion verwendet: $\alpha_S = \Delta\alpha_S - ARCTAN2(-r'_y; r'_x)$. Die Winkelkorrekturen $\Delta\gamma_S$ und $\Delta\alpha_S$ betragen für den Sonnenmittelpunkt 0°, für andere Bereiche der Sonne bis zum Sonnenrand liegen sie im Intervall ±0,26°.

Für die Bewertung der Störung eines Beobachters ist auch der wahrgenommene Abstand des spiegelnden PV-Elements zur Sonne ein wesentlicher Aspekt. Je näher sich dieses zur Sonne befindet, desto geringer wird die Störwirkung sein, da in Richtung Sonne ohnehin nicht geblickt wird. Der wahrgenommene Abstand wird mit dem Winkel κ zwischen den Richtungsvektoren $\vec{r}$ und $\vec{r}'$ beschrieben:

$$\kappa = \arccos \frac{\vec{r} \cdot \vec{r}'}{r \cdot r'} \tag{9}$$

3.2 Ermitteln von Datum und Uhrzeit

Den Berechnungen von Datum und Uhrzeit kann für beliebige geographische Lagen die Norm DIN 5034-2 zu Grunde gelegt werden /3/. Allerdings stellt sich dort die umgekehrte Fragestellung: Gegeben ein Ort mit Uhrzeit und Datum, bei welchen Himmelskoordinaten befindet sich dann die Sonne? Hier soll jedoch bei gegebenem Ort aus den zuvor ermittelten Himmelskoordinaten das Datum und die Uhrzeit der Sonnenposition bestimmt werden. Die in DIN 5034-2 angegebenen Formeln müssen daher umgekehrt werden, was mit Ausnahme derjenigen für die Berechnung der Sonnendeklination δ aus der Tageszahl J' (Gl. 8 der DIN) auch möglich ist. Diese möglichen Umkehrungen werden hier nicht weiter ausgeführt.

Als Alternative zur Berechnung der Tageszahl J aus der Sonnendeklination δ kann eine vereinfachte Formel nach Chang /1/ verwendet werden:

$$J = \frac{365}{360°} \arcsin\left(\frac{\delta}{23{,}44°}\right) - 284 \qquad (10)$$

Der Arkussinus ist in Grad zu berechnen; statt 365 ist in Schaltjahren 366 einzusetzen. Zudem ist zu beachten, dass beim in (8) ermittelten Sonnenazimut anders als in DIN 5034-2 der Wert 0° gegen Süden gerichtet ist.

In Abb. 1 wird ein Beispiel für die Berechnung an 966 PV-Elementen einer geplanten Freiflächensolaranlage mit einem Beobachter gezeigt. Die Berechnungen erfolgten nicht nur für die Mitte des PV-Elements, sondern jeweils auch für alle vier Ecken, deren Positionen natürlich von der Abmessung und dem Neigungs- sowie Azimutwinkel des PV-Elements abhängen. Zudem wurde berücksichtigt, dass nicht nur die Mitte der Sonne, sondern ihre ganze Fläche bis zum Sonnenrand zu Sonnenlichtreflexionen führen kann. Daraus resultieren dann die Abb. 2 dargestellten Zeiten möglicher störender Sonnenreflektionen in Richtung des Beobachters (siehe auch Daten in Tab. 1 für ausgewählte Tage im Jahr).

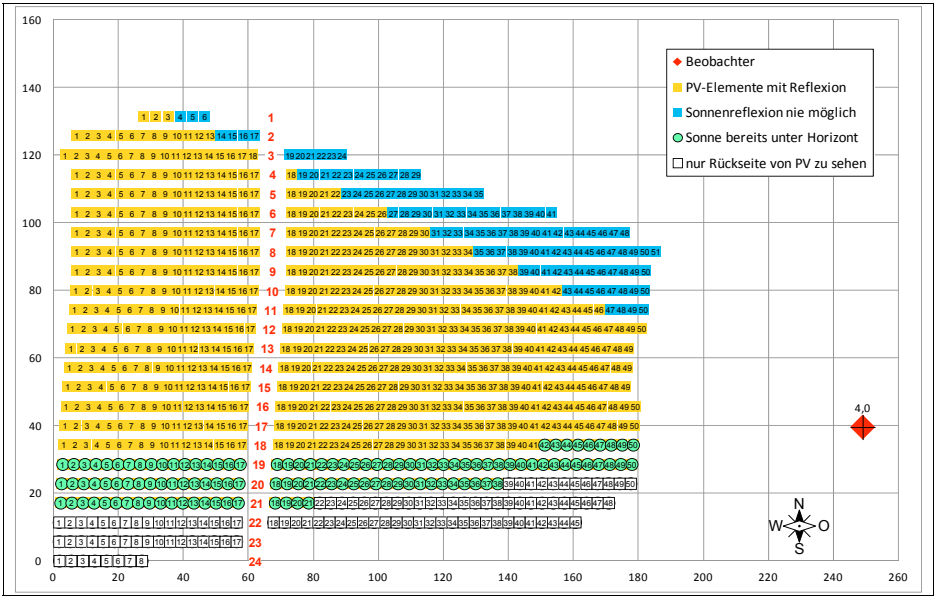


Abb. 1: Beispiel einer geplanten Freiflächensolaranlage in Süddeutschland mit 966 PV-Elementen der Größe 3,4 m x 3,4 m und dem Neigungswinkel 25°, sowie einem Beobachterstandort im Osten, in 4 m Höhe über Grund (1. OG). Einige PV-Elemente im Norden reflektierten nur Himmelsabschnitte, welche die Sonne nie überstreicht. Die südlichsten PV-Elemente werden nur von hinten gesehen und führen daher nicht zu Blendung. Etwas nördlich davon sind PV-Elemente in denen der Beobachter nicht den Himmel, sondern Teile der Landschaft sieht. Sie können vorkommen, wenn sich die PV-Elemente in deutlich tieferer Lage als der Beobachter befinden (z.B. in einer Mulde).

Ausgeschlossen sind störende Reflexionen für PV-Elemente die…

a) …Himmelsabschnitte reflektieren, welche die Sonne nie erreicht ($|\delta| > 23{,}44°$),
b) …reflektieren würden, nachdem die Sonne untergegangen ist ($\gamma_S < 0°$),
c) …vom Beobachter nur von hinten zu sehen sind ($d < 0$).

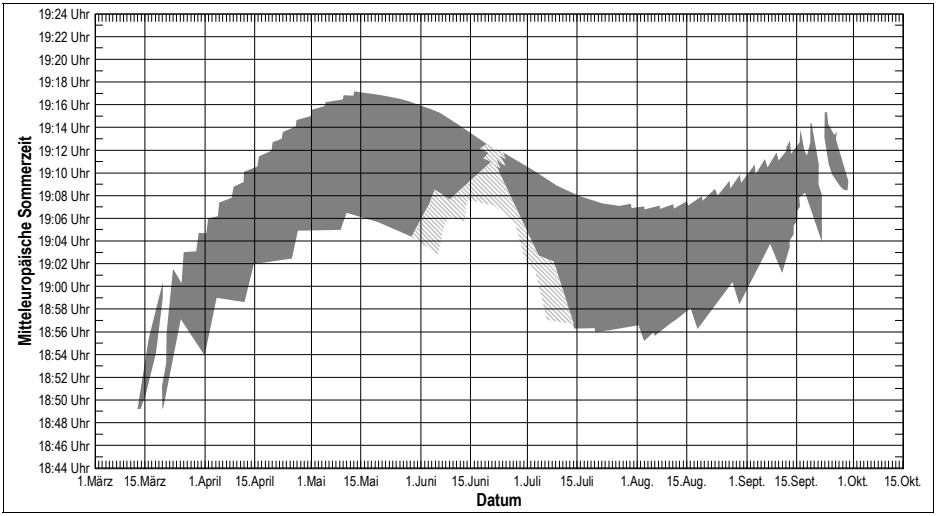


Abb. 2: Uhrzeiten mit Blendung für die Situation von Abb. 1 in Abhängigkeit vom Datum. Im Mai und im Juli/August sind die längsten Spiegelungsdauern von ca. 11 Minuten zu erwarten. Die ersten Spiegelungen treten täglich jeweils bei den östlichen PV-Elementen auf und wandern dann zu den westlichen. Ende März und September ist die Spiegelung nicht durchgehend. Das Spiegelbild der Sonne springt dann von einer der westlich vom Beobachter gelegenen PV-Reihe zur nächsten, mit kurzen Unterbrüchen durch die Zwischenräume. Die schraffierten Bereiche im Juni kennzeichnen die diskontinuierlichen Spiegelungen durch Teilflächen der nördlichsten noch die Sonne reflektierenden PV-Elemente. Das Diagramm ist nur beispielhaft und nicht allgemeingültig. Bereits geringe Änderungen der Ausgangsparameter können es völlig anders aussehen lassen.

Tab. 1: Beginn, Ende und Dauer von Sonnenlichtreflexionen zu ausgewählten Kalenderdaten für das Beispiel von Abb. 1. Zusätzlich wird rechts der Winkel zwischen dem reflektierenden PV-Element und der Sonne angegeben. Zum Vergleich: Der Sonnendurchmesser beträgt 0,52°; zwischen dem Horizont und dem Zenit liegen 90°.

Datum	Beginn (Sommerzeit)	Ende (Sommerzeit)	Dauer (Minuten)	Winkel κ zwischen PV-Element und Sonne	
				von	bis
15. März	18:50	18:53	3	4,0°	4,0°
01. April	18:54	19:05	11	9,7°	7,6°
15. April	19:02	19:11	9	13,0°	11,4°
01. Mai	19:05	19:15	10	17,5°	15,4°
15. Mai	19:06	19:17	11	19,8°	18,2°
01. Juni	19:04	19:16	12	23,1°	20,8°
15. Juni	19:07	19:13	6	ca. 21,8°	ca. 21,8°
01. Juli	19:02	19:11	9	21,7°	21,7°
15. Juli	18:56	19:08	12	22,3°	20,1°
01. Aug.	18:57	19:07	10	19,1°	17,3°
15. Aug.	18:58	19:07	9	15,4°	14,1°
01. Sept.	19:00	19:10	10	15,4°	9,8°
15. Sept.	19:06	19:13	7	6,4°	5,9°

Hügelketten, die den Horizont höher setzen, können grob dadurch berücksichtigt werden, dass der Grenzwinkel für γ_s in b) größer als 0° gewählt wird. In einem weiteren Schritt könnte man gegebenenfalls auch die verdeckende Wirkung von hohen Hecken zwischen Beobachter und den PV-Elementen berücksichtigen (hier nicht weiter ausgeführt).

4 Kriterien zur Beurteilung der Blendwirkung

4.1 Intensität und Größe des Sonnen-Spiegelbildes

Die Leuchtdichte der Sonne ist abhängig von der Sonnenhöhe, für mittlere Sonnenhöhen werden hier 1 Mia cd/m^2 angenommen. Für einen längeren direkten Blick in eine Lichtquelle sind aber nur Leuchtdichten zwischen 4000 cd/m^2 und 10‘000 cd/m^2 gerade noch erträglich. Das heißt, der Reflexionsgrad eines PV-Elements müsste zwischen 0,0004% und 0,001% liegen. Die üblichen Reflexionsgrade für direkte Reflexion liegen aber derzeit zwischen 3% bis 10%, und sie nehmen mit größerem Einfallswinkel zu, ab 60° sogar deutlich /8/,/9/. Entspiegelungsmaßnahmen mögen den Wert auf 1% reduzieren. Es ist also mit Leuchtdichten zwischen 10 Mio cd/m^2 und 100 Mio cd/m^2 zu rechnen, was deutlich über der Grenze zu Absolutblendung von 10‘000 cd/m^2 bis 1,6 Mio cd/m^2 liegt /7/.

In der Lichttechnik ist es üblich, Blendung mit einem Blendungsindex zu beschreiben. Dieser berücksichtigt die Leuchtdichte L_s der Blendquelle, die Umfeldleuchtdichte L_u auf welche das Auge adaptiert ist, die Größe der Blendquelle als Raumwinkel Ω_s und die Position im Gesichtsfeld bezüglich der Blickrichtung mit einem Positionsindex w (siehe Abb. 3 links). Manchmal wird auch das Alter A des Beobachters berücksichtigt:

$$G \approx \mathrm{w}(\theta,A)\cdot\frac{L_s^{n_1}\cdot\Omega_s^{n_2}}{L_u^{n_3}} \tag{11}$$

Die Exponenten n_1, n_2 und n_3 werden je nach Index leicht unterschiedlich festgelegt. Da die PV-Elemente parallel ausgerichtet sind, können sich die Reflexionen zwar gleichzeitig auf mehrere Reihen verteilen, die wahrgenommene Fläche der Spiegelbilder wird aber insgesamt nicht größer als die wahrgenommene Fläche der Sonne selbst. Die Sonne weist einen Durchmesser von 0,52° auf, womit ihr Raumwinkel $\Omega_s = 6{,}4\cdot10^{-5}\,\mathrm{sr}$ beträgt. Mit einer im Freien üblichen Umfeldleuchtdichte L_u von 500 cd/m^2 bis 4000 cd/m^2 und einem Reflexionsgrad des PV-Elements von 5% ergeben sich dann für die ideal reflektierte Sonne z.B. G-Werte nach Hopkinson /4/ von über 100‘000. Das sehen bei direktem Blick praktisch 100% der Bevölkerung als intolerabel an. Damit erscheint eine Bewertung unabhängig von der Intensität, allein auf Grund der Expositionsdauer erst mal berechtigt.

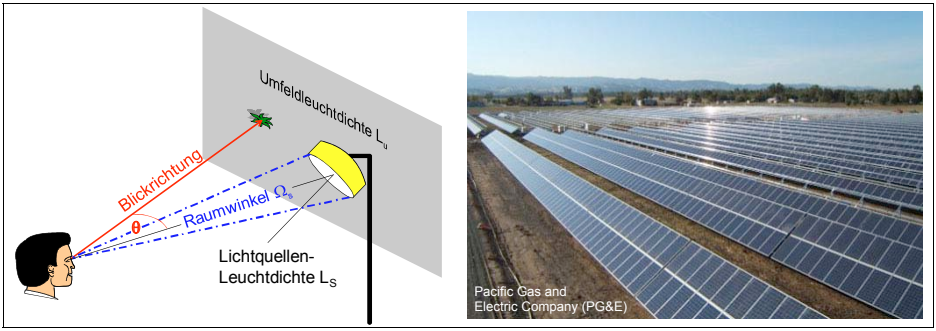


Abb. 3: Links: Parameter zur Berechnung eines Blendungsindexes.
Rechts: Beispiel eines Photovoltaik-Parks mit Sonnenreflexion. Durch Streuung des Lichts an der Oberfläche entsteht anstelle eines Sonnen-Spiegelbilds ein heller Streifen.

Allerdings hat der Mensch bei der Sonne gelernt, durch Blickabwendung mit dieser Situation umzugehen. Für die Bewertung der Störung ist es daher hilfreich zu wissen, wie nahe sich die lichtreflektierenden PV-Elemente zur wahrgenommenen Sonnenposition befinden. Je kleiner der Winkel zwischen PV-Element und Sonne ist, mit desto geringerer Störung

ist zu rechnen. Dieser Winkel κ ist beispielhaft in Tab. 1 den beiden rechten Spalten zu entnehmen. Wie dieser Winkel zu bewerten ist, wurde nicht untersucht – in der Diskussion wird derzeit davon ausgegangen, dass $\kappa \leq 10°$ unbedenklich ist, größere Winkel könnten aber auch tolerabel sein. Ein Positionsindex würde das berücksichtigen, wobei sich dieser nicht auf die Blickrichtung, sondern auf die Richtung der Sonne beziehen müsste.

Ein weiterer Faktor, für den noch Untersuchungsbedarf besteht, ist die durch Unebenheiten, Verschmutzung und Oberflächenrauheit (z.B. durch Entspiegelungsmaßnahmen) hervorgerufene mehr oder weniger starke diffuse Reflexion des Sonnenlichts. Sie äußert sich durch Lichtstreifen, die vom Spiegelbild der Sonne in Richtung des Beobachters verlaufen (Abb. 3 rechts) und es gleicht der Erscheinung von spiegelndem Licht auf einem See bei Sonnenuntergang. Nur befindet sich hier auf Grund der PV-Neigung die Sonne nicht in der Verlängerung des Streifens, sondern nördlicher davon. Der Streifen kann breiter erscheinen als der Sonnendurchmesser.

Für die Bewertung der Blendung bedeutet dies, dass die Leuchtdichte des „Rest-Spiegelbildes“ und des Streifens geringer wird als diejenige eines reinen Spiegelbildes. Hingegen wird gleichzeitig die leuchtende Fläche und damit der Raumwinkel vergrößert. Da der Raumwinkel in die Formeln zum Blendungsindex nur mit halb so großem Exponent eingeht, wie die Leuchtdichte der Blendquelle, würde dies eine Reduktion der Blendwirkung bedeuten. Aber es bleibt fraglich, ob der Blendungsindex bzw. seine Exponenten bei den hohen Leuchtdichten noch gültig sind. Zudem kann sich bei kleinen Anlagen mit der Lichtstreuung die Expositionszeit verlängern. Mit dem derzeitigen Wissensstand kann nur die vereinfachte Situation einer gerichteten Spiegelung ohne diffuse Reflexion betrachtet werden. Um für eine Verminderung des Blendungspotenzials von PV-Elementen einen Anreiz zu geben, wäre es jedoch interessant Korrekturfaktoren für die Lichtstreuung zu berücksichtigen. Wie diese zu ermitteln sind, müssen künftige Untersuchungen zeigen.

4.2 Dauer der Exposition

Welches die zulässige Dauer einer Blendwirkung sein soll, ist eigentlich keine wissenschaftliche Fragestellung, sondern eine der gesellschaftlichen Vereinbarung: Wie viele Prozent stark belästigter Personen in der exponierten Bevölkerung will man zulassen? Die Wissenschaft müsste aber eine Aussage darüber liefern können, welche Expositionsdauer zu welchem Anteil stark Belästigter führt. Wie bereits erwähnt, stehen Untersuchungen dazu noch aus. In der deutschen Rechtsprechung hat sich inzwischen offenbar ein Richtwert von „30 Minuten pro Tag“ als Beurteilungsgrenze für eine erhebliche Belästigung etabliert. Nach Erfahrung des Bayerischen LfU seien keine Beschwerden über eine Blendung zu erwarten, sofern die Kriterien „astronomisch mögliche Blenddauer von 30 Minuten pro Tag“ und „kumuliert höchstens 30 Stunden im Jahr“ eingehalten sind /6/. Diese Aussage ist aber bislang nicht bestätigt worden und stützt sich auf den periodischen Schattenwurf bei Windanlagen /5/. Bislang ist die Akzeptanz für diese Werte bei den Betroffenen offenbar gegeben.

5 Diskussion

Es existieren noch keine rechtlichen oder normativen Methoden zur Bewertung von Lichtimmissionen durch von Solaranlagen gespiegeltes Sonnenlicht. Zusammenfassend sollten folgende offenen Punkte Thema zukünftiger wissenschaftlicher Studien sein:

1. Welchen Zusammenhang gibt es zwischen der Expositionsdauer und dem Anteil stark belästigter Personen? Oder in der Umsetzung: Welcher Anteil stark belästigter Personen wird mit den derzeitigen Beurteilungsgrenzen zugelassen? Ist dieser mit anderen Umweltstörungen vergleichbar (z.B. mit Lärm, oder mit Lichtimmissionen in der Nacht)?

2. Welchen Einfluss hat die Nähe der Spiegelung zur Sonne? Oder in der Umsetzung: Unterhalb welchem Winkelabstand zur Sonne können Sonnen-Spiegelungen von PV-Elementen vernachlässigt werden?
3. Welchen mindernden (oder verstärkenden) Einfluss bezüglich Blendwirkung hat diffuse Reflexion auf der Oberfläche eines PV-Elements? Oder in der Umsetzung: Können lichtstreuende Oberflächen so entwickelt werden, dass gleichzeitig Blendung vermindert und ein hoher Energiewandlungs-Wirkungsgrad ermöglicht wird?

Es gibt noch weitere, sicher nicht abschließende Punkte, die in diesem Beitrag nicht diskutiert wurden:

4. Welche Risikogruppen bezüglich gespiegelten Sonnenlichts gibt es? Wie groß ist das Schädigungspotential für diese Personen. Beispielsweise könnten kleine Kinder länger in das Spiegelbild der Sonne blicken, so dass die Grenzwerte für optische Strahlung überschritten werden. Dazu müsste u.a. auch eine spektrale Analyse des reflektierten Lichts vorgenommen werden.
5. Wie weit können Erkenntnisse über die Blendung durch PV-Elemente auf andere Spiegelungen der Sonne übertragen werden? Es ist zum Beispiel an Glasfassaden oder Gewächshäuser zu denken.
6. Wie weit wird die Blickabwendungsreaktion bei der Sonne durch die zusätzliche „zweite Sonne“ des Spiegelbilds beeinträchtigt?

Ein herzlicher Dank geht an Herrn Dipl. Umwelt-Natw. Alexander Reichenbach vom Schweizerischen Bundesamt für Umwelt BAFU für die Auskünfte bezüglich der rechtlichen Situation in Deutschland und der Schweiz.

6 Literatur

/1/ Chang T.P. (2009): The sun’s apparent position and the optimal tilt angle of a solar collector in the northern hemisphere. Solar Energy V83 P1274-1284.

/2/ Chiabrando R., Fabrizio E., Garnero G. (2009): The territorial and landscape impacts of photovoltaic systems: Definition of impacts and assessment of the glare risk. Renewable & sustainable energy reviews V13 N9 P2441 -2451.

/3/ DIN 5034 Teil 2: Tageslicht in Innenräumen – Grundlagen (1985).

/4/ Hopkinson R.G. (1957): Evaluation of Glare. Illuminating Engineering V52 N6 P305-316.

/5/ LAI (2003): Hinweise zur Ermittlung und Beurteilung der optischen Immissionen von Windenergieanlagen (WEA-Schattenwurf-Hinweise). Länderausschuss für Immissionsschutz, Arbeitskreis Lichtimmissionen.

/6/ Reichenbach A. (2012): persönliche Information.

/7/ Reidenbach H.-D., Dollinger K., Ott G., Janßen M., Borse M. (2008): Blendung durch optische Strahlungsquellen. Bericht der BAUA, Forschung Projekt 2185.

/8/ Sjerps-Koomen E.A., Alsema E.A., Turkenburg W.C. (1996): A simple model for PV module reflection losses under field conditions. Solar Energy V57 N6 P421–32.

/9/ Yamada T., Nakamura H., Sugiura T., Sakuta K., Kurokawa K. (2001): Reflection loss analysis by optical modeling of PV module. Solar Energy Materials and Solar Cells V67 P405–13.

In Situ Bewertung von unterschiedlichen Sonnen- und Blendschutz-Behängen in ihrer realen Einbausituation

Johannes Zauner, M. Sc., Prof. Mathias Wambsganß, Prof. Dr. Franz Feldmeier
Hochschule Rosenheim, Hochschulstraße 1, 83024 Rosenheim

Fassadensysteme sind entscheidend für die ergonomische Qualität der Innenräume und das energetische Verhalten des gesamten Gebäudes. Typischer Weise sind aber nur Daten für einzelne Bestandteile der Fassade bekannt: Das Zusammenspiel von Gläsern und Sonnen- und Blendschutz-Systemen mit der gesamten Fassadenkonstruktion wird nur für ausgewählte Situationen rechnerisch untersucht. Insbesondere die visuell/ergonomische Bewertung tageslichtversorgter Räumlichkeiten lässt sich im Vorfeld nur schwer abschätzen. Das tatsächliche Verhalten zeigt sich erst am ausgeführten Projekt – eine Optimierung kann dann in der Regel nur noch mit entsprechend großem Aufwand oder an diesem Objekt gar nicht mehr stattfinden.

Der Lösung dieser Problemstellung widmet sich eine vor kurzem an der Hochschule Rosenheim zusammen mit Fa. Gartner erstellte und in Betrieb genommene Versuchsanlage. Drei Messräume mit unterschiedlich bestückbaren Fassadenelementen erlauben „in-situ“ Messungen mit natürlicher Sonne und somit reale Vergleiche bei identischen Randbedingungen. Im Verlauf von mehreren Messkampagnen wurden vergleichende hygrothermische und lichttechnische Untersuchungen in Räumen mit verschiedene Sonnen- und Blendschutz-Behänge durchgeführt. Dabei wurden unter anderem Blendungsanalysen erstellt, die Tageslichtversorgung der Räume analysiert und das Einsparpotential unterschiedlicher Kunstlicht-Regelungen ermittelt.

Abb. 1: Versuchsanlage an der Hochschule Rosenheim bei der Inbetriebnahme im Mai 2011

Dieser Beitrag beschreibt den Aufbau und die Funktion der Versuchsanlage und zeigt Auszüge aus bereits abgeschlossenen Untersuchungen. Im Anschluss dessen wird eine Methodik zur weiterführenden Nutzung von Messdaten (oder auch Simulationsdaten) vorgestellt, um im Verbund mit Standortdaten eine einfache Bewertung der ergonomischen Gebrauchstauglichkeit von Sonnen- und Blendschutz-Maßnahmen zu erhalten.

1. Fassaden-Versuchsanlage an der Hochschule Rosenheim

Abbildung 1 zeigt die Versuchsanlage mit weitgehend unverbautem Horizont am Südrand des Campus-Geländes der Hochschule Rosenheim. Mit den Abmessungen von ca. 13 m, 5,5 m und 6 m (B/T/H) schwebt ein 40-Tonnen-Quader (max. 60t incl. Verkehrs- und Schneelasten) mit drei Messräumen 2 m über der Freifläche. Vertikale und horizontale Achsen erlauben es, unterschiedliche Ausrichtungen und beliebige Sonnenwinkel auf die Fassade einzustellen und durch eine heliostatische Nachführung auch über längere Zeit zu halten (Anmerkung: max. Auslenkung horizontal ±120°, vertikal +60°/-30°).

An der Breitseite des Quaders sind drei Varianten von CCF-Elementen (Closed-Cavity-Facade) jeweils vor den Messräumen installiert. Die Bestückung der Elemente mit unterschiedlichen Sonnen- und Blendschutz-Behängen wird auf der folgenden Seite beschrieben. Bei der Fassadentechnologie handelt es sich um eine Entwicklung von Fa. Gartner bei der ein geschlossener Fassaden-Zwischenraum mit trockener, staubfreier Luft gespült und so Kondensationsfeuchte und Verschmutzung verhindert wird. Abbildung 2 zeigt Grundriss und Schnitt der Versuchsanlage. Die Messräume werden auf fünf Seiten von einem klimatisierten Serviceraum umgeben. Energieverluste oder Gewinne der Messräume sind so eindeutig der Fassadenfläche zuzuordnen.

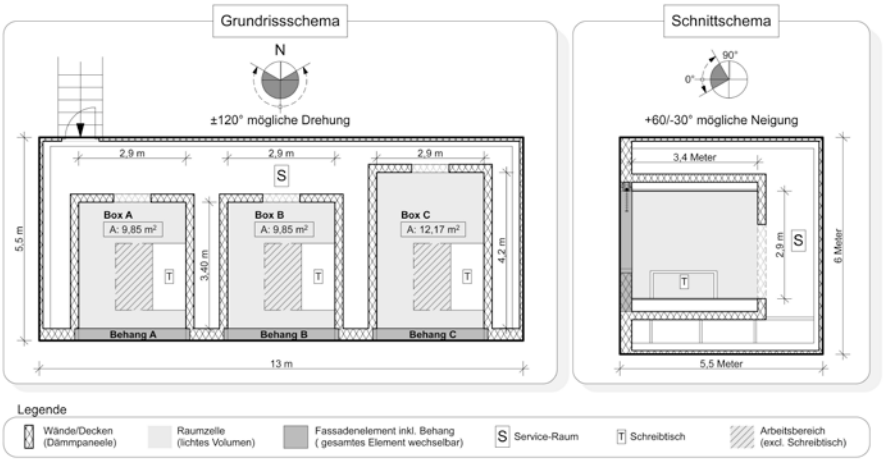


Abb. 2: Schema der Versuchsanlage in Grundriss und Schnitt

Die installierten Wärme-, Feuchte- und Lichtsensoren in der Fassade, den Messräumen, dem Serviceraum wie auch im Außenbereich ermöglichen eine umfassende Bearbeitung unterschiedlicher Fragestellungen. Die Ausstattung der Messräume wie auch der Fassadenelemente selbst ist variabel und kann je nach Anforderung eines Auftraggebers angepasst werden. Drei parallele Messräume bzw. Fassaden bieten den besonderen Vorteil, Messungen bei identischen Randbedingungen durchzuführen und somit vergleichbare Ergebnisse in kurzer Zeit zu erhalten.

Motiviert wurde die Versuchsanlage durch den Wunsch des Bauherrn eines Verwaltungsgebäudes, die Qualität eines Konzeptes hinsichtlich Komfort, Energieverbrauch und Funktionalität vor dem eigentlichen Baubeginn ganzheitlich zu untersuchen und zu bewerten.

Gegenüber der Simulation von Teilaspekten bietet die Versuchsanlage den Vorteil, die geplanten Komponenten im realen Einsatz zu bewerten. Stärken und Schwächen sowie das Zusammenspiel mit der Gebäudeautomation treten deutlich hervor. Diese Erkenntnisse werden in der Regel erst am Ende eines Bauprozesses während der Inbetriebnahme oder sogar schon nach dem Einzug der Mieter gewonnen und können dann – wenn überhaupt – nur noch mit hohem Zeit- und Kostenaufwand optimiert werden.

Abbildung 3 zeigt die Behänge im Scheibenzwischenraum. Gleiche Randbedingungen bei den parallelen durchgeführten Messungen ermöglichten damit den Vergleich der unterschiedlichen Sonnen- und Blendschutz-Behänge. Die Behänge wurden einer Cut-Off Strategie programmiert.

Abb. 3: Raum **A:** reflektierende, strukturierte Aluminiumprofil-Lamelle; Raum **B:** perforierte, weiße Lamelle; Raum **C:** gekantete, weiße Lamelle

2. Auszüge aus den Messungen in der Versuchsanlage

2.1. Tageslichtversorgung

Mithilfe von neun Beleuchtungsstärkesensoren (Fa. Ahlborn, Typ FL A623 VL) jm Raum, wurde die Tageslichtsituation erfasst und an diffusen Tagen anhand des Tageslichtquotienten bewertet. Von einer Vergleichsmessung mit offenen Behängen abgesehen, waren die Behänge dazu vollständig heruntergefahren und wurden jeweils einmal maximal geöffnet, unter 45° Lamellenneigung und maximal geschlossen bewertet. Die Messungen wurden an einem möglichst bedecktem Tag durchgeführt (ein idealer „CIE overcast sky“ lag jedoch nicht vor: bedeckter Himmel mit einer Helligkeitsverteilung von 1:3 von Horizont zu Zenit). In Abweichung zu /1/ wurden die Beleuchtungsstärken horizontal auf Höhe der Arbeitsfläche an vier Punkten von der Fassade bis an die Rückwand gleichmäßig verteilt gemessen, da insbesondere bei lichtlenkenden Behängen eine höhere Aussagekraft der Ergebnisse zu erwarten ist.

Der Vergleich der Behänge zeigt in Abbildung 4, dass diese den Lichteintritt unterschiedlich stark beeinflussen – quantitativ und qualitativ. Während der Raum mit Behang B in Relation sehr hohe Tageslichtquotienten auch bei geschlossenen Lamellen aufweist, ist der relative Abfall in die Raumtiefe sehr stark. Dem gegenüber steht Behang C, der zwar weit weniger Tageslicht in den Raum lässt, dieses aber im Verhältnis besser in die Raumtiefe transportieren kann und ein ausgeglicheneres Helligkeitsniveau erzeugt. Die lichtlenkenden Eigenschaften von Behang A sind bei 45° oder maximal geöffneten Lamellen gut nachvollziehbar. Entgegen dem normalen Helligkeitsabfall in der Raumtiefe verbessert dies die gleichmäßige Ausleuchtung eines fassadennahen Arbeitsplatzes deutlich.

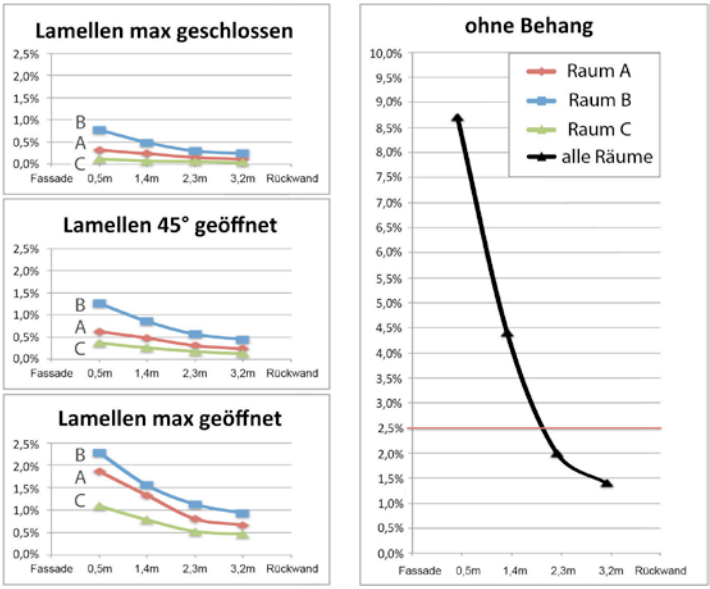
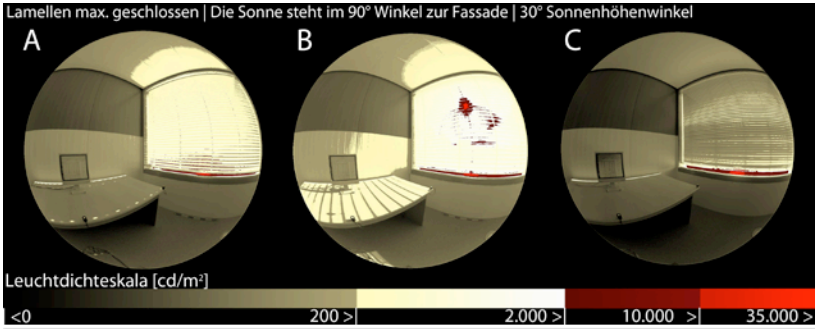


Abb. 4: Tageslichtquotienten, horizontal auf der Höhe der Arbeitsfläche

2.2. Blendungsanalyse

Die zur Beurteilung der Blendung notwendigen Leuchtdichten wurden mit Leuchtdichtekameras durchgeführt (Canon EOS450D, Fa. Techno-Team), die durch Ihre Positionierung die Leuchtdichteverteilung am Nutzeraugpunkt bildgebend erfassen. Für die Messungen wurden an klaren, strahlungsreichen Tagen Sonnenstände auf die Fassade in einem Winkeldelta von jeweils 20° Azimut und Elevation erfasst. Hierbei war die variable Ausrichtung der Versuchsanlage unerlässlich, die es ermöglichte, alle notwendigen Variationen innerhalb weniger Tage anstatt von Wochen oder Monaten zu erfassen. Durch einen entsprechenden Versuchsplan wurde die Neigbarkeit der Anlage so wenig wie möglich genutzt (< ± 15°), um einen Messfehler durch den in seiner Lage veränderten Horizonts möglichst gering zu halten. Die erfassten Leuchtdichtebilder konnten sowohl in einer Einzelauswertung, als auch in weiterführenden Berechnungsverfahren die Blendsituation hinter den Behängen umfassend darstellen.

In der Beispielgrafik in Abbildung 5 sind die Lamellen maximal geschlossen, während die Sonne bei 30° Elevationswinkel rechtwinklig zur Fassade steht. Die lichtlenkenden Eigenschaften der Lamellen bei Behang A werden zweifach sichtbar. Das einfallende Sonnenlicht reflektiert an dem gezackten Aluminiumprofil nach oben und erhellt sowohl die Unterseite der nächsten Lamelle als auch die Decke in Fassadennähe. In Raum B zeigt sich deutlich die Sonne durch die perforierten Lamellen. Die auftretenden Leuchtdichten liegen in diesem Beispiel über 30.000 cd/m2. Auf der Arbeitsfläche führt die Überlappung der Lamellen zu einem kontrastreichen Streifenmuster, welches Störungen bei üblichen Bürotätigkeiten verursachen kann. In Raum C dringt aufgrund des engeren Abstandes der Lamellen deutlich weniger Tageslicht in den Raum. Dies führt zu einem geringeren Helligkeitsniveau aber mit ausgeglichener Verteilung. Zudem schafft es Behang C, relativ viel Licht in die Raumtiefe umzulenken (siehe Beleuchtungsstärke-Messungen in Abb. 5).



Ø Beleuchtungsstärke horizontal Arbeitsfläche		
372 Lux	2053 Lux	155 Lux
Beleuchtungsstärke vertikal Rückwand		
527 Lux	730 Lux	294 Lux
Relation der Helligkeit Rückwand / ø Arbeitfläche		
1,42	0,36	1,90

Abb. 5: (oben)Falschfarbenbilder der Leuchtdichte für alle Räume/Behänge in einer beispielhaften Situation; (unten) parallele Beleuchtungsstärkemessungen

Außerdem wurde eine hohe und teilweise gerichtete Reflektion an den Flanken des Fassadenzwischenraumes als bedeutende Blendquelle ausgemacht - speziell an der Unterkante des Behangs). Das Wissen um den Einfluss solcher baulichen Gegebenheiten ermöglichte eine einfache Detailänderung in der Planungsphase, während nach der Ausführung der Fassade lediglich eine kostenintensive Schadensbegrenzung bleibt.

Für die Bewertung aller in einer Messzelle aufgenommenen Situationen wurde der DGP-Index (Daylight Glare Probability, /2/) als Stand der Technik verwendet. Kontrastverhältnisse, Leuchtdichten, die Größe und Positionierung von potentiellen Blendquellen im Gesichtsfeld sowie die Adaptionshelligkeit des Auges fließen in die Bewertung mit ein. Das Ergebnis beschreibt den prozentualen Anteil der Mitarbeiter, die in der aufgenommenen Szene voraussichtlich durch Blendung bei der Arbeit gestört werden.

In Abbildung 6 werden die Blendungswahrscheinlichkeiten als „Gebirge“ aufbereitet. Es zeichnet sich deutlich ab, dass der perforierte Behang in Raum B bei Sonnenhöhenwinkeln von 30° und einem horizontalen Sonnenwinkel im Bereich von 50° bis 130° auf die Fassade die mit Abstand größten Blendungswahrscheinlichkeiten verursacht. Während alle drei Behänge in diesem Winkelbereich die größten Werte aufweisen, sind diese besonders bei Behang C deutlich geringer.

Insgesamt zeigt sich folgendes Bild: Während hohe Tageslichtquotienten im Sinne der Tageslichtversorgung von Vorteil sind, verkehrt sich der große Lichteintrag bei der Blendungsanalyse ins Gegenteil. Dabei schafft es Behang A am ehesten, ein Gleichgewicht der Kriterien herzustellen. Behang B versorgt den Raum am besten mit Tageslicht, führt jedoch auch zu den größten Blendungsrisiken und kann zudem auch bei maximalem Lamellenschluss keinen Blendschutz gewährleisten. Behang C vermindert den Tageslichteintrag am stärksten, erweist sich aber in der Leuchtdichtereduktion am erfolgreichsten.

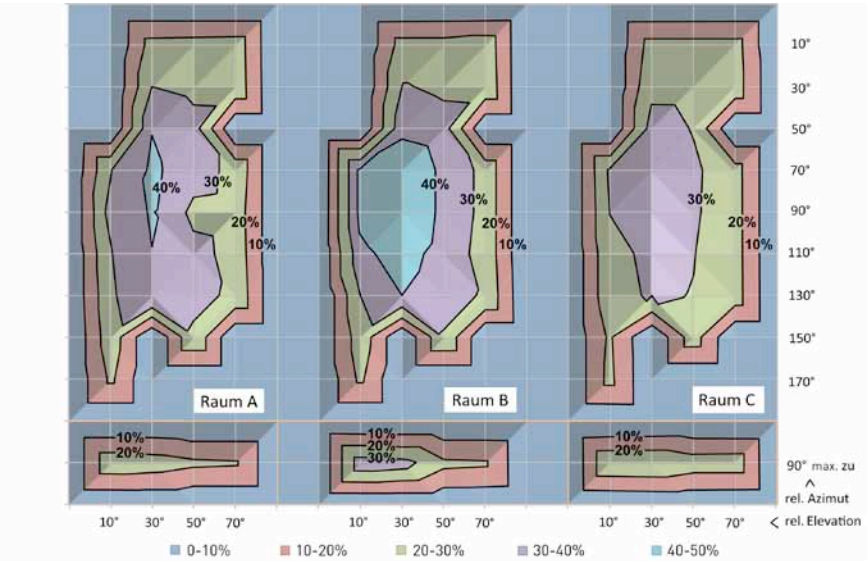


Abb. 6: Carpetplot der Blendungswahrscheinlichkeiten (DGP) in Abhängigkeit des relativen Sonnenwinkels auf die Fassade; *Anmerkungen:* Sonnenschutzlamellen jeweils im Cut-Off Winkel (außer 90° max. zu); 0-10%: diese Situationen wurden messtechnisch nicht erfasst

3. Bewertung der ergonomischen Gebrauchstauglichkeit einer Sonnen- und Blendschutz-Maßnahme

Für die ergonomische Qualität eines Raumes ist die Stärkung des circadianen Rhythmus durch hohe Tageslichteinträge ebenso bedeutsam wie der wirksame Schutz vor Blendung. In Abschnitt zwei wurden Untersuchungsergebnisse für beide Kriterien dargestellt: der Tageslichtquotient, der einen Verhältniswert zur Außenbeleuchtungsstärke bei ideal diffusem Himmel beschreibt; und die Blendungswahrscheinlichkeit (DGP), mit der konkrete Situationen auf der Basis von Leuchtdichtebildern bewertet werden. Beide Kriterien können nur getrennt voneinander untersucht werden. Die Entscheidung für einen Sonnen- und Blendschutz erfordert jedoch die gleichzeitige Bewertung der Tageslichtversorgung und des Blendschutzes. Ansonsten ist nicht bestimmbar, wie viel „besser“ oder „schlechter“ eine Maßnahme im späteren Bürobetrieb sein wird. In einer weiterführenden Arbeit des Verfassers wurde daher eine Methodik entwickelt um diese Einflüsse zu gewichten und gemeinsam darzustellen – als jährliche Tageslichtwertung *yD* (yearly Daylightrating).

Werden Blendschutz und Tageslichtversorgung als menschliche Bedürfnisse verstanden, besitzen beide über Dauer und Häufigkeit in der sie erfüllt bzw. nicht erfüllt werden einen gemeinsamen „Nenner“. Auf dieser Basis kann das Verhalten eines Behanges für alle Zeiträume mit Sonnenschein über die Dauer eines Arbeitsjahres aus ergonomischer Sicht abgebildet werden. Die Einschränkung auf Zeiträume mit Sonnenschein basiert darauf, dass Blendschutz-Maßnahmen vor allem in diesen Zeitspannen notwendig sind. Bewertet wird dabei die automatisierte Behangsteuerung. Individuelle Nutzereingriffe – auch wenn diese in der Praxis möglich sind – können nicht berücksichtigt werden.

Methodik:
Das Arbeitsjahr mit Sonnenschein wird in Halbstundenschritten untersucht und die Ergebnisse prozentual aufgeteilt – wie diese Aufteilung zustande kommen wird auf der folgenden Seite kurz erläutert. Ein positiver yD Wert sind die Zeiten, in denen sowohl die Anforderung an den Blendschutz als auch eine ausreichende Tageslichtversorgung gegeben sind. Des Weiteren werden die folgenden Zeiten erfasst:

- der Blendschutz ist nicht ausreichend,
- die Tageslichtversorgung ist ungenügend,
- beide Kriterien sind nicht erfüllt.

Ein letzter Anteil stellt die Eigenverschattung des Gebäudes dar – also Zeiten zu denen die Sonne gar nicht auf die betreffende Büroraum-Fassade scheint. In diesem Zeitanteil ist ein Blendschutz in der Regel nicht notwendig.

Abbildung 7 zeigt die yD-Bewertung der drei Behänge[1] für ein Büro am Standort Rosenheim mit Südausrichtung und Präsenzzeit von 7-19 Uhr. Das Best-Case Diagramm berücksichtigt, dass der DGP an sich nur in einem Bereich zwischen 20% und 80% definiert ist. Ein Blendschutz kann demnach nicht 100% erreichen. Im Vergleich der nachfolgenden Abbildung mit den Abbildungen 4 und 6 wird deutlich, dass die grundsätzlichen Aussagen über die Behänge auch in dieser kompensierten Form erhalten bleiben, jedoch besser zu kommunizieren und leichter zu vergleichen sind.

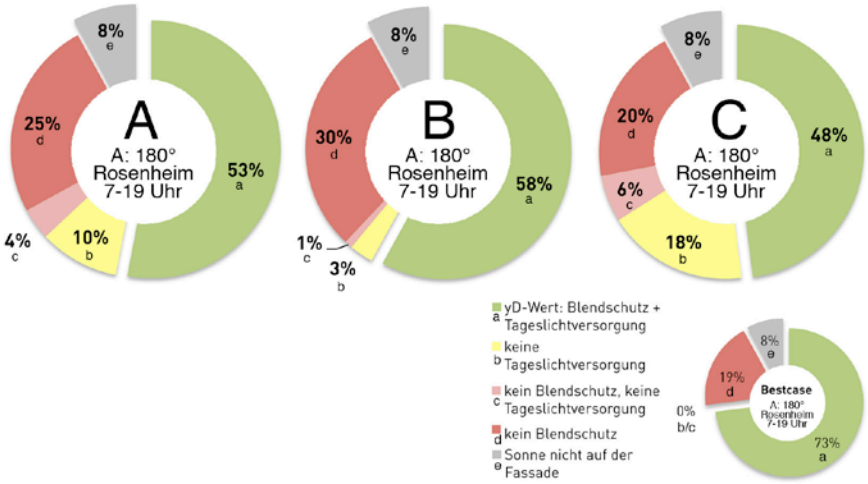


Abb. 7: Anteile an der Jahresarbeitszeit mit Sonnenschein: yD-Bewertung der untersuchten Behänge; Randbedingungen: Süd-Büro, Rosenheim, Präsenzzeit 7-19 Uhr; 100% in obigen Diagrammen entsprechen 36% der jährlichen Gesamtarbeitszeit (jGAZ)

Wie kommt diese Bewertung zustande? Die ermittelten DGP-Daten, die sich dezidierten Sonneneinfallswinkeln zuordnen lassen, dienen der Bewertung des Blendschutzes. Die parallel zu den Leuchtdichteaufnahmen aufgezeichneten horizontalen Beleuchtungsstärken auf der Arbeitsfläche werden für die Bestimmung der Tageslichtversorgung herangezogen. Für letztere wurde als Bewertungskriterium die Tageslichtautonomie gewählt.

[1] Messtechnisch nicht erfasste Sonnenwinkel (s. Abb. 6) wurden zum Zweck der Darstellung der Methodik extrapoliert.

Zur Gewichtung der Sonneneinfallswinkel werden Standortdaten verwendet: Koordinaten, Fassadenausrichtung (Azimut) und Arbeitszeiten. Anhand dieser kann die Häufigkeit jedes Sonneneinfallswinkels bestimmt werden. Über die Aufzeichnung langjähriger meteorologischer Daten wird die Sonnenscheinwahrscheinlichkeiten einbezogen /3/. Über ein Excel-Tool wurde der Prozess automatisiert, so dass Fassadenausrichtung und Arbeitszeiten dynamisch angepasst werden können (vergleiche Abbildung 8). Detaillierte Informationen zur Wertebildung können an der Hochschule Rosenheim erfragt werden.

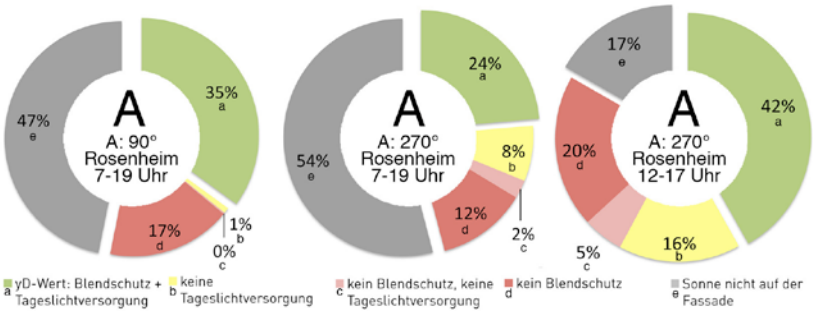


Abb. 8: Anteile an der Jahresarbeitszeit mit Sonnenschein: yD-Bewertung des Behangs A mit unterschiedlichen Randbedingungen. Auf die Darstellung der zugehörigen „Bestcase"-Diagramme wurde zu Gunsten der Übersichtlichkeit verzichtet. Für alle gilt: Standort Rosenheim. (Links) Ost-Büro, Präsenzzeit 7-19 Uhr; (Mitte) West-Büro, Präsenzzeit 7-19 Uhr; (Rechts) West-Büro, Präsenzzeit 12-17 Uhr

Die bisher berücksichtigten Parameter sowie die Darstellung des hier vorgestellten Ansatzes erheben nicht den Anspruch schon eine anwendungsreife Methode zu sein. So bietet die Tageslichtautonomie als Mittel der Bewertung der Tageslichtversorgung oder der Einfluss der atmosphärischen Trübung über das Jahr auf die Blendungswahrscheinlichkeit direkte Ansatzpunkte für eine kritische Betrachtung und bieten Raum für Diskussionen zur Verbesserung des Werkzeugs. Es sind auch andere Quelldaten, etwa aus jährlichen Simulationsläufen vorstellbar, die zum einen über das yD Diagramm adäquat dargestellt werden oder aber genutzt werden um das Werkzeug zu testen und weiterzuentwickeln.

Die aus der Fassadenversuchsanlage in Rosenheim gewonnenen Erkenntnisse zeigen was erreicht werden kann, wenn Bauherren, Planer Industriepartner und Wissenschaftler sich gemeinsam dieser komplexen Fragestellungen der ergonomischen Qualität der Innenräume und dem energetischen Verhalten des gesamten Gebäudes annehmen. Das dabei entwickelte yD Diagramm trägt dem Wunsch nach einer Schnittstelle für Planer und Bauherren Rechnung, denen für ergonomische Planungsfragen häufig die notwendigen und nachvollziehbaren Entscheidungsgrundlagen fehlen.

Literaturhinweise:
/1/ DIN 5034-5:2010
/2/ Wienold, Jan; Daylight Glare in Offices; Fraunhofer Verlag 2009
/3/ DIN 4710:2003

Mikrostrukturiertes Tageslichtlenksystem mit hoher Effizienz

Stephan Klammt [1], Helmut F.O. Müller [2], Andreas Neyer [1]
1: Arbeitsgebiet Mikrostrukturtechnik, TU Dortmund, Friedrich-Wöhler-Weg 4, D-44227 Dortmund, andreas,neyer@tu-dortmund.de
2: Green Building R&D, Graf-Adolf-Sr. 49, D-40210 Düsseldorf, helmut.mueller@greenbuilding-rd.com

1 Tageslichtbeleuchtung von Gebäuden

Die Tageslichtbeleuchtung ist ein wesentlicher Einflussbereich unseres Wohlbefindens in Gebäuden, in denen wir die längste Zeit unseres Lebens verbringen. Im Einzelnen bestimmt sie den circadianen Biorhythmus [1], die Stimmung und Gesundheit, die visuelle Wahrnehmung sowie die Orientierung in Raum und Zeit. Darüber hinaus beeinflusst es Stromverbrauch und Wärmegewinne durch künstliche Beleuchtung und damit die Energieeffizienz und Betriebskosten von Gebäuden.

Eine gute Tageslichtbeleuchtung erfordert die frühzeitige Berücksichtigung im Gebäudeentwurf im Zusammenhang mit Städtebau, Baukörper- und Raumgeometrie, Geschosszahl, Fensterorientierung und -größe, Verglasung, Sonnen- und Blendschutz sowie Raumoberflächen. Während eingeschossige Gebäude und Dachgeschosse durch Dach- und Seitenfenster gleichmäßig beleuchtet werden können, lassen sich gestapelte Geschosse nur durch Seitenfenster und Lichthöfe beleuchten. Dadurch wird das Potenzial der Tageslichtbeleuchtung auf eine bestimmte Raumtiefe begrenzt. In vielen Gebäuden wird diese Raumtiefe überschritten und eine ergänzende Beleuchtung mit Kunstlicht ist erforderlich, wie z.B. in Klassenräumen oder Großraumbüros mit einseitiger Fensteranordnung.

Eine signifikante Steigerung der mit Tageslicht beleuchteten Raumfläche kann durch die Umlenkung von Sonnenlicht in die Raumtiefe erzielt werden. Vorausgesetzt, dass Blendung und solare Wärmegewinne beherrscht werden, ist dies eine ausgezeichnete Lösung zur Erhöhung von Beleuchtungsqualität, Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit.

2 Anforderungen an Lichtlenksysteme

Ziel der beschriebenen Produktentwicklung ist die Umlenkung von direktem Sonnenlicht in die Raumtiefe durch unbewegliche, starr in die Fensterverglasung integrierte Systeme, die den erforderlichen Blend- und Sonnenschutz sicherstellen.

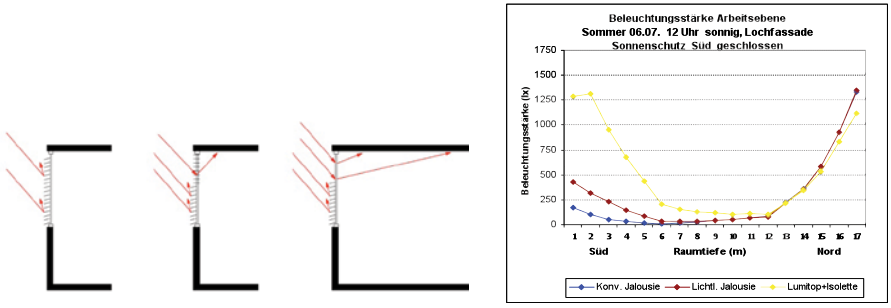
Für eine gute visuelle Wahrnehmung und Sehleistung am Arbeitsplatz werden Beleuchtungsstärken von 1000 lx bis 6000 lx empfohlen [2], wobei gute Kontraste durch die Lichtverteilung vorausgesetzt sind. Für circadiane Effekte ist eine Mindestbeleuchtungsstärke von 1000 lx auf der Retina erforderlich, wobei die spektrale Zusammensetzung gegenüber der Hellempfindlichkeit des Auges in den blauen Bereich verschoben ist [3]. Im Vergleich zu diesen empfohlenen Werten sind die verbindlichen Mindestbeleuchtungsstärken für künstliche Beleuchtung nach nationalen und internationalen Normen, z.B. DIN EN 12464 (2011) wesentlich niedriger. Diese unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten vereinbarten untersten Grenzwerte sollten nicht als optimale und empfohlene Werte missverstanden werden. Tageslichtsysteme sollen nach heutigen Erkenntnissen Beleuchtungsstärken größer 1000 lx ermöglichen, soweit entsprechende äußere Lichtverhältnisse gegeben sind. Bei klarem

Himmel und direkter Sonnenstrahlung auf der Fensterfläche ist diese Voraussetzung bei weitem erfüllt.

Eine Blendung durch direktes Sonnenlicht ist unbedingt zu unterbinden. Zur Vermeidung von Blendung an Bildschirmarbeitsplätzen werden von Gall und Vandahl [4] maximale Hintergrund-Leuchtdichten in Abhängigkeit von Typ und Klasse des Bildschirms empfohlen; 1000 cd/m² bis 2000 cd/m² für positive Polarität des Bildschirms, d.h. schwarze Zeichen auf weißem Grund.

Fenster müssen solare Wärmegewinne, die zu Raumüberhitzung bzw. erhöhten Kühllasten führen würden, unterbinden können. Die Einhaltung entsprechender Grenzwerte nach EnEV und DIN 4108 sollten aber keine Ausblendung des Tageslichts und Einschaltung des Kunstlichts zur Folge haben, wie es bei konventionellen Verschattungssystemen oft zu beobachten ist (z.B. starre Verschattungssysteme, Jalousien, Rollos).

Abbildung 1 zeigt exemplarisch drei Fenstervarianten, die bei effektivem Sonnenschutz zu ganz unterschiedlicher Tageslichtbeleuchtung im Raum führen [5]. Während die konventionelle Jalousie mit geschlossenen Lamellen den untersten Grenzwert in Fensternähe von 300 lx (DIN EN 12464) nicht erreicht, wird dieser Wert durch lichtlenkende Lamellen im oberen Fensterbereich gerade erzielt. Eine wesentlich bessere Tageslichtbeleuchtung ist durch lichtlenkendes Glas oben und eine Jalousie unten im Fenster möglich. Das untersuchte Bürogeschoss wird bis 5 m Raumtiefe ausreichend mit Tageslicht beleuchtet, in Fensternähe mit der empfohlenen Beleuchtungsstärke weit über 1000 lx.



a) Konv. Jalousie b) Lichtlenkende Jal. c) Lichtlenkglas + Jal.

Abb. 1: Vergleich der Beleuchtungsstärken in einem Büroraum in Dortmund für drei Tageslicht- / Sonnenschutzsysteme:
Links: a) Konventionelle Jalousie. b) Jalousie mit lichtlenkenden Lamellen im oberen Bereich. c) Lichtlenkendes Glas im oberen und Jalousie im unteren Bereich.
Rechts: Beleuchtungsstärke über dem Fensterabstand am 6.7., 12 Uhr. Verschattung geschlossen im Süd-, offen in Nordfenstern [5].

Die Varianten b) und c) in Abbildung 1 stellen heute ´best practice´ dar, weitere Lösungen siehe [6]. Im oberen Fensterbereich (über Augenhöhe einer stehenden Person) wird Sonnenlicht blendfrei in die Raumtiefe und an die reflektierende Decke umgelenkt. Gegenüber den lichtlenkenden Lamellen hat das Lichtlenkglas den Vorteil unbeweglicher Teile, die keiner Sonnennachführung bedürfen. Starr angeordnete Lichtwellenleiter lenken das Licht der Sonne bis zu Höhenwinkeln von 65° (repräsentativ für Mitteleuropa) schräg nach oben. Der unterhalb des Lots auf der Scheibe austretende Anteil des transmittierten

Lichts muss kleiner 10% sein, um Blendung zu vermeiden. Eine Funktionsbeeinträchtigung durch Verschmutzung ist aufgrund des Einbaus im Zwischenraum eines Zweischeiben-Isolierglases nicht möglich. Das unter der Bezeichnung „LUMITOP“ [7] angebotene Lichtlenkglas hat sich bis heute in zahlreichen Gebäuden bewährt (Beispiel siehe Abbildung 2).

Abb. 2: Lichtlenkendes Glas (LUMITOP) im oberen, Jalousie (im SZR) im unteren Fensterbereich. Spherion Bürogebäude, Düsseldorf, Deilmann Koch Architekten.

Die Herausforderung für diese Arbeit ist die Entwicklung eines starren Lichtlenksystem für Sonnenlicht mit gleicher oder besserer Funktion als das oben dargestellte Lichtlenkglas (LUMITOP) bei geringerem Material-, Fertigungs- und Kostenaufwand. Innovativ ist die Substitution der gestapelten Lichtwellenleiter (extrudierte, 11 mm dicke PMMA-Profile) durch eine kontinuierliche, dünne aber stabile PMMA-Scheibe mit beidseitiger Mikroprofilierung, hergestellt durch Heißprägen, einem für Massenfertigung geeigneten Fertigungsverfahren. Abbildung 3 zeigt die Verschlankung und Vereinfachung des optisch wirksamen Elements, das - in einem Isolierglas eingebaut - zusätzlich den Wärmeschutz verbessert.

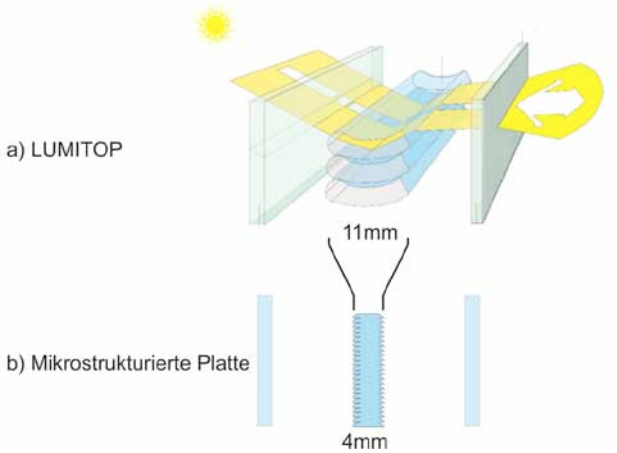


Abb. 3: Zweischeiben-Isolierglas mit lichtumlenkendem System im Zwischenraum:
a) LUMITOP mit 11 mm dicken, gestapelten Lichtwellenleitern
b) Innovatives System mit mikrostrukturierter Scheibe, 4 mm dünn und montagefreundlich.

3 Entwicklung eines mikrostrukturierten Lichtlenksystems

Bisherige Untersuchungen mikrostrukturierter Tageslichtlenksysteme konzentrierten sich entweder auf Systeme mit nur einer strukturierten Seite [8] oder beschränkten sich auf die Nutzung einfacher Geometrien wie Mikroprismenarrays [9]. Beide Lösungen scheitern aber daran das Licht kontinuierlich und über ein breites Band an Sonnenständen an die Raumdecke zu lenken.
Einseitig strukturierte Systeme haben in der Regel den Nachteil, dass sie entweder hohe oder tiefe Sonnenstände umlenken. Grundsätzlich ermöglicht es die beidseitige Strukturierung die Lichtlenkeigenschaften so zu manipulieren, dass das benötigte Band an Sonnenständen (ca. 15° bis 65° in Mitteleuropa) erfolgreich an die Raumdecke gelenkt werden kann. Allerdings erweist sich hier die alleinige Nutzung prismatischer Strukturen als wenig vorteilhaft, da beide Strukturseiten einer perfekten Ausrichtung zueinander bedürfen um das Licht zuverlässig zu lenken. Daher führen ungünstige Sonnenstände oder kleinste Abweichungen von der Sollgeometrie, wie mangelnde Planparallelität, zu starker Blendung, da das Licht nicht umgelenkt wurde. Beispielsweise lenken die perfekt zueinander ausgerichteten Strukturseiten des Systems in Abbildung 4a das Licht an die Raumdecke, während das System aus (b) trotz gleicher Geometrie, aufgrund des lateralen Versatzes der Strukturseiten, das Licht nach unten richtet.

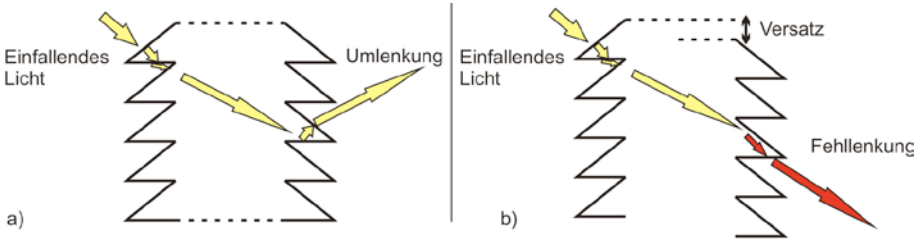


Abb. 4: Nachteil rein-prismatischer Lichtlenksysteme: Bereits ein kleiner Versatz (in Struktur b) reicht aus, um den Lichtweg von einer perfekten Umlenkung (Struktur a) zur vollständigen Transmission nach unten zu verändern.

Um diesem Problem zu begegnen wurde daher mit Hilfe von ausführlichen Computersimulationen (Raytracing-Software ZEMAX) eine Struktur ermittelt, die eine starke Erhöhung der Fehlertoleranz bietet und dennoch die notwendigen Anforderungen an ein gutes Lichtlenksystem erfüllt. Die Kombination einer linsenförmigen Struktur an der lichtzugewandten Seite mit einer prismatischen Struktur an der Rauminnenseite erwies sich als besonders vorteilhaft. Durch die Linsenstruktur wird eine deutliche Winkelaufweitung des einfallenden Lichts innerhalb der Platte erzielt. Dadurch wird auch unter ungünstigen Lichtverhältnissen nur ein Bruchteil des Lichts mangelhaft umgelenkt, sodass zu keinem Zeitpunkt eine zu starke Blendung zu befürchten ist. Abbildung 5 zeigt die Winkelaufweitung des eintreffenden Lichts innerhalb des Lichtlenksystems.

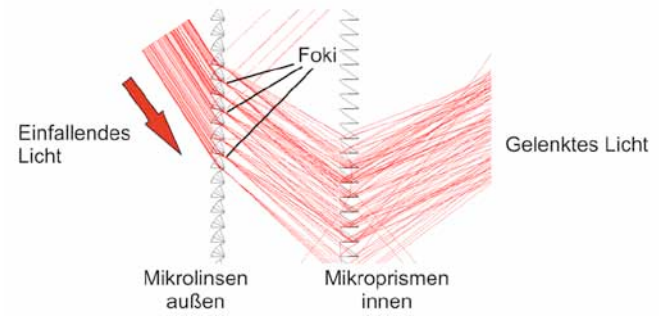


Abb. 5: Winkelaufweitung des einfallenden Lichts durch die Nutzung einer linsenförmigen Struktur.

4 Herstellung von Demonstratoren

Die Strukturkombination aus Abbildung 5 wurde an kleinformatigen Silikonprototypen erprobt, die im Gießverfahren erstellt wurde. Zur Herstellung von großformatigen Mustern wurden die Strukturen mittels Heißprägeverfahren in Acrylglasplatten übertragen (Karl Jungbecker GmbH, Olpe). Das Großformatmuster (Abbildung 6a) hat mit einem Maß von 1500 mm x 400 mm x 4 mm ein für den Einbau in ein Oberlicht hervorragend geeignetes Format. Die Vergrößerungen aus (b) zeigen die Querschnitte der eingesetzten linsen- und prismenförmigen Strukturen. Die Strukturen wurden über die gesamte bearbeitete Fläche mit höchster Genauigkeit repliziert. Sowohl beim Gieß- als auch beim Heißprägeverfahren wurde eine Strukturoberfläche von hoher optischer Güte mit einer geringen Rauheit (R_a < 100 nm) erstellt.

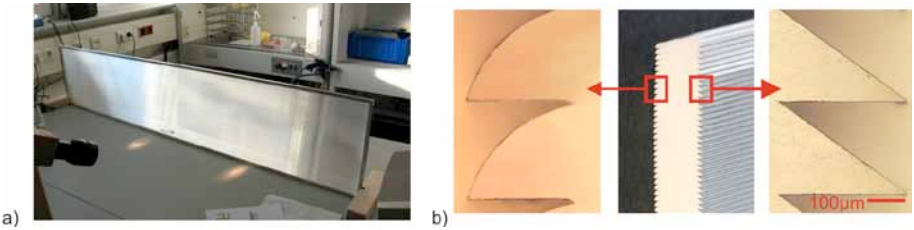


Abb. 6: a) Heißgeprägter PMMA-Demonstrator im Großformat (1500 mm x 400 mm x 4 mm)
b) Vergrößerung der linsenförmigen und prismatischen Strukturquerschnitte eines gegossenen Prototypen aus transparentem Silkon (PDMS). Die Strukturtiefen betragen jeweils 250 µm.

5 Charakterisierung der Lichtlenkeigenschaften

Abbildung 7 zeigt, dass die Lichtlenkung bereits mit einer einfachen Taschenlampe demonstriert werden kann. Es ist gut erkennbar wie der Lichtkegel von dem mikrostrukturierten System nach oben umgelenkt wird.

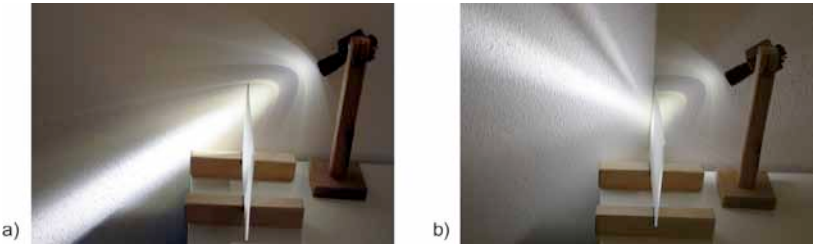


Abb. 7: Funktionsdemonstration ohne (a) und mit (b) Lichtlenksystem

Die quantitative Untersuchung der Lichtlenkcharakteristik erfolgte mit einem goniometrischen Messaufbau, wie er in Abbildung 8a schematisch gezeigt wird. Eine Lichtquelle (hier ein aufgeweiteter HeNe-Laserstrahl) beleuchtet das Lichtlenksystem unter einem definierten „Sonnenstandswinkel“ und erzeugt somit eine Lichtverteilung. Diese wird von einem Detektor auf der anderen Seite des Systems örtlich erfasst. Aus den Messwerten wird dann ein Transmissionswert für „oben“ und „unten“ bestimmt, wobei „oben“ dem Verhältnis der Leistungssumme des oberen, grün markierten Quadranten zur gesamten Leistung der Lichtquelle entspricht. Entsprechend gibt „unten“ das Verhältnis zwischen der Leistung im roten Quadranten und der Gesamtleistung an – nach außen reflektierte Lichtanteile werden nicht erfasst. Diese Messung wird für die Sonnenstände von 0° bis 75° durchgeführt wodurch sich dann die grüne und rote Transmissionskurve im zugehörigen Diagramm (Abbildung 8b) ergibt.
Das Diagramm verdeutlicht das Transmissionsverhalten des mikrostrukturierten Systems im Vergleich zum etablierten Makrosystem LUMITOP. Es zeigt sich, dass das Mikrosystem kontinuierlich einen größeren Anteil des einfallenden Lichts an die Raumdecke lenkt und damit effizienter arbeitet. Im Mittel werden rund 65 % des zwischen 15° und 65° einfallenden Lichts nach oben umgelenkt, während dieser Wert beim LUMITOP-System nur 43 % beträgt.

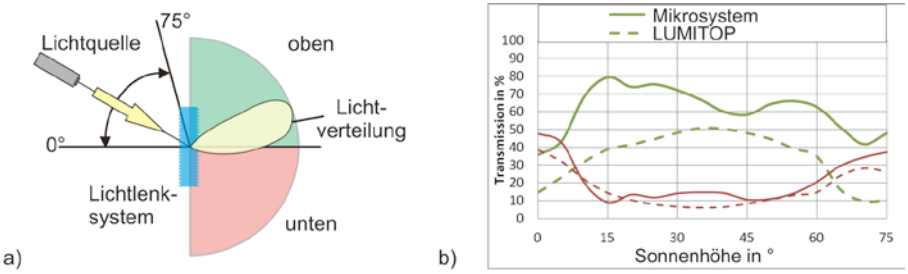


Abb. 8: a) Goniometrischer Messaufbau zur Charakterisierung der Lichtlenksysteme
b) Transmission nach „oben“ (in %, grüne Kurve) bzw. „unten“ (rote Kurve) in Abhängigkeit vom Winkel des Lichteinfalls (in °).

Das Mikrosystem bietet neben der effizienteren Lichtlenkung und der verbesserten Herstellungsmöglichkeiten aufgrund seiner Bauform als durchgängige Platte zusätzlich die Option der Nutzung als Flächenleuchte. LED-Licht kann über die Kante in die Platte eingekoppelt und an den Seitenflächen über die Mikrostrukturen wieder ausgekoppelt werden. Die resultierende Konfiguration hat damit tagsüber die volle Funktionalität eines Tageslichtlenksytems und kann bei Dunkelheit einem Gebäude mittels Beleuchtungseffekten eine einzigartige Charakteristik verleihen. Diese Funktionalität wird in Abbildung 9 demonstriert.

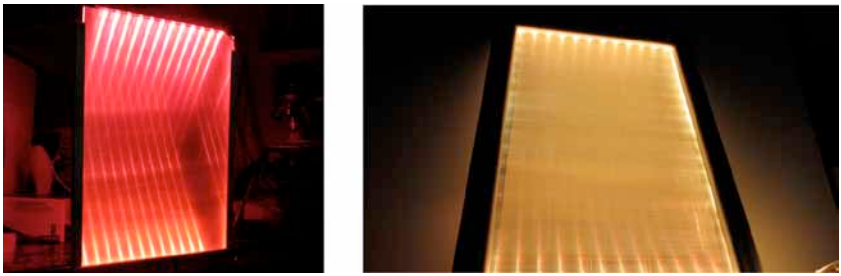


Abb. 9: Mikrostrukturiertes Lichtlenksystem als Flächenleuchte durch Seiteneinkopplung von LED-Licht. Der dreidimensionale Eindruck ist eine Folge der Mikrostrukturen.

6 Fazit

Die Entwicklung eines mikrostrukturierten Lichtlenksystems konnte erfolgreich demonstriert werden. Das resultierende System ist aufgrund seiner kompakten Bauform materialsparend und kann leicht in eine Verglasung integriert werden. Durch den Einsatz einer linsenförmigen Struktur ergibt sich eine starke Erhöhung der Fehlertoleranz wodurch die Massenproduktion im Heißprägeverfahren ermöglicht wird.
Die Funktionalität der Lichtlenkung wurde messtechnisch überprüft und zeigt im Vergleich zum etablierten LUMITOP-System eine um mehr als 20 % erhöhte Effizienz.
Diese Kombination aus hoher Umlenkeffizienz und kostengünstiger Massenfertigung ist bislang einzigartig und bietet damit erstmals für ein Tageslichtlenkprodukt das Potenzial einer hohen Marktdurchdringung.

Literaturverzeichnis

[1] W.J. M. van Bommel, G.J. van den Beld: Lighting for Work: Visual and Biological Effects, Philips Lighting, The Netherlands, April 2003.

[2] Lange, H. (Hrsg.): Handbuch für Beleuchtung, Ecomed Verlagsgesellschaft, Landsberg am Lech, 2002.

[3] Rae, M.S.: Sustainable Lighting: Let´s Talk about Value. Proceedings of CISBAT 2011. Daylighting: architecture and lighting design, Routledge, New York, 2011.

[4] Gall, D., Vandahl, C., Jordanowa, W., Jordanowa, S.: Light protection equipments in office rooms. The Shutters and Blind Expert. Magazine for Building Details, Kleffmannverlag Bochum, 2000.

[5] Mueller, H.F.O. et al. 2005. Sonnenschutz und Tageslicht in Bueroraeumen;. in: Bauphysik-Kalender 2005, Ernst & Sohn, Berlin.

[6] IEA International Energy Agency, SHC, Task 21, 2000: Daylight in Buildings, A Source Book on Daylighting Systems and Components, http://www.iea-shc.org/task21.

[7] Saint-Gobain Glass. Product Information SGG LUMITOP. http://uk.saint-gobain-glass.com/upload/files/sgg_lumitop_.pdf (06.01.2012).

[8] G. Walze, P. Nitz, J. Ell, A. Georg, A. Gombert, B. Bläsi and W. Hoßfeld, “Combination of Microstructures and Optically Functional Coatings for Solar Control Glazing,” Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 89, 2-3, pp. 233-248 (2005).

[9] H. Hocheng, T. Huang, T. Chou and W. Yang, “Microstructural fabrication and design of sunlight guide panels of inorganic-organic hybrid material,” Energy and Buildings. Vol. 43, 4, pp.1011-1019 (2011).

Felduntersuchung zur Tageslichtnutzung an Büroarbeitsplätzen und dem Einfluss der Architektur

Cornelia Moosmann, Andreas Wagner
Fachgebiet Bauphysik und Technischer Ausbau, KIT Karlsruher Institut für Technologie
Englerstraße 7, 76131 Karlsruhe

1 Zielsetzung und Methode

Durch die Nutzung von Tageslicht kann ein attraktives Arbeitsumfeld mit hoher Akzeptanz der Nutzer geschaffen werden. Darüber hinaus kann Tageslicht zur Beleuchtung eines Gebäudes beitragen, was seit Einführung der Energieeinsparverordnung 2007 verstärkt unter dem Aspekt der Substitution von Kunstlicht und der damit verbundenen Energieeinsparung diskutiert wird.
Die normativen Anforderungen an die Beleuchtung wurden überarbeitet und berücksichtigen Tageslicht stärker als in früheren Ausgaben. DIN 5034-1:2011 empfiehlt (bei unveränderten Mindestanforderungen) „als Voraussetzung für eine ausreichende Beleuchtung von Räumen mit Tageslicht“ einen Tageslichtquotienten von wenigstens 2% in Raummitte /1/. Zur Blendung durch Tageslicht fordert DIN EN 12464-1:2011, dass sie „durch passende Abschattung von hellem Tageslicht bei Fenstern vermieden“ werden muss /2/.

Um Arbeitsplätze planen zu können, die den Anforderungen der Nutzer möglichst weitgehend entsprechen, wurden in einem DFG-geförderten Grundlagenprojekt weitere Einflussgrößen auf die Zufriedenheit der Nutzer mit dem visuellen Komfort an ihrem Arbeitsplatz ermittelt. Untersucht wurden die Zufriedenheit mit Helligkeit und Tageslichtangebot, die Blendung durch Tageslicht und der Umgang der Nutzer mit Kunstlicht, Sonnen- und Blendschutz am tageslichtbeleuchteten Bildschirmarbeitsplatz.
Dafür wurden in einer umfangreichen Felduntersuchung in neun Bürogebäuden in jeder Jahreszeit zwei Wochen lang während des Alltags Messdaten aufgezeichnet. Die Messungen umfassten Leuchtdichtebilder der Fensterfassade, horizontale und zylindrische Beleuchtungsstärke, Schaltzustand des Kunstlichts und die Raumklimabedingungen. Am Ende jeder Messphase wurden die Nutzer dieser Räume mittels Fragebogen befragt. Insgesamt liegen 977 Fragebögen und Messdaten aus 539 Messzeiträumen vor.

Abb. 1: Typischer Messaufbau in einem der untersuchten Räume mit Leuchtdichtekamera /3/ und Datenloggern zur Aufzeichnung der Messwerte

2 Nutzerbewertung von Helligkeit und Tageslichtversorgung

Die Nutzer bewerten die Beleuchtung ihres Arbeitsplatzes überwiegend positiv. Die Beleuchtung mit Tageslicht (ohne Verschattung) wird von 58% der Nutzer als „eher gut“ oder „sehr gut“ beurteilt (N=854), die Beleuchtung mit Kunstlicht von 55% (N=933). Beide Bewertungen korrelieren miteinander (Pearson r=0.214, p<0.001, N=834).

Die Befragungen fanden überwiegend zwischen 9:00 Uhr und 13:00 Uhr statt. Während der Befragung war in 29% der Fälle – zusätzlich zum Tageslichtangebot – auch das Kunstlicht eingeschaltet. Der Mittelwert der Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz lag zu diesem Zeitpunkt bei 913 lx, bei einer sehr großen Streuung der Messwerte.

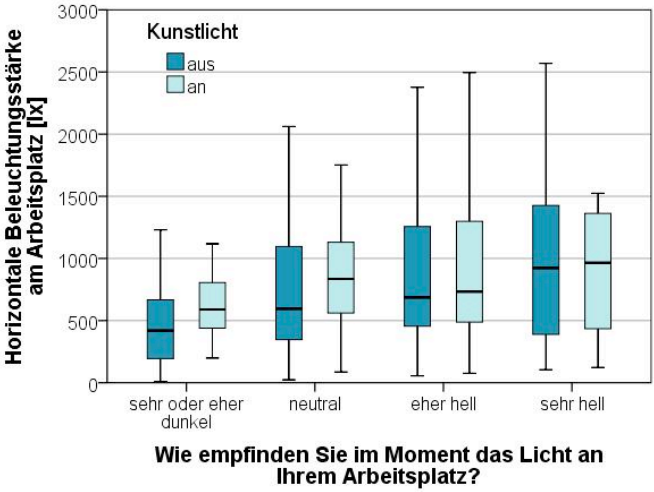


Abb. 2: Boxplot der Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz während der Befragung in Abhängigkeit von Nutzerbewertung der Helligkeit und Kunstlichtzustand

Die Varianzanalyse zeigt einen signifikanten Zusammenhang zwischen Helligkeitsbewertung und Beleuchtungsstärke (α=0.05, F=10.766, p<0.001, N=758). Der Schaltzustand des Kunstlichts beeinflusst die Bewertung nicht signifikant.

Der Mittelwert der Beleuchtungsstärken, die unter Tageslichtbedingungen als weder hell noch dunkel empfunden wurden, liegt bei 859 lx. Mit dieser – im Rahmen der Möglichkeiten des jeweiligen Gebäudes – selbst gewählten Helligkeit sind die Nutzer überwiegend zufrieden: 67% wünschen sich keine Veränderung des Helligkeitsniveaus. Nur 9% der Probanden geben an, ein „eher dunkleres“ oder „deutlich dunkleres“ Helligkeitsniveau zu bevorzugen, 24% der Nutzer hätten dagegen gerne „eher mehr“ oder sogar „deutlich mehr“ Helligkeit am Arbeitsplatz. Die Nutzer, die ein höheres Helligkeitsniveau bevorzugen würden, sind zu 68% in der Altersgruppe unter 40 Jahren (bei Gewichtung der Anteile entsprechend der Anzahl Bewertungen von Nutzern unter bzw. über 40 Jahren).
Die horizontale Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz, bei der die Nutzer keine Veränderung wünschen, liegt an den untersuchten Arbeitsplätzen im Mittel bei 966 lx und damit deutlich über dem Wartungswert der Beleuchtungsstärke von 500 lx nach DIN EN 12464-1. Die zylindrische Beleuchtungsstärke in Fensternähe liegt bei dieser Nutzerbewertung im Mittel bei 1727 lx.

Neben dem Alter beeinflusst – wie auch beim thermischen Komfort – die Jahreszeit und damit die Adaption der Nutzer die Bewertung der am Arbeitsplatz vorhandenen Helligkeit. Der Wertebereich, der im Frühling als zu dunkel erlebt wird, wird im Herbst als gerade richtig empfunden.
Auch die Architektur beeinflusst die Wünsche der Nutzer: Der Wertebereich der Beleuchtungsstärken, die den Wünschen der Nutzer entsprechen, liegt in Gebäuden mit moderaten Fensterflächenanteilen (Fassaden mit einzelnen Fenstern oder Fensterbändern) im Frühling und Winter niedriger als bei Gebäuden mit Ganzglasfassaden.

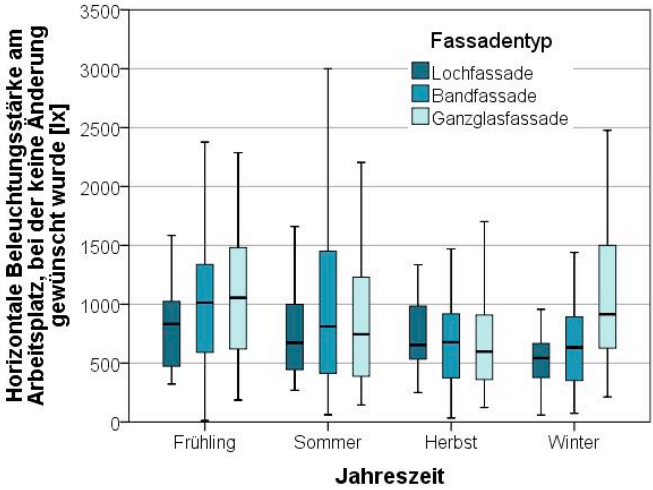


Abb. 3: Boxplot der Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz, bei der keine Veränderung gewünscht wurde, in Abhängigkeit von Jahreszeit und Fassadentyp

Im Sommer und Herbst (Kühlperiode) ist der neutrale Wertebereich in den Gebäuden mit Ganzglasfassade nach unten verschoben – möglicherweise spielt der regelmäßige Einsatz des Sonnenschutzes (potentiell hohe thermische Solarlast, Blendung durch Tageslicht) eine Rolle.

Die gewünschte Helligkeit wird neben den genannten Faktoren auch vom Alter der Nutzer und der Bewertung des Ausblicks signifikant beeinflusst (Regressionsanalyse, Hybridmodell: R^2=0.365, F=84.4, p<0.001, N=597).

Der Tageslichtquotient als Kennwert für eine ausreichende Beleuchtung von Räumen mit Tageslicht wird von den Nutzerbewertungen nicht bestätigt. An 370 der untersuchten Arbeitsplätze wurde der Tageslichtquotient in orientierenden Messungen ermittelt. Diese Tageslichtquotienten der Arbeitsplätze können nicht direkt mit der Empfehlung der DIN 5034 für den Tageslichtquotienten in Raummitte verglichen werden. Die untersuchten Arbeitsplätze sind in der Regel näher an der Fensterfassade als der Referenzpunkt der Norm. Die Tageslichtquotienten in den neun Gebäuden unterscheiden sich signifikant (ANOVA: F=15.2, p<0.001, N=370; Gebäudemittelwerte Minimum 0.90, Mittelwert 2.90, Maximum 5.40). Der gemessene Tageslichtquotient am Arbeitsplatz hat keinen statistisch signifikanten Effekt (p=0.299) auf die Nutzerbewertung der Versorgung mit Tageslicht ohne Verschattung (Regressionsanalyse, Hybridmodell, N=776). Das kann auch für den normativ in Raummitte zu messenden Tageslichtquotienten gefolgert werden.

Räume zu Atrien werden von den Nutzern auch bei vergleichbarem Tageslichtquotienten und deutlich größerem Fensterflächenanteil als weniger gut mit Tageslicht versorgt bewertet als außen liegende Räume (ANOVA: F=6.785, p=0.011, N=82).

Die Zufriedenheit mit der Tageslichtversorgung hängt in der vorliegenden Stichprobe vor allem von folgenden Faktoren ab:
- Häufigkeit der Blendung durch das Fenster
- Einschränkung des Ausblicks durch die Fenstergröße
- Bewertung des Ausblicks (angenehm – unangenehm)
- Bedienbarkeit des Sonnenschutzes
- Zufriedenheit mit der Temperatur
- Zufriedenheit mit der Arbeitstätigkeit

Diese Faktoren erklären insgesamt 30% der Streuung (Regressionsanalyse, Hybridmodell: R^2=0.302, F=20.4, N=582).

Die befragten Nutzer präferieren moderate Fensterflächenanteile: Das Nutzerurteil „das Fenster ist zu klein / eher zu klein“ wird bei einem mittleren Fensterflächenanteil von 43% bezogen auf die Nettofassade abgegeben, „gerade richtig“ bei durchschnittlich 58%, „eher zu groß“ bei durchschnittlich 71% und „zu groß“ bei 97% Fensterflächenanteil.

3 Blendung durch Tageslicht

Die Nutzer nannten in ihren Kommentaren zum Tageslicht vor allem zwei Kritikpunkte: Den Mangel an Tageslicht und Blendung durch Tageslicht.
Für Blendung durch Tageslicht existiert neben dem Blendungsindex Daylight Glare Index (DGI) auch die Daylight Glare Probability (DGP), die vom Projektpartner Fraunhofer ISE auf Basis von Testraumuntersuchungen weiterentwickelt wurde /4/. Die Erweiterungen berücksichtigen neben einer Ergänzung für Fälle mit geringem Blendrisiko ($DGP_{lowlight}$) die Durchsicht ($DGP_{viewratio}$) und das Alter (DGP_{age}), die bei den folgenden Auswertungen berücksichtigt wurden.

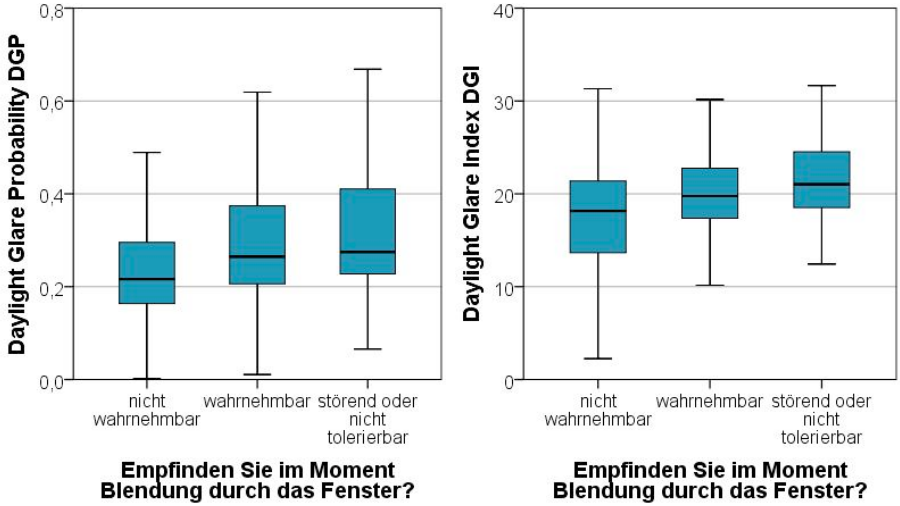


Abb. 4: Boxplots der Daylight Glare Probability und des Daylight Glare Index über der Blendungsbewertung

Die aus den fensternah aufgenommenen Leuchtdichtebildern berechneten $DGP_{viewratio,\ age}$-Werte erklären einen Teil der Varianz der Nutzerbewertung der Blendung durch das Fenster (Regressionsanalyse, RE-Modell: R^2=0.269, F=274.3, N=751).
Bei der Berechnung des Daylight Glare Index DGI wurde abweichend von der Definition des DGI die Blendquellenleuchtdichte statt der Fensterleuchtdichte verwendet. Der hier ausgewiesene DGI-Wert korreliert dadurch stärker mit der Blendungsbewertung als der Original-DGI. Das Bestimmtheitsmaß für diesen DGI-Wert ist trotzdem etwas geringer als für den DGP-Wert (Regressionsanalyse, RE-Modell: R^2=0.254, F=275.2, N=824).

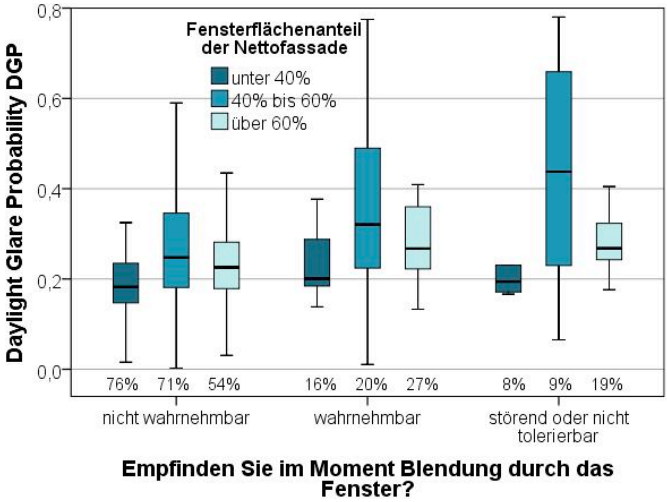


Abb. 5: Boxplot der Daylight Glare Probability über der Blendungsbewertung in Abhängigkeit vom Fensterflächenanteil

Bei Fensterflächenanteilen unter 40% bezogen auf die Nettofassade haben 24% der Probanden zum Zeitpunkt der Befragung Blendung wahrgenommen. Bei Fensterflächenanteilen über 60% war der Anteil mit 46% deutlich größer. Die höchsten DGP-Werte werden bei mittleren Fensterflächenanteilen akzeptiert.
Wie das gewünschte Helligkeitsniveau wird auch die Bewertung der Blendung durch Tageslicht neben den lichttechnischen Größen ($DGP_{viewratio,\ age}$) und dem Fensterflächenanteil von der Bewertung des Ausblicks signifikant beeinflusst (Regressionsanalyse, Hybridmodell: R^2=0.292, F=70.4, p<0.001, N=691).

4 Nutzereingriffe

Veränderungen des Sonnen- oder Blendschutzes oder des Kunstlichts, die die Nutzer vorgenommen haben, können als Nutzerurteil interpretiert werden, dass die Situation vor dem Eingriff nicht komfortabel war.
Das Schließen des Sonnen- oder Blendschutzsystems erfolgt im Sommer bei einem mittleren $DGP_{viewratio}$ von 0.46, in den übrigen Jahreszeiten bei signifikant höheren $DGP_{viewratio}$-Werten (Frühling und Winter 0.50, Herbst 0.51; ANOVA: F=7.8, p<0.001, N=1735). Auch der $DGP_{viewratio}$-Wert, der von den Nutzern beim Schließen des Systems „eingestellt" wird, hängt von der Jahreszeit ab. Die Unterschiede zwischen den Jahreszeiten sind noch deutlicher als bei den DGP-Werten, die Anlass für den Eingriff waren (ANOVA: F=33.2, p<0.001, N=1735).

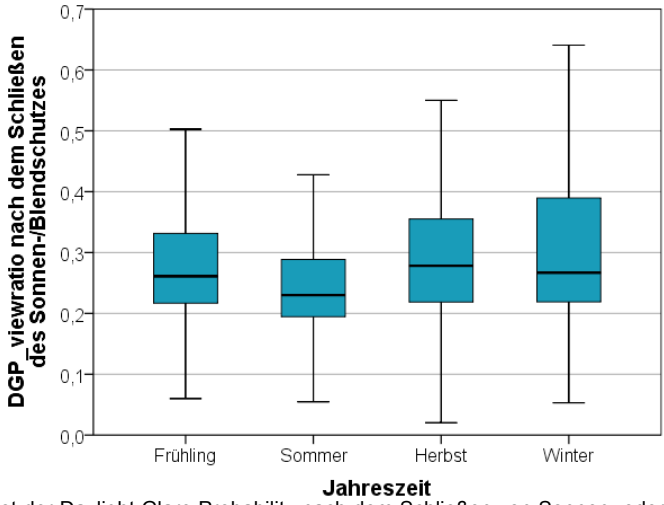


Abb. 6: Boxplot der Daylight Glare Probability nach dem Schließen von Sonnen- oder Blendschutz in Abhängigkeit von der Jahreszeit

Nach Angaben der Nutzer ist der Schutz vor Blendung in allen Jahreszeiten der häufigste Anlass für das Schließen des Sonnenschutzes (bei 77% der Befragungen genannt), im Sommer ist der Schutz vor unerwünschter Wärme ein ebenfalls häufig genannter Anlass (66%), der den etwas früheren und wirksameren Einsatz des Sonnenschutzes erklärt.

Das Öffnen des Sonnen- oder Blendschutzes erfolgt überwiegend in den Morgen- und Abendstunden. Der Sonnen- oder Blendschutz wird häufig vollständig oder fast vollständig geöffnet (viewratio ≥ 0.75 bei 75,7% der Nutzereingriffe).

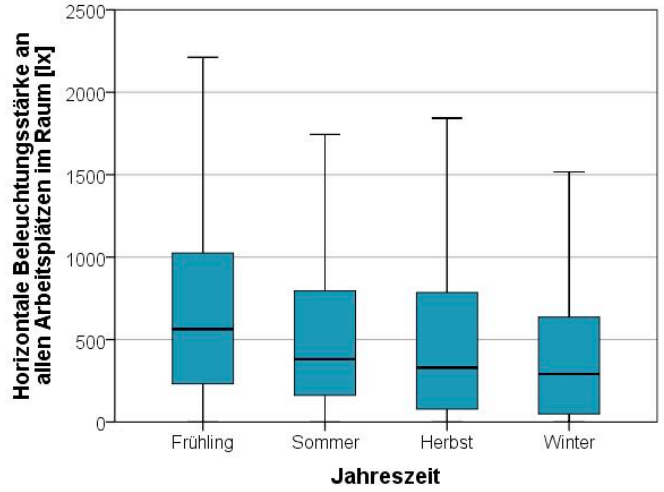


Abb. 7: Boxplot der horizontalen Beleuchtungsstärke an allen Arbeitsplätzen im Raum nach dem Öffnen von Sonnen- oder Blendschutz in Abhängigkeit von der Jahreszeit

Die Unterschiede zwischen den Jahreszeiten entsprechen denen der Helligkeitsbewertung. Die Beleuchtungsstärke ist im Frühling am höchsten und in den anderen Jahreszeiten signifikant niedriger (ANOVA F=53.7, p<0.001, N=4266).

Auch der Ausblick aus dem Fenster beeinflusst den Umgang der Nutzer mit dem Sonnenschutzsystem. Die $DGP_{viewratio}$-Werte vor dem Schließen des Systems sind bei durch Gebäude oder Gebäudeteile eingeschränktem Ausblick signifikant niedriger (0.44) als bei durch Bäume eingeschränktem Ausblick (0.48) oder uneingeschränktem Ausblick (0.52; ANOVA: F=18.3, p<0.001, N=1577). Bei uneingeschränktem Ausblick wird im Mittel ein Durchsichtsanteil von 33% eingestellt, wenn Gebäude oder Bäume die Aussicht einschränken wird der Sonnenschutz weniger weit geschlossen (Durchsichtsanteil 42%).

In vier der untersuchten Gebäude wird das Kunstlicht manuell geschaltet, in fünf Gebäuden ist das Kunstlicht tageslicht- und teilweise zusätzlich präsenzabhängig geregelt. Die Zufriedenheit der Nutzer mit der künstlichen Beleuchtung ist groß. 75% der Bewertungen bei manuell geschalteten Kunstlichtanlagen und 65% bei tageslichtabhängig geregelten Kunstlichtanlagen sind „weder zu dunkel noch zu hell“. Der Anteil Nutzer, der die künstliche Beleuchtung des Arbeitsplatzes als „eher zu dunkel“ oder „zu dunkel“ empfindet, ist bei tageslichtabhängig geregelten Anlagen mit 22% größer als bei manuell gesteuerten Anlagen (7%). Der Unterschied der Nutzerbewertung in Abhängigkeit von der Kunstlichtsteuerung ist signifikant (ANOVA: F=27.8, p<0.001, N=826).

Das Ein- und Ausschalten des Kunstlichtes wurde in sieben der neun untersuchten Gebäude erfasst. Das Einschalten des Kunstlichtes kann als Nutzerbewertung interpretiert werden, dass die Situation vor dem Einschalten als zu dunkel empfunden wurde. Ob das Einschalten aufgrund der als zu gering empfundenen horizontalen Beleuchtungsstärke (Mittelwert vor dem Einschalten 321 lx) oder aufgrund der als zu gering empfundenen zylindrischen Beleuchtungsstärke (Mittelwert E_{zyl} in Fensternähe vor dem Einschalten 459 lx) erfolgt ist, kann nicht festgestellt werden.

Die mittlere Brenndauer einer Leuchte hängt von der Jahreszeit und Steuerung der Leuchten ab. In den Monaten April bis August wird das Kunstlicht durchschnittlich an 33% der Messtage eingeschaltet, in den Monaten September bis März an 65% der Messtage. Dieser Unterschied ist signifikant (ANOVA F=83.9, p<0.001, N=476).

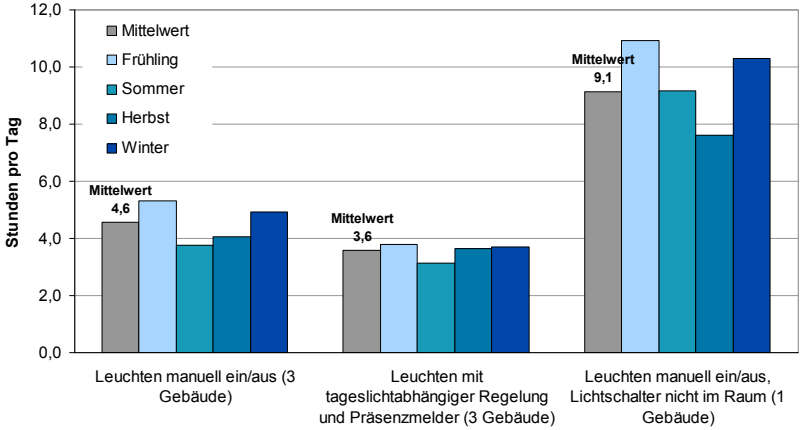


Abb. 8: Durchschnittliche Brenndauer der Leuchten pro Tag mit Kunstlichtnutzung in Abhängigkeit von Kunstlichtsteuerung und Jahreszeit

Die Brenndauer der Leuchten pro Tag, an dem sie eingeschaltet wurden, unterscheidet sich nicht signifikant in den verschiedenen Jahreszeiten. Die Steuerung des Kunstlichts dagegen hat einen signifikanten Einfluss auf die Brenndauer. In den Gebäuden mit rein manueller Schaltung der Beleuchtung liegt der Mittelwert bei 4,6 h pro Tag mit Kunstlicht, in den Gebäuden mit automatischer Steuerung liegt der Mittelwert bei nur 3,6 h pro Tag. In einem Gebäude, in dem die Lichtschalter sich nicht im Raum befinden, brennt das Kunstlicht mit durchschnittlich 9,1 h pro Tag signifikant länger.

5 Fazit

Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen die insgesamt große Zufriedenheit der Nutzer mit der Beleuchtung. Die vorgefundenen Beleuchtungsstärkeniveaus liegen dabei teilweise deutlich über den Mindestanforderungen der Norm.
Die Faktoren Alter und Jahreszeit haben einen signifikanten Einfluss auf die Nutzerbewertung und -akzeptanz der Beleuchtung mit Tages- und Kunstlicht, im Frühjahr werden höhere Beleuchtungsstärkeniveaus gewünscht und höhere Blendungswerte akzeptiert als in den übrigen Jahreszeiten.
Auch die Qualität der Aussicht und der Fensterflächenanteil beeinflussen das gewünschte Helligkeitsniveau und die Blendungsbewertung – je umfassender und „schöner“ die Aussicht, desto höher sind gewünschte Beleuchtungsstärke und tolerierte DGP-Werte.
Neben Atrium und Fensterflächenanteil ist die Büroform ein weiterer architektonischer Parameter, der die Zufriedenheit der Nutzer stark beeinflusst. In Großraumbüros ist die Zufriedenheit mit fast allen abgefragten Aspekten signifikant niedriger als in Zellenbüros.
Besonders groß ist der Unterschied bei der Zufriedenheit mit dem Geräuschpegel, die Zufriedenheit mit dem Kunstlicht unterscheidet sich nicht signifikant.
Der Umgang der Nutzer mit Sonnen- und Blendschutz zeigt neben dem Wunsch nach viel Licht im Frühjahr auch den Wunsch, sich im Sommer vor Wärmeeinträgen über die Fassade zu schützen.
Nutzereingriffe in die Steuerung des Kunstlichts und die Bewertung der Helligkeit zeigen den Wunsch der Nutzer nach Beleuchtungsstärken über den Mindestanforderungen der Norm und den engen Zusammenhang zwischen Steuerung, Nutzerfreundlichkeit und energetischem Einsparpotential.

6 Danksagung

Das Projekt „Ermittlung relevanter Einflussgrößen auf die subjektive Bewertung von Tageslicht zur Bewertung des visuellen Komforts in Büroräumen“ wurde gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG (Förderkennzeichen WA 1155/5-1 und WA 1155/5-2).

7 Literatur

/1/ DIN 5034-1:2011-07: Tageslicht in Innenräumen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen

/2/ DIN EN 12464-1:2011-08: Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen

/3/ Abromeit, A.; Wagner, A.: Kostengünstige Leuchtdichtekameras mit CMOS-Sensoren. Tagungsband Licht 2008. Ilmenau, 2008.

/4/ Moosmann, C. ; Wienold, J. ; Wagner, A. ; Wittwer, V. : Abschlussbericht des DFG-Projektes „Ermittlung relevanter Einflussgrößen auf die subjektive Bewertung von Tageslicht zur Bewertung des visuellen Komforts in Büroräumen“. Eingereicht 2012.

Untersuchung von Lichtwirkungen am Tag - Feldstudie in Industriebetrieben

Karin Bieske, Cornelia Vandahl, Christoph Schierz, Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik PF 100 565, 98684, Ilmenau

1 Forschungsgegenstand

Die aktivierende Wirkung von Licht hat großes Potenzial für die Beleuchtungspraxis. Leider ist dies die – insbesondere am Tage – am wenigsten untersuchte biologische Lichtwirkung. Auch die Stabilität der inneren Uhr dürfte in einer Zeit unregelmäßiger Arbeits- und Freizeitaktivitäten stärker variieren als früher. Über die sinnvolle Anwendung der Erkenntnisse zu biologischen Lichtwirkungen am Arbeitsplatz ist derzeit sehr wenig bekannt. Im Blickpunkt der durchgeführten Studie stand daher der Einfluss unterschiedlicher Beleuchtungsszenarien an Industriearbeitsplätzen am Tage auf Wohlbefinden, Schlafqualität und Akzeptanz der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Schwerpunkte dabei waren der Einfluss von Spektrum, Lichtverteilung und dynamischer Lichtfarbenvariationen.

2 Stand der Wissenschaft und Forschungshypothesen

Aus der Literatur sind folgende Fakten bekannt:

- Licht hat beim Menschen Einfluss auf wesentliche biologische Prozesse und kann die subjektiv empfundene Munterkeit steigern /1/.
- Die biologische Wirksamkeit wird bestimmt durch die Lichtmenge, die von den 2001 entdeckten lichtempfindlichen Ganglienzellen in der Netzhaut absorbiert wird. Wesentliche Einflussgrößen sind neben der Beleuchtungsstärke, die spektrale Zusammensetzung des Lichts und damit die Lichtfarbe, die örtliche Lichtverteilung, der Zeitpunkt und die Dauer der Beleuchtung sowie das Alter des Menschen.
- Die spektrale Empfindlichkeit der lichtempfindlichen melanopsinhaltigen Ganglienzellen, die für die biologische Lichtwirkung verantwortlich gemacht werden, unterscheiden sich deutlich von der Empfindlichkeit der Zapfen und Stäbchen im Auge und haben eine größere Empfindlichkeit im kurzwelligen Spektralbereich /2, 3/.
- Die melanopsinhaltigen Ganglienzellen kommen nicht in der Fovea vor, sondern sind in der Peripherie der Netzhaut verteilt /4/.
- Mit zunehmendem Alter vergilbt die Linse im Auge. Dadurch ändern sich die spektralen Transmissionseigenschaften des Auges /5, 6/.
- Vergleichende Untersuchungen zwischen einer Beleuchtung mit statischem Beleuchtungsniveau und einer Beleuchtung, die phasenweise zwischen hohen und niedrigen Beleuchtungsniveaus schwankt, zeigen, dass mit sich ändernden Reizen während einer Zeitdauer ähnliche Wirkungen erzielt werden konnten als mit statischen Reizen mit einem hohen Beleuchtungsniveau /7, 8, 9/.

Daraus leiten sich folgende Forschungshypothesen ab:

- In dunklen Industriehallen können höhere Beleuchtungsstärken am Auge die Aktiviertheit und das Wohlbefinden erhöhen.
- Lichtfarben mit höherer ähnlichster Farbtemperatur besitzen auch am Tage eine größere biologische Lichtwirkung als wärmere Lichtfarben bei gleicher Beleuchtungsstärke am Auge.
- Große leuchtende Flächen, die einen großen Bereich der Netzhaut ausleuchten, erzielen eine größere Wirkung als eine Beleuchtung, die nur punktuell Netzhautareale reizt.

- Der Lichtbedarf nimmt mit dem Alter zu, um die gleiche Wirkung wie in jüngeren Jahren zu erzielen.
- Eine sich im Tagesverlauf ändernde Lichtfarbe kann größere Effekte erzielen als eine konstante Lichtfarbe während des Tages.

Vor dem Hintergrund dieser Erkenntnisse und Forschungshypothesen wurde ein Versuchskonzept für ein Feldexperiment entworfen, mit dem das Potential der aktivierenden und stabilisierenden Wirkung des Lichtes am Tage unter realen Arbeitsbedingungen untersucht wurde.

3 Methode und Versuchsdesign

Die Untersuchung erfolgte an typische Montage- und Reparaturarbeitsplätzen in Industriebetrieben an fünf Standorten. Ausgewählt wurden Arbeitsplätze, an denen wenig Tageslicht vorhanden ist und wo die dort tätigen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter vorwiegend in einem abgegrenzten Arbeitsplatzbereich und in Tagschichten beschäftigt sind. Unter den 41 Probanden im Alter zwischen 21 und 61 Jahren waren 18 Frauen, 20 Probanden jünger als 45 Jahre und vom Chronotyp 6 Früh-, 15 Normal und 20 Spättypen. Da zu erwarten ist, dass Lichtwirkungen am Tag während der lichtärmeren Jahreszeiten deutlicher in Erscheinung treten, wurde die Studie im Zeitraum von September 2010 bis April 2011 durchgeführt.

3.1. Beleuchtungssituationen

Aufgrund der unterschiedlichen Gegebenheiten an den einzelnen Arbeitsplätzen war es nicht möglich, einheitliche Beleuchtungsverhältnisse an den Arbeitsplätzen für die einzelnen Versuchsszenarien zu schaffen. Betrachtet werden daher in dieser Studie die Änderungen bezüglich der vorgefundenen Beleuchtungsverhältnisse (Situation S1: Ist-Situation). Die Realisierung der unterschiedlichen Beleuchtungsszenarien erfolgte in Ergänzung zur bestehenden Beleuchtungsanlage an den Arbeitsplätzen mit zusätzlichen Flächenleuchten und durch Einbau von Lampen anderer Lichtfarbe in die vorhandenen Leuchten. Als Flächenleuchten wurden Leuchten der Firma Philips *SmartForm TBS473* mit einer leuchtenden Fläche von 55,5 cm x 55,5 cm verwendet. Sie sind für sechs T5 Leuchtstofflampen ausgelegt und verfügen über elektronische Vorschaltgeräte mit DALI-Schnittstelle. Die Abschlussscheibe ist in OLC-Microlinsenoptik für die Lichtmischung realisiert. Verwendet wurden je Leuchte zwei Lampen des Typs *Phillips Master T5 HO 827 24 W* (CCT = 2700 K) und vier Lampen des Typs *Philips Master T5 HO Activiva Natural 24 W* (CCT = 8000 K). Für die Leuchten können Helligkeit und Lichtfarbe definiert und zeitliche Verläufe festgelegt werden. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass eine mittlere Leuchtdichte von L_{FL} = 2000 cd/m² auf der Flächenleuchte toleriert wird ohne Blendung zu verursachen. Für die Feldversuche wurden Flächenleuchten mit einer mittleren Leuchtdichte von L_{FL} = 1500 cd/m² eingesetzt. In einzelnen Fällen traten jedoch Blendprobleme auf, sodass die Helligkeit der Flächenleuchte an diesen Arbeitsplätzen auf Leuchtdichten von L_{FL} = 1000 cd/m² oder L_{FL} = 750 cd/m² reduziert wurden.

Um den Einfluss von großen leuchtenden Flächen im Gesichtsfeld zu untersuchen, wurde die Situation S2: Flächenleuchte im Vorfeld/seitlich entworfen. Je nach Gegebenheiten an den Arbeitsplätzen wurde eine zusätzliche Flächenleuchte direkt vor dem Arbeitsplatz installiert oder zwei Leuchten seitlich zum Arbeitsplatz aufgestellt (Abbildung 1). In Voruntersuchungen konnten vergleichbare Bestrahlungsverhältnisse für beide Aufstellvarianten der Flächenleuchten im Arbeitsbereich nachgewiesen werden. Für einen Vergleich zwischen Leuchten mit statischer Lichtfarbe und Leuchten mit dynamischer Lichtfarbenvariation dienen die Situationen S2 und S3. Situation S4 wurde für die Bewertung des Einflusses der Lichtfarbe im Vergleich zur Ausgangssituation S1 konzipiert. Dafür wurden T8-Lampen

vom Typ *skywhite* (CCT = 8000 K) mit entsprechender Leistung und Farbwiedergabe in den Leuchten verwendet.

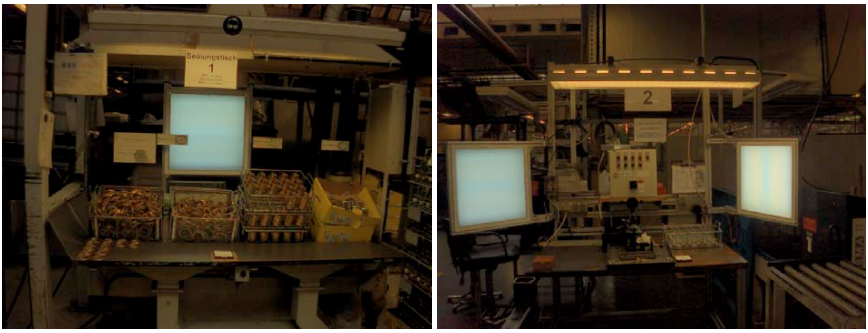


Abb. 1: Beispiele für installierte Flächenleuchten im Vorfeld und seitlich zum Arbeitsplatz

Für den Nachweis der Validität der Ergebnisse wurde zum Abschluss der Studie die Ausgangssituation wiederholt betrachtet (Situation S5). Jede Versuchssituation wurde über einen Zeitraum von mindestens vier Wochen untersucht. Einen Überblick und eine Beschreibung über die untersuchten Beleuchtungsszenarien gibt Tabelle 1.

3.2. Messtechnische Erfassung

Zur Beschreibung der Beleuchtungsverhältnisse dienten photometrische Messungen mit einem Spektralradiometer und örtlich aufgelöster Messtechnik an den Arbeitsplätzen. Gemessen wurden an den Arbeitsplätzen die horizontale Beleuchtungsstärke E_h auf der Arbeitsebene, die vertikale Beleuchtungsstärke E_v in Augenhöhe (1,6 m für Steharbeitsplätze und 1,2 m für Sitzarbeitsplätze), die Beleuchtungsstärke $E_{45°}$ in Augenhöhe unter einem Blick von 45° nach unten zur Arbeitsebene, sowie die ähnlichste Farbtemperatur CCT auf der Arbeitsebene. Weiterhin wurden die entsprechenden mit der $s_\mathrm{ms}(\lambda)$-Funktion bewerteten Bestrahlungsstärken E_ms nach Gleichung (1) bestimmt. Die $s_\mathrm{ms}(\lambda)$-Funktion beschreibt die Wirkfunktion für die biologische Lichtwirkung nach DIN V 5031 Teil 100 /8/.

Gleichung (1): $$X_{S_{ms}} = \int X_{e\lambda}(\lambda) \cdot s_{ms}(\lambda)\, d\lambda$$

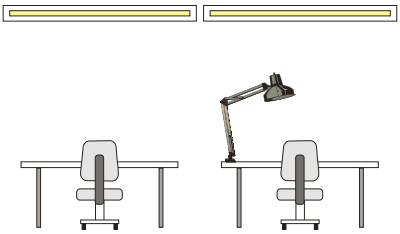
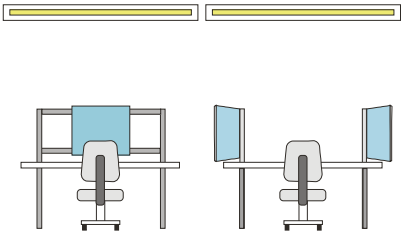
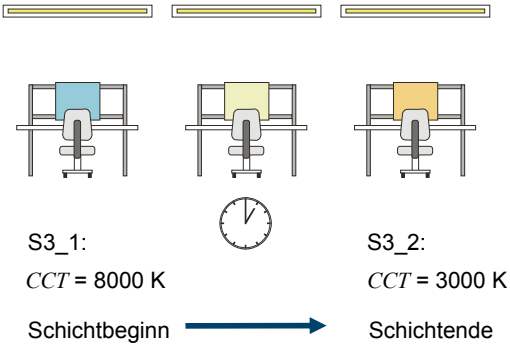
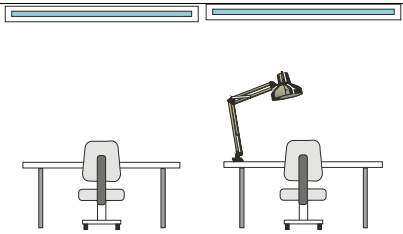
Tabelle 2 fasst die Messwerte für die einzelnen Versuchsszenarien zusammen. Es zeigt sich eine große Streuung zwischen den Arbeitsplätzen. Trotz unterschiedlicher Auslegung der Beleuchtung war die horizontale Beleuchtungsstärke E_h während allen Beleuchtungssituationen ähnlich. Durch den Einsatz der Flächenleuchten erhöhte sich die vertikale Beleuchtungsstärke E_v in den Beleuchtungssituationen S2 und S3 im Vergleich zu S1/S4/S5 um etwa den Faktor 1,5. Auch die $E_{45°}$-Werte waren entsprechend höher. Die mit der $s_\mathrm{ms}(\lambda)$-Funktion bewerteten Bestrahlungsstärken E_ms in der Horizontalen waren in der Beleuchtungssituation S4 deutlich erhöht, während in den anderen Beleuchtungssituationen die Werte denen in Situation S1 ähnelten. Die E_ms–Werte für die Vertikale und unter einem Blick von 45° zur Arbeitsebene wurden durch die Flächenleuchten mit hoher Farbtemperatur um einen Faktor von bis zu 2,1 im Vergleich zur Beleuchtungssituation S1 angehoben.

3.3. Befragung

Der Einfluss ausgewählter Beleuchtungsszenarien auf Wohlbefinden, Schlafqualität und Akzeptanz der Mitarbeiter wurde mittels Fragebögen erfasst.

Zu Beginn des Feldexperiments wurden die Probanden über die geplante Studie informiert. Dabei wurden die einzelnen Versuchsszenarien vorgestellt, auf die durchzuführen-

den Messungen eingegangen und die Fragebögen im Detail besprochen. Von jedem Probanden wurden allgemeine Angaben erfasst. Zum Ende jeder Arbeitswoche beantworteten die Probanden Fragen zum Befinden, Freizeit- und Schlafverhalten und bewerteten die Beleuchtung. Um einen Überblick über eine vergleichende Bewertung zwischen den Versuchsszenarien zu gewinnen, wurde am Ende des Feldexperiments ein Abschlussfragebogen eingesetzt. Die Schwerpunkte der Fragebögen enthält Tabelle 3.

Situation S1/ Situation S5: Ist-Situation: Allgemeinbeleuchtung oder Allgemeinbeleuchtung in Kombination mit arbeitsplatzbezogener Beleuchtung	
Situation S2: Ist-Situation mit Flächenleuchte im Vorfeld/seitlich, Lichtfarbe: CCT = 8000 K, statisch, mittlere Leuchtdichte: L_{FL} = 1500 cd/m² (23 Fälle), L_{FL} = 1000 cd/m² (8 Fälle), L_{FL} = 750 cd/m² (10 Fälle)	
Situation S3: Ist-Situation mit Flächenleuchte im Vorfeld/seitlich mit dynamischer Lichtfarbenvariation von CCT = 8000 K bis CCT = 3000 K im Schichtverlauf, mittlere Leuchtdichte: L_{FL} = 1500 cd/m² (23 Fälle), L_{FL} = 1000 cd/m² (8 Fälle), L_{FL} = 750 cd/m² (10 Fälle)	
Situation S4: Ist-Situation mit veränderter Lichtfarbe höherer ähnlichster Farbtemperatur: CCT = 8000 K (Lampenwechsel in bestehende Beleuchtungsanlage)	

Tab. 1: Überblick über die untersuchten Beleuchtungssituationen

Situation	S1	S2	S3_1	S3_2	S4	S5
E_h in lx	1006 +/- 570	1118 +/- 551	1118 +/- 551	1041 +/- 561	1142 +/- 584	1090 +/- 475
E_v in lx	360 +/- 298	551 +/- 309	551 +/- 309	492 +/- 295	404 +/- 318	395 +/- 277
$E_{45°}$ in lx	129 +/- 71	218 +/- 88	218 +/- 88	205 +/- 90	152 +/- 76	137 +/- 60
Situation	**S1**	**S2**	**S3_1**	**S3_2**	**S4**	**S5**
CCT in K	4006 +/- 504	4207 +/- 507	4207 +/- 507	3898 +/- 438	6322 +/- 465	4002 +/- 494

Situation	S1	S2	S3_1	S3_2	S4	S5
E_{ms_h} in W/m²	0,76 +/- 0,48	0,86 +/- 0,43	0,86 +/- 0,43	0,71 +/- 0,44	1,37 +/- 0,77	0,82 +/- 0,42
E_{ms_v} in W/m²	0,26 +/- 0,22	0,53 +/- 0,27	0,53 +/- 0,27	0,30 +/- 0,21	0,49 +/- 0,41	0,28 +/- 0,20
$E_{ms_45°}$ in W/m²	0,09 +/- 0,05	0,19 +/- 0,10	0,19 +/- 0,10	0,12 +/- 0,06	0,16 +/- 0,09	0,09 +/- 0,04

$E_{ms_h}/E_{ms_h_S1}$	1,00	1,13	1,13	0,93	1,80	1,08
$E_{ms_v}/E_{ms_v_S1}$	1,00	2,04	2,04	1,15	1,88	1,08
$E_{ms_45°}/E_{ms_45°_S1}$	1,00	2,11	2,11	1,33	1,78	1,00

Tab. 2: Messdaten (Mittelwert +/- 1 Standardabweichung) für die einzelnen Situationen (S3_1: Schichtbeginn/ S3_2: Schichtende, bei veränderte Lichtfarbe während der Schicht in S3)

Fragebogen zur Person

- Geschlecht
- Alter
- Sehhilfe (Brille/Kontaktlinsen)
- Chronotyp

Allgemeine Angaben

- Schicht und Arbeitstage
- Aufenthalt im Freien
- Fragen zum Befinden

Fragebogen zum Schlafverhalten

- Schlafenszeit
- Ein- und Aufstehzeit
- Schlafdauer
- Einschlafprobleme
- Schlafunterbrechungen
- Frischegefühl am Morgen
- Schlafqualität
- Schlafmittelkonsum
- Besonderheiten

Fragebogen zur Beleuchtung

- Helligkeit
- Blendung
- Lichtfarbe
- Störempfinden
- Gefallen
- Einfluss auf Befinden

Abschlussfragebogen

- Bewertung der einzelnen Versuchsszenarien im Vergleich
- Einfluss der Beleuchtung auf Befinden und Schlaf
- Beleuchtungssituation mit größtem Wohlbefinden
- Wunschbeleuchtungssituation
- Anmerkungen

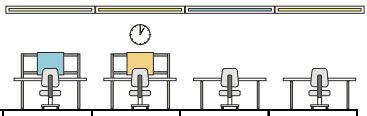
Tab. 3: Inhaltliche Schwerpunkte der Fragebögen

Die erhobenen 23968 Daten aus 749 Fragebögen wurden mittels der Statistiksoftware SPSS 19.0 analysiert. An der Abschlussbefragung beteiligten sich 36 Probanden.

Da durch einen längeren Aufenthalt in natürlichem Tageslicht zu vermuten ist, dass die Lichtwirkung wesentlich mit beeinflusst wird, wurde neben der Aufenthaltsdauer im Freien die Wettersituation an den Arbeitsorten mit Höchsttemperaturen, Sonnenstunden und Niederschlag erfasst und für eine Einschätzung der Wetterbedingungen für die Arbeitswochen und das Wochenende herangezogen.

4 Ergebnisse

Die statistische Auswertung der Fragebögen ist in Tab. 4 zusammenfassend dargestellt.



Variable	S2	S3	S4	S5
Gefallen	o	o	+	+
Förderung der Aufmerksamkeit	o	o	+	+
Aktivierung (Belebung)	+	o	+	+
Aktivierung (Aufmuntern)	o	o	+	o
ausreichende Helligkeit	o	o	+	(+)
heller Raumeindruck	+	+	+	+
Belästigung	-	(-)	o	o
Auffälligkeit	-	o	o	+
Aufdringlichkeit	-	o	o	o
Blendung	(-)	o	o	o
Gefallen der Lichtfarbe	o	o	o	o
störende Farbunterschiede	(-)	-	o	-
Variable	**S2**	**S3**	**S4**	**S5**
aktiv fühlen	(-)	+	o	+
Schwierigkeiten wach zu bleiben	(+)	+	+	+
fehlender Schwung	(+)	+	o	(+)
Variable	**S2**	**S3**	**S4**	**S5**
Bettgehzeit	früher	früher	o	früher
Einschlafdauer	(+)	o	o	o
Aufstehzeit	o	o	o	o
Schlafdauer	o	o	o	o
Einschlaf-probleme	o	(+)	+	+
Durchschlaf-probleme	o	o	o	o
Erholungseffekt	o	o	o	o
Schlafqualität	o	+	o	+
Schlafmittel	o	+	o	(+)

Legende:

Symbol	Signifikanzniveau
+	signifikant besser als S1 bewertet ($p \leq 0,05$)
(+)	im Trend besser als S1 bewertet ($0,05 < p < 0,1$)
o	kein Unterschied in der Bewertung zu S1 ($p > 0,1$)
(-)	im Trend schlechter als S1 bewertet ($0,05 < p < 0,1$)
-	signifikant schlechter als S1 bewertet ($p \leq 0,05$)
früher	signifikant früher als bei S1 ($p \leq 0,05$)

Tab. 4: Ergebnisse der Befragung - Vergleich zur Ausgangssituation S1

In Auswertung der wöchentlichen Fragebögen wird die Beleuchtung S4 im Arbeitsbereich, mit Lichtfarben hoher ähnlichster Farbtemperatur, von den Probanden positiv wahrgenommen. Im Vergleich zur Ausgangssituation geben die Probanden an, dass ihnen die Beleuchtung besser gefällt und sie diese als heller empfinden. Situation S4 fördert stärker die Aufmerksamkeit, belebt und muntert stärker auf als Situation S1. Störende Effekte werden nicht genannt. Die Flächenleuchten im Vorfeld (S2, S3) fördern einen hellen Raumeindruck. Beim Einsatz von Flächenleuchten mit hohen ähnlichsten Farbtemperaturen wird

eine Aktivierung wahrgenommen. Flächenleuchten im Vorfeld werden jedoch zum Teil störend empfunden und können Blendung verursachen. Dies wird besonders bei Flächenleuchten mit kalter Lichtfarbe angegeben (S2). Problematisch sind in diesem Zusammenhang Kombinationen unterschiedlicher Lichtfarben innerhalb eines Arbeitsbereiches. Von den Probanden wurden zum Teil störende Farbunterschiede genannt. Während der unterschiedlichen Beleuchtungssituationen fühlten sich die Probanden mehrheitlich aktiver und weniger müde als in der Ausgangssituation S1. Weiterhin zeigen sich im Vergleich zur Ausgangssituation S1 zum Teil positive Effekte auf den Schlaf bezüglich der Einschlafproblematik und der Schlafqualität.

Für den Vergleich statischer und dynamischer Beleuchtung wurden die Situationen S2 (zusätzliche Flächenleuchte im Vorfeld mit einer Lichtfarbe von statisch 8000 K) und S3 (zusätzliche Flächenleuchte im Vorfeld bei der sich die Lichtfarbe vom Schichtbeginn zum Schichtende von 8000 K zu 3000 K kontinuierlich ändert) betrachtet. Bei dynamischer Beleuchtung wurden eine signifikant höhere Aktivierung und eine bessere Schlafqualität angegeben. Im Vergleich zur statischen Vorfeldbeleuchtung (S2) war die dynamische Beleuchtung (S3) weniger störend und blendend.

Bezüglich des Alters wurde die Probandengruppe in Jüngere (< 45 Jahre) und Ältere (≥ 45 Jahre) eingeteilt. Der Vergleich beider Gruppen zeigte zwar signifikante Unterschiede, jedoch dürften diese eher mit sozialen Faktoren zu tun haben. Die unterschiedlichen Beleuchtungssituationen üben nur einen geringen Einfluss aus und es konnte kein signifikanter Alterseinfluss bezüglich der Beleuchtung nachgewiesen werden. Von den unterschiedlichen Beleuchtungsszenarien profitierten eher die jüngeren Probanden.

Bei der Abschlussbefragung gaben 6 (17%) von 36 Befragten an, dass sie bewusst einen Einfluss der Lichtqualität auf ihr Wohlbefinden, ihre Aktiviertheit und ihre Schlafqualität während der verschiedenen Beleuchtungssituationen wahrgenommen haben. Auf die Frage, unter welcher der erlebten Lichtsituationen sich die Probanden am wohlsten gefühlt haben, wurde die Versuchssituation S4 (Lampen mit hoher Farbtemperatur) am häufigsten (20 Nennungen) und die Ausgangssituation S1 oft (11 Nennungen) genannt. Die Lichtsituation S4 würden die Probanden auch für ihre Arbeitssituation bevorzugen (20 Nennungen) oder die Ausgangssituation beibehalten (10 Nennungen). Weniger Akzeptanz fanden die zusätzlichen Flächenleuchten (jeweils <=4 Nennungen).

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In der Untersuchung zeigten sich z.T. positive Effekte durch die unterschiedlichen Beleuchtungsszenarien am Tage auf Wohlbefinden, Schlafqualität und Akzeptanz. Die erwarteten altersabhängigen Lichtbedürfnisse konnten mit der Studie nicht nachgewiesen werden. Die untersuchten Beleuchtungsszenarien wurden mehrheitlich von den Probanden akzeptiert. Probleme gab es dort, wo Blendung oder Reflexe die Sehaufgabe stören, zu unterschiedliche Lichtfarben in einem Arbeitsbereich kombiniert werden oder die Integration der Flächenleuchte am Arbeitsplatz schwierig ist. Unter realen Bedingungen sind Flächenleuchten mit Leuchtdichten von L_{FL} = 1500 cd/m² unter Umständen zu hell und können subjektiv als störend oder blendend empfunden werden. Dies wurde besonders bei Flächenleuchten mit Lichtfarben mit hoher ähnlichster Lichtfarbe beobachtet. Die in der Voruntersuchung bestimmte Toleranzleuchtdichte von Flächenleuchten im Vorfeld von L_{FL} = 2000 cd/m² ist in realen Situationen offensichtlich zu hoch. Hier ist besonders der Einfluss des unmittelbaren Umfeldes des Arbeitsplatzes zu betrachten, da in Fensternähe deutlich größere Leuchtdichten aus Fensterbereichen problemlos akzeptiert werden.

Problematisch bei der Interpretation der Ergebnisse der Studie ist, dass positive Wirkungen auch bei der Zweitbefragung der Ausgangssituation während der Situation S5 von den Probanden wahrgenommen wurden, obwohl mehrheitlich identische Beleuchtungsverhält-

nisse an den Arbeitsplätzen im Vergleich zur Situation S1 vorlagen. Möglicherweise zeigen sich hier Einflüsse durch die Feldstudie selbst (Hawthorne-Effekt) oder durch den Befragungszeitpunkt im Herbst und Frühjahr. Damit ist es schwierig, aus den Ergebnissen der Studie konkrete Vorgaben abzuleiten. Zur Klärung sind weiter Untersuchungen erforderlich. Die Untersuchungsergebnisse sprechen jedoch nicht gegen einen Einsatz von Lampen mit hoher ähnlichster Farbtemperatur an Arbeitsplätzen. Sie können positive Auswirkungen auf Befinden und Schlafqualität haben. Zusätzliche hell leuchtende Flächen im Vorfeld sind nur bedingt zu empfehlen. Zu große Unterschiede in der Helligkeit und in der Lichtfarbe sollten vermieden werden.

Danksagung

Das Projekt wurde von der Berufsgenossenschaft Holz und Metall initiiert, finanziert und begleitet. Die Firmen Osram, Philips, Siteco, Trilux und Tridonic unterstützten die Realisierung der Beleuchtungssituationen. Ein besonderer Dank gilt den Unternehmen Ford-Werke GmbH in Köln, H. Heinz Messwiderstände GmbH in Elgersburg, IL Metronic Sensortechnik GmbH in Ilmenau, MEG Mechanik GmbH in Gießübel und Thyssen-Krupp Steel AG in Duisburg, die die Durchführung des Feldexperiments in ihren Abteilungen ermöglichten und den 41 Probanden, die sich an der Untersuchung beteiligten.

Literatur

/1/ DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Über das Auge vermittelte, nichtvisuelle Wirkung des Lichts auf den Menschen - Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren. DIN V5031 Teil 100, Berlin: Beuth Verlag, Juni 2009.

/2/ BRAINARD GC, HANIFIN JP, GREESON JM, BYRNE B, GLICKMAN G, GERNER E, ROLLAG MD: *Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor*. Journal of Neuroscience 2001; 21 (16): 6405-6412.

/3/ THAPAN K, ARENDT J, SKENE DJ: An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. Journal of Physiology 2001; 535 (1): 261-267.

/4/ DACEY DM ET ALL: Melanopsin-expressing ganglion cells in primate retina signal colour and irradiance and project to the LGN. Letters to nature 2005; **433** (2): 749-754.

/5/ LERMAN S: *Radiant Energy and the eye.* Macmillan Publishing Co. Inc. New York: 1980, Fig. 3.1

/6/ SCHIERZ C: *Lighting for the elderly: physiological basics and their consequences.* In: Tagungsband-LUX EUROPA 2009. Istanbul: 2009, 147-154

/7/ GRONFIER C, WRIGHT KP, KRONAUER RE, JEWETT ME, CZEISLER CA: *Efficacy of a single sequence of intermittent bright light pulses for delaying circadian phase in humans.* American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism 2004; **287** (1): E174-E181.

/8/ BAEHR EK, FOGG LF, EASTMAN CI: *Intermittent bright light and exercise to entrain human circadian rhythms to night work.* American Journal of Physiology-Regulatory Integrative and Comparative Physiology 1999; **277** (6): R1598-R1604.

/9/ RIMMER DW, BOIVIN DB, SHANAHAN TL, KRONAUER RE, DUFFY JF, CZEISLER CA: *Dynamic resetting of the human circadian pacemaker by intermittent bright light.* American Journal of Physiology-Regulatory Integrative and Comparative Physiology 2000; **279** (5): R1574-R1579.

Beleuchtungssanierung mit innovativen Tageslicht-systemen im Baudenkmal

Roman A. Jakobiak [3], Uwe Meinhold [1, 2], Sebastian Hermsdorf [1, 2]

[1] TU-Dresden, Fakultät Architektur, Institut für Bauklimatik, 01062 Dresden
[2] Ingenieurbüro Bauklimatik, Glasewaldtstr. 44, 01277 Dresden, info@ig-bauklimatik.de
[3] daylighting.de UG, Helmholtzstraße 13-14, 10587 Berlin, office@daylighting.de

Abb. 1: Ansicht der Olbersdorfer Schule, rechterhand die Turnhalle

Abstract

Das 1928 von dem Architekten Prof. Herrmann Wilhelm Jost errichtete, heute denkmalgeschützte Gebäude der Friedrich-Fröbel-Förderschule in Olbersdorf war gesamtenergetisch auf das Niveau einer "3-Liter-Schule" zu sanieren. Dabei galt es, die im Bestand teilweise nicht den Anforderungen genügende Tageslichtbeleuchtung zu verbessern. Die künstliche Beleuchtung wurde komplett erneuert. Um den Energiebedarf der Schule zu optimieren, waren Tageslichtsysteme und künstliche Beleuchtung in einem integrativen Ansatz zu regeln.

1. Konstruktive Optimierung der Fenstergröße und Lichtlenkjalousie in den Regelklassenräumen

Der Regelklassenraum in der Olbersdorfer Schule wird bei einer Tiefe von 6 m über drei Kastenfenster seitlich mit Tageslicht beleuchtet. Tab. 1 zeigt Kenngrößen des Fensters im Regelklassenraum im Bestand und nach der Sanierung. Der Rohbau-Fensterflächenanteil an der Grundfläche von 17% ist für einen Klassenraumes vergleichsweise gering. Die in Tab. 2 dargestellten Tageslichtquotienten belegen, dass der Klassenraum bereits im Bestand ein geringes Tagelichtniveau hat, so dass eine Aufgabe der Sanierung darin bestand, die thermische Sanierung der Wand und des Fensters in Hinblick auf die Transparenz des Fenstersystems zu optimieren.

Ein zentraler Ansatz des Energiekonzeptes für die Olbersdorfer Schule bestand darin, die alten Kastenfenster durch neue Zuluft-Kastenfenster mit Wärmedämmverglasung zu ersetzen. In einer Musterachse wurde ein neues Zuluft-Kastenfenster in das bestehende Betongewände eingesetzt. Der im Vergleich zum Bestand im Musterfenster geringere Glasflächenanteil führte zu der Entscheidung, einen Teil des Betongewändes

abzuschlagen, um so durch eine Vergrößerung der Rohbauöffnung einer Verkleinerung der Glasfläche durch die neue Rahmenkonstruktion entgegenzuwirken.

Drei Fensterachsen wurden mit verschiedenen Tageslichtsystemen ausgestattet und bewertet. Die Kombination einer elektrochromen Verglasung in den unteren Fensterflügeln mit einer lichtlenkend ausgestatteten Verglasung in den oberen Fensterflügeln schied aufgrund der dann zu geringen Lichttransmission des Fensters aus.

Um den Lichttransmissionsgrad zu maximieren, wurde für die äußeren Fensterflügel eine Einfachverglasung aus Weißglas gewählt, während die inneren Fensterflügel eine Wärmedämmverglasung aus Floatglas erhielten. Aufgrund der höheren Kosten findet Weißglas im Schulbau ansonsten keine Anwendung. Aus denkmalpflegerischen Gründen kam ein außenliegendes Sonnenschutzsystem nicht in Betracht. Gewählt wurde ein mit weißen lichtlenkenden Lamellen ausgestatteter Raffstore im Zwischenraum des Kastenfensters.

	Bestand	nach Sanierung
Raumgrundfläche	50,76 m²	50,76 m²
Rohbaufenstergröße	8,70 m²	8,70 m²
Rohbau-Fensterfläche / Grundfläche	17%	17%
Minderungsfaktor des Rahmens	0,60	0,55
Glasfläche	5,24 m²	4,79 m²
Glasfläche / Grundfläche	10%	9%
Lichttransmissionsgrad der Verglasung	0,84	0,76

Tab. 1: Kenngrößen der Fenster im Regelklassenraum im Bestand und nach der Sanierung.

	Bestand	nach Sanierung
Raummitte	1,3%	1,4%
Referenzpunkt links (halbe Raumtiefe, 1 m Abstand von linker Seitenwand)	1,1%	0,9%
Referenzpunkt rechts (halbe Raumtiefe, 1 m Abstand von rechter Seitenwand)	0,9%	0,8%

Tab. 2: Messung des Tageslichtquotienten im Regelklassenraum im Bestand und nach Sanierung

Ein innovativer Ansatz wurde für das Kontrollsystem gewählt. Das Kontrollsystem bezieht sich sowohl auf die Tageslichtsysteme als auch auf die künstliche Beleuchtung. Wird das Kontrollsystem über einen Raumtaster manuell aktiviert, so stellt es den Sollwert der Beleuchtungsstärke sicher, indem die Transparenz des Fenstersystems erhöht und ggf. tageslichtabhängig künstlich erzeugtes Licht hinzu geregelt wird. Dabei stehen dem Lehrer über ein mit Schlüsselschalter gesichertes Tableau zusätzliche Optionen zur Verfügung. So kann er den Sollwert herauf- oder herunter stellen und die Lamellenraffstores individuell einstellen. Ist der Sonnenschutz vorgezogen, geht bei Präsenz der Lamellenwinkel in Lichtlenkstellung. Das Zuluft-Kastenfenster sorgt in Verbindung mit einer mechanischen Abluftanlage in geschlossenem Zustand für ein gutes Raumklima, kann jedoch auch geöffnet werden. Das Öffnen eines Fensters führt direkt zum Herauffahren des betreffenden Lamellenbehangs, damit die Behänge nicht beschädigt und dem Zugriff der Schüler entzogen werden. Die Tafelbeleuchtung kann manuell ein- und ausgeschaltet werden. Ist der Raum ohne Präsenz wird das künstliche Licht automatisch

ausgeschaltet und im Sommer gehen die Raffstoren in Sonnenschutzstellung, während sie im Winter zur Verminderung des Heizenergiebedarfs eine solare Einstrahlung zulassen.

Abb. 2: Tafelwand Regelklassenraum

Abb. 3: Fensterwand Regelklassenraum

Die zur Steigerung der Lichttransmission für den äußeren Flügel gewählte Einfachverglasung hatte in Verbindung mit der inneren Wärmedämmverglasung im Winter das Entstehen von Eisblumen auf der Innenseite des Außenflügels zur Folge. Mit einer Zweifachverglasung auch des äußeren Flügels könnte dem Entstehen von Eisblumen und Tauwasser entgegengewirkt werden, jedoch würde die Transparenz des Fenstersystems weiter gemindert.

Wie Tab. 1 und Tab. 2 zeigen, führte der nach Sanierung etwas höhere Rahmenanteil des Fensters, der durch die Luftdurchlässe des Abluft-Kastenfensters noch erhöht wird, und der geringere Lichttransmissionsgrad der Verglasung zu einem Absinken des Tageslichtquotienten an den Referenzpunkten in halber Raumtiefe und in 1 m Seitenwandabstand. Die geringfügige Vergrößerung der Rohbau- Fensteröffnung konnte lediglich eine weitergehende Verminderung der Glasfläche verhindern, führte jedoch nicht zur Kompensation der durch die wärmetechnische Sanierung bedingten Verminderung des Lichttransmissionsgrades des Fenstersystems.

Der gemessene jährliche Energieverbrauch der Beleuchtung liegt im Regelklassenraum trotz des geringen Tageslichtniveaus mit 2,7 kWh/(m²a) unter dem Verbrauch vergleichbarer Objekte. Der geringe Energieverbrauch ist der Optimierung der installierten Leistung der künstlichen Beleuchtung und dem Kontrollsystem zuzuschreiben.

1.1. Elektrochrome Verglasung und neue Dachoberlichter für die Klassenräume im Dachgeschoss

Die Klassenräume erhielten im Bestand ausschließlich durch die nach Osten orientierten Dachgaubenfenster Tageslicht. Aufgrund ihrer Raumtiefe von 9 m und der geringen Fensterfläche von lediglich 8 m² bzw. einem auf die Grundfläche bezogenem Fensterflächenanteil von 11% konnten sie die Anforderungen eines Unterrichtsraumes an die Tagesichtversorgung so nicht erfüllen. Tab. 4 zeigt die Ergebnisse einer orientierenden Messung des Tageslichtquotienten im Bestand. Die rechnerisch ermittelten Werte lagen unter den dargestellten Messwerten.

Abb. 5 gibt einen Eindruck von der düsteren Wirkung der Dachgeschossräume, die sie für eine Nutzung als Lehrräume ungeeignet erscheinen lassen. Zusätzlich sind die süd – östlich ausgerichteten Räume insbesondere im Dachgeschoss stark durch hohe sommerliche Raumtemperaturen gefährdet.

Zur Ertüchtigung der Räume war vor allem eine Tageslichtversorgung in der Tiefe des Raumes zu schaffen. Diese konnte durch den Einbau von Dachoberlichtern, die über Lichtschächte und eine Tageslichtdecke an den Raum angeschlossen sind, realisiert werden. Eine geringe Vergrößerung der Dachgaubenfenster konnte ebenfalls mit der Denkmalpflege abgestimmt und konstruktiv umgesetzt werden, siehe hierzu Abb. 4.

Wie in den Regelklassenräumen war auch im Dachgeschoss ein außen liegender beweglicher Sonnenschutz mit der denkmalpflegerischen Zielstellung nicht vereinbar. Als Sonnen- und Blendschutz kommt hier eine elektrochrome Verglasung in dem äußeren Fenster des Kastenfensters zum Einsatz. Zwischen den äußeren und inneren Fenstern ist zusätzlich ein beweglicher Lamellenraffstore installiert.

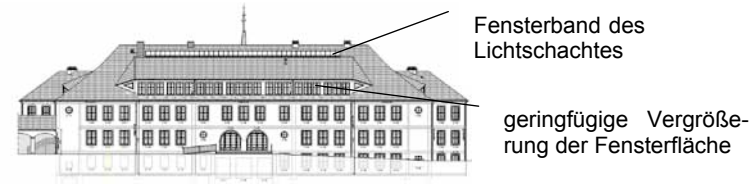


Abb. 4: Hofansicht von Nordosten (Quelle: AIZ - Architektur- und Ingenieurbüro für Hoch- und Tiefbau Zittau GmbH)

	Bestand	nach Sanierung
Raumgrundfläche	75 m²	75 m²
Rohbaufenstergröße	8,03 m²	17,32 m²
Rohbau-Fensterfläche / Grundfläche	11%	23%
Glasfläche	5,08 m²	11,09 m²
Glasfläche / Grundfläche	7%	15%

Tab. 3: Kenngrößen der Fenster im Klassenraum im Dachgeschoss im Bestand und nach der Sanierung. Die Fläche des Dachoberlichtes und der Fenster wurden zusammen gefasst.

	Bestand	nach Sanierung
Mittelachse, Fensterabstand 2,26 m	2,5%	1,2%
Raummitte	1,3%	1,1%
Mittelachse, Fensterabstand 6,77 m	0,6%	1,7%

Tab. 4: Messung des Tageslichtquotienten im Klassenraum im Dach im Bestand (Orientierungsmessung) und nach Sanierung.

Der aufgrund des vergleichsweise geringen Lichttransmissionsgrades der elektrochromen Verglasung reduzierte Tageslichteinfall über die Südostfassade kann durch die neue Tageslichtdecke kompensiert werden. Somit wurde eine Lösung umgesetzt, die den Raum ausreichend mit Tageslicht versorgt und baukonstruktiv einer sommerlichen Überwärmung entgegenwirkt. Abb. 6 gibt einen Eindruck von dem sanierten Klassenraum mit neuem

Dachoberlicht. Abb. 6 zeigt auch, dass die Fensterfläche des Klassenraums im Betrieb zur Präsentation von Bastelarbeiten genutzt wird. Bastelarbeiten und Zimmerpflanzen im Fenster führen in Grundschulen häufig zu einer Minderung des Tageslichtniveaus.

Abb. 5: Klassenraum im Dachgeschoss vor Sanierung.

Abb. 6: Klassenraum 407 im Dachgeschoss mit neuem Oberlicht.

Die Steuerung der Einfärbung der elektrochromen Verglasung erfolgt in Abhängigkeit der solaren Einstrahlung auf die Fassade sowie der Nutzung des Raumes. Im Winter wird die elektrochrome Verglasung nicht aktiviert, da die Solarstrahlung dann erwünscht ist, um Heizenergie zu sparen. Wird im Sommer Solarstrahlung auf der Fassade detektiert, fährt die elektrochrome Verglasung in Stufe 5 (τ_{D65} = 15%, g-Wert = 12%, R_a = 61), um maximalen Sonnenschutz zu gewährleisten. Da die elektrochrome Verglasung die Farbwiedergabe beeinträchtigt, wird sie im Falle der Nutzung des Raumes auf Stufe 3 (τ_{D65} = 30%, g-Wert = 21%, R_a = 77) zurückgefahren. Insofern der Sollwert der Beleuchtungsstärke nach Aktivierung des Raumtasters nicht erreicht wird, wird die elektrochrome Verglasung in Stufe 1 gebracht (τ_{D65} = 49%, g-Wert = 36 %, R_a = 93). Mit zunehmendem Durchlassgrad der Verglasung wird die künstliche Beleuchtung gedimmt und ggf. wieder ausgeschaltet.

Die künstliche Beleuchtung und die Steuerung entspricht ansonsten derjenigen in den Regelklassenräumen. Um die Beleuchtungssituation an besondere Erfordernisse anzupassen, können die vorgegebenen Regelstrategien aus dem Raum heraus manuell übersteuert werden. In Klassenraum 407, der dieser Beschreibung zugrunde liegt, betrug der gemessene Energieverbrauch der Beleuchtung im ersten Betriebsjahr 1,7 kWh/(m²a), in dem ebenfalls im Dachgeschoss gelegenen Klassenraum 405 wurde ein Verbrauch von 2,4 kWh/(m²a) gemessen.

1.2. Anhebung des Tageslichtniveau durch neue Tageslichtdecke in der Turnhalle

Die Turnhalle der Olbersdorfer Schule wurde 1928 als Mauerwerksbau mit einem vergleichsweise geringen Fensterflächenanteil von 11% bezogen auf die Grundfläche des Sportfeldes errichtet. Mit einem Tageslichtquotienten von 0,7% in Raummitte war das Tageslichtniveau im Bestand unbefriedigend. Abb. 7 zeigt die Turnhalle vor Sanierung.

Abb. 7: Turnhalle im Bestand

Abb. 8: Fenster neu

Abb. 9: Fenster alt

Aufgrund des Denkmalschutzes kam eine Veränderung der Fassaden nicht in Betracht. Die Fenster in den vertikalen Fassaden konnten somit nicht vergrößert werden. Der Lösungsvorschlag, eine Tageslichtdecke in die Sporthalle einzubauen, die über ein Dachoberlicht und einen Lichtschacht Tageslicht erhält, war mit der Maßgabe, dass ein neues Oberlicht nur in die hofseitige Dachfläche integriert werden darf, auch für den Denkmalschutz zustimmungsfähig.

Um ein kostengünstiges und im Betrieb robustes System zu errichten, wurde auf jegliche bewegliche Teile verzichtet. Die Aufgabe des Blendschutzes wird durch die Form des Oberlichtschachtes und die Wahl eines diffusen Aluminiumreflektors sowie einer lichtstreuenden Verglasung der Tageslichtdecke gelöst. Abb. 10 zeigt den Innenraum der Turnhalle mit der neuen Tageslichtdecke, Abb. 11 zeigt den Oberlichtraum im Dach. Die Überlegung, auch die künstliche Beleuchtung in den Lichtschacht zu integrieren, wurde verworfen, da sich aufgrund des hohen Rahmenanteils der Tageslichtdecke und der Verglasung der Tageslichtdecke ein aus energetischer Sicht zu geringer Wirkungsgrad der künstlichen Beleuchtungsanlage ergab. Die in Abb. 11 abgebildeten Strahler stellen lediglich eine zusätzliche dekorative Beleuchtung für Veranstaltungen dar.

	Bestand	nach Sanierung
Raumgrundfläche	350 m²	350 m²
Rohbaufenstergröße	39,3 m³	80,2 m²
Rohbau-Fensterfläche / Grundfläche	11%	23%
Glasfläche	21,17 m²	58,02 m²
Glasfläche / Grundfläche	6%	17%

Tab. 5: Kenngrößen der Fenster und des Oberlichtes in der Turnhalle im Bestand und nach Sanierung.

	Bestand	nach Sanierung

Mittelachse, Fensterbereich	1,0%	2,7%
Raummitte	0,7%	3,1%
Mittelachse, Gangbereich	0,3%	2,0%

Tab. 6: Messung des Tageslichtquotienten in der Turnhalle im Bestand und nach Sanierung

Abb. 10: Innenansicht Turnhalle mit neuer Tageslichtdecke

Abb. 11: Oberlichtraum mit Lichteintrittsöffnung, Reflektor und Diffusor im Dach

Wie Tab. 5 zeigt, führte das neue Oberlicht zu einer Verdoppelung der Rohbaufensterfläche und aufgrund des geringen Rahmenanteils der Dachverglasung sogar annähernd zu einer Verdreifachung der Glasfläche. Die zusätzliche Tageslichtöffnung ist hier für den Sanierungserfolg entscheidend. Wie Abb. 8 und Abb. 9 anhand der Fenster auf der Empore der Turnhalle veranschaulichen, führt der Einbau neuer Fenster im Rahmen einer Wärmedämmmaßnahme in der Regel zu einer Verkleinerung der Glasfläche. Im konkreten Fall hatten die neuen Emporenfenster nur 68% der Glasfläche der Bestandsfenster. Wie Tab. 6 zeigt, konnte der Tageslichtquotient in Raummitte durch das neue Oberlicht dennoch von 0,7% auf 3,1% angehoben werden. In Rahmen des Vereinssports wird in der Halle das lichttechnisch vergleichsweise anspruchsvolle Tischtennis gespielt. Von den Tischtennisspielern kamen positive Rückmeldungen zur Tageslichtbeleuchtung.

2. Fazit

In den drei hier betrachteten Raumtypen der Olbersdorfer Schule, den Regelklassenräumen, den Klassenräumen im Dachgeschoss und der Turnhalle, war das Tageslichtniveau im Bestand aufgrund des geringen Fensterflächenanteils und bei den Klassenräumen im Dach zusätzlich aufgrund der großen Raumtiefe, gering. Da die wärmetechnische Sanierung der Wand und der Kastenfenster mit einer konstruktiv bedingten Verkleinerung der Glasfläche einhergeht, und zudem die statt der alten Einfachverglasung neu im Kastenfenster eingesetzten Wärmedämmgläser einen geringeren Lichttransmissionsgrad aufweisen, wird die Lichtdurchlässigkeit der Kastenfenster durch die wärmetechnische Sanierung gemindert. In der Turnhalle und in den Klassenräumen im Dach konnte das Tageslichtniveau durch die Integration neuer

Dachoberlichter trotz der geringeren Transparenz der Fenstersysteme angehoben werden. Bei den Regelklassenräumen bestand die Option der Schaffung neuer Tageslichtöffnungen nicht. Hier wurde die Rohbauöffnung durch Abschlagen eines Teils des Fenstergewändes geringfügig vergrößert und die äußere Verglasung des Kastenfensters wurde als Einfachverglasung aus Weißglas und nicht als Wärmedämmverglasung ausgeführt. Aufgrund dieser Maßnahmen fiel die Minderung des Taglichtniveaus im Regelklassenraum geringer aus als bei einer herkömmlichen Sanierung. Aufgrund des integrativen Ansatzes des Kontrollsystems, das Tageslichtsysteme und die künstliche Beleuchtung gesamtenergetisch regelt und aufgrund der geringen installierten Leistung der künstlichen Beleuchtung betrug der gemessene Energieverbrauch der Beleuchtung sowohl in den Regelklassenräumen als auch in den Klassenräumen im Dach weniger als drei Kilowattstunden je Quadratmeter und Jahr. Damit war die Sanierung der Beleuchtung nicht nur gestalterisch überzeugend sondern auch energetisch erfolgreich.

Projektbeteiligte und Projektförderung

Bauherr	Landkreis Görlitz
Forschungsprojekt, Gesamtleitung	HS Zittau/Görlitz, Fakultät Bauwesen, Lehrgebiet Bauklimatik, Prof. Dr. Jens Bolsius
Forschungsprojekt, Unterauftrag Beleuchtung	TU-Dresden, Fakultät Architektur, Institut für Bauklimatik
Projektbegleitung	Projektträger Jülich
Architekt	AIZ - Architektur- und Ingenieurbüro für Hoch- und Tiefbau Zittau GmbH
Elektroplanung	ILM - Ickrath Land Messner, Ingenieurbüro für Elektroenergieanlagen

Tab. 7: Projektbeteiligte

Das diesem Beitrag zugrundeliegende Forschungsprojekt wurde aufgrund eines Beschlusses des Bundestages mit Mitteln des Bundeswirtschaftsministeriums gefördert. Förderkennzeichen des BMWi: 0327430C.

Fotonachweis: Abb. 1, Abb. 2, Abb. 3, Abb. 6, Abb. 7, Abb. 8, Abb. 9, Abb. 10, Abb. 11 Copyright: Roman Jakobiak; Abb. 5 Copyright: Uwe Meinhold.

LED-Netzwerk Schwarzwald – Einführung von LEDs in der kommunalen Straßen- und Innenbeleuchtung

Prof. Dr. Paola Belloni, B.Sc. Nina Heinig,
Hochschule Furtwangen University, Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen,
Robert-Gerwig-Platz 1, 78120 Furtwangen

1. Einleitung und Problemstellung

Das „LED-Netzwerk Schwarzwald“ ist ein Verbundprojekt der vier Kommunen Königsfeld, Mönchweiler, St. Georgen, Villingen-Schwenningen und deren Industriepartnern und gehört zu den Gewinnern des Wettbewerbs „Kommunen in neuem Licht“ im Jahr 2010, der vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) ausgeschrieben wurde.
In dem vom BMBF geförderten Projekt wird die bestehende Straßenbeleuchtung durch Einsatz von LED-Modulen sinnvoll auf LED-Beleuchtung umgerüstet.

Für viele Kommunen sind die enormen Investitionskosten für eine solche Umrüstung kaum allein zu stemmen. Hinzu kommt, dass es zum langfristigen Einsatz von LED-Leuchten in der Straßenbeleuchtung keine Test- oder Erfahrungsberichte gibt, die das Verhalten der LED-Leuchten unter realen Wetter- und Umweltbedingung zeigen.
Weil mit den Fördergeldern nicht die komplette Straßenbeleuchtung von vier Kommunen neu geplant und mit LED-Lösungen bestückt werden konnte, entschied man sich dafür einige wichtige und repräsentative Straßen und Plätze auszuwählen. Zu berücksichtigen war auch, dass die Umrüstung auf Basis der vorhandenen Leuchten-Masten und deren Anordnung stattfinden sollte, was strenge Rahmenbedingungen für die Lichtplanung mit sich brachte.
Die Herausforderung bestand also darin bei minimalen Kosten und Beibehalten der Mastabstände sowie der Lichtpunkthöhen ein normkonformes und energiesparendes Beleuchtungsergebnis zu erzielen.

2. Zielsetzung

Ziel dieses Projektes ist es, in den vier Kommunen ein breites und systematisiertes LED-Beleuchtungskonzept umzusetzen, mit dem nachhaltige Energieeinsparungen erreicht werden.
Hauptziel der wissenschaftlichen Begleitung des Projektes ist, die alte herkömmliche Beleuchtung mit den neuen LED-Lösungen zu vergleichen und zu bewerten. Insbesondere wird die Fragestellung untersucht, ob das weiße Licht einer LED-Leuchte bezüglich der Wahrnehmung der Lichtfarbe, der Farbwiedergabe und der Detektierbarkeit von Objekten besser ist, als die bisherigen Lichtquellen wie Quecksilberdampfhochdrucklampen und Natriumdampfhochdrucklampen.
Um die alte mit der neuen Beleuchtungsanlage vergleichen zu können, werden lichttechnische Messungen sowohl vor als auch nach der Umrüstung in allen vier Kommunen durchgeführt.
Es werden unterschiedliche räumliche, verkehrstechnische und architektonische Situationen ausgesucht, welche typisch für die Kommunen sind und einen hohen Demonstrations- und Übertragbarkeitswert als Beleuchtungsmodelle haben.

Definierte Beleuchtungsmodelle:

- Modell 1: Historischer Ortskern

- Modell 2: Repräsentativer Straßenraum
- Modell 3: Wohngebiet
- Modell 4: Sammelstraße
- Modell 5: Durchfahrtstraße
- Modell 6: Wegebeleuchtung
- Modell 7: Inszenierung
- Modell 8: Innenbeleuchtung
- Modell 9: Sensor-LED, intelligente Lichtstrecke

Parallel zu den lichttechnischen Messungen findet eine umfassende Bürgerbefragung statt, um die Akzeptanz der neuen LED-Beleuchtung in der Bevölkerung zu dokumentieren. Hierzu geben Anwohner, Passanten, Touristen und anliegende Gewerbebetreibende ihre Meinung in einem Fragebogen ab.
Um möglichst viele Bürger zu erreichen, wurden drei Befragungsmethoden eingesetzt:

- Direkte Befragung: Passanten werden direkt auf der Straße angesprochen und zur aktuellen Beleuchtung (ob alt oder neu) befragt.
- Briefsendungen: zusammen mit einem kurzen Infobrief werden Fragebögen in Briefumschlägen in die Briefkästen der Anwohner geworfen. Die Rückgabe erfolgt meist an einer zentralen Stelle im Ort.
- Online-Umfrage: über die Online-Umfrage sollen vor allem junge Leute angesprochen werden. Mit Hilfe der Fragebogen-Software GrafStat kann ein Fragebogen erstellt und auf der Projekthomepage ausgefüllt werden.

Ziel der Befragung soll auch sein, die Bewohner der vier Kommunen über die LED-Beleuchtung zu informieren und evtl. verbreitete Vorurteile gegenüber der neuen Technologie zu beseitigen.
Eine fundierte, statistische Analyse der Ergebnisse und deren Veröffentlichung auf einer zielgruppengerechten Homepage sichert die nachhaltige Einbindung der Bevölkerung in den gewünschten Rückkopplungsprozess.

3. Was ist innovative / „best practice“ an der Lösung?

Das innovative an dieser Lösung ist zum einen die Substitution der Leuchtmittel, d.h. das Beibehalten der alten Leuchtenmasten – und damit der Mastabstände – und das Ersetzen der alten Leuchtmittel durch modulare LED-Systeme.
Das modulare Konzept erspart Kosten, die bei einem kompletten Umbau entstehen würden und kann schneller realisiert werden als eine neue Beleuchtungsanlage.
Die Modularisierung sichert die Lebensdauer des Leuchtensystems, da bei einem Defekt nur die LED-Module ausgetauscht werden müssen, anstatt den kompletten Leuchtenkopf zu warten. Die Leuchten sind außerdem so konzeptioniert, dass neu entwickelte Generationen von LED-Modulen ohne großen Aufwand eingesetzt werden können und sich flexibel an die verschiedensten Anforderungen der Beleuchtgungsmodelle anpassen lassen.

Aber auch die Vielfältigkeit in der Lösung ist innovativ. Durch die Auswahl von neun unterschiedlichen Beleuchtungsmodellen können neun verschiedene Lösungen, unter spezifischen Rahmenbedingungen gezeigt werden.
Ebenfalls neu und innovativ ist die Art der Befragung in Bezug auf Straßenbeleuchtung. Den Bewohnern der vier Kommunen werden nicht nur quantitative sondern auch qualitative Fragen nach sozialwissenschaftlichen Methoden gestellt. Eine solche

qualitative Befragung zur Straßen- und Bürobeleuchtung wurde bis dato noch nie durchgeführt.
Um auch die jüngere, mit Computer aufgewachsenen Generation zu erreichen, gibt es eine Online-Version des Fragebogens, die auf der Projekt-Homepage zu finden ist.
So wird ein Gesamteindruck der Bürger und ihrer Gedanken zur Straßenbeleuchtung im Allgemeinen gewonnen.

4. Realisierungsgrad

4.1 Lichttechnische Messungen

Um die geplanten Messungen der Alt- und Neuanlagen der Straßenbeleuchtung durchzuführen, wurden zunächst Messfelder definiert. Dabei sollten für jedes der neun Modelle mehrere Messfelder ausgewählt werden. Insgesamt wurden 16 Messfelder ausgewählt. Diese Messfelder sollten natürlich in einer der vier teilnehmenden Kommunen liegen und möglichst repräsentativ für diese Kommune sein. Vor der Messung der Altanlage wurden die Leuchten des ausgewählten Messfeldes jeweils gewartet und gereinigt, um zu verhindern, dass man die alte Beleuchtung im verschmutzten und alten Lampenzustand mit der neuen, sauberen LED-Beleuchtung vergleicht.
Die Messfelddefinition und die Messungen fanden dann nach den Vorgaben der DIN EN 13201 - Straßenbeleuchtung statt. Außerdem wurde von der Abteilung Lichttechnik der TU Darmstadt, welche alle Gewinner-Kommunen des BMBF-Wettbewerbs „Kommunen im neuen Licht“ betreut, eine Anleitung zur Durchführung der Messungen geschrieben.

Bei vorhandenem Streulicht wurden die lichttechnischen Messungen wiederholt, wobei die zu messenden Leuchten ausgeschaltet wurden. So konnte anschließend, das in der zweiten Messung gemessene Umgebungslicht von der ersten Messung (Leuchten + Umgebungslicht) abgezogen werden und man erhielt die „reinen“ Werte der zu untersuchenden Leuchten.
Die Messungen in der Außenbeleuchtung im Ausgangszustand wurden bereits im Herbst 2011 abgeschlossen. Nachdem alle Messfelder in allen Kommunen auf LED-Straßenleuchten der Firma Hess AG umgerüstet worden waren, konnte auch mit den Messungen der Neuanlagen begonnen werden.
In den folgenden Abbildungen sieht man die Beleuchtungsstärke in der Friedrichstraße in Königsfeld (Modell 2: Repräsentativer Straßenraum) sowie in der Hammerhalde in Villingen (Modell 4: Sammelstraße) vor und nach der Umrüstung auf LED in grafischer Darstellung.
Mit den lichttechnischen Messungen im Ausgangs- und im Endzustand sollte zum einen

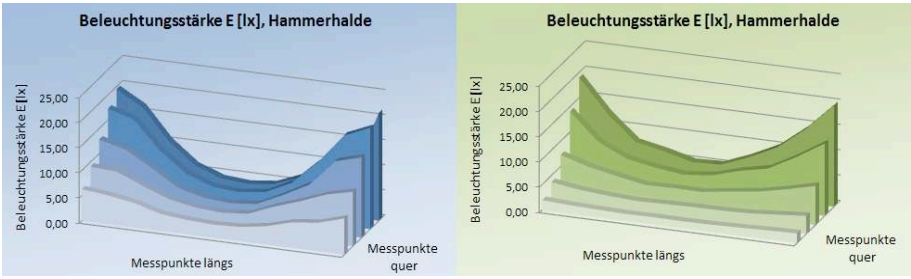


Abb. 1: Beleuchtungsstärke E [lx] in der Hammerhalde, Villingen vor (70W HSE, links) und nach der Umrüstung auf LED.

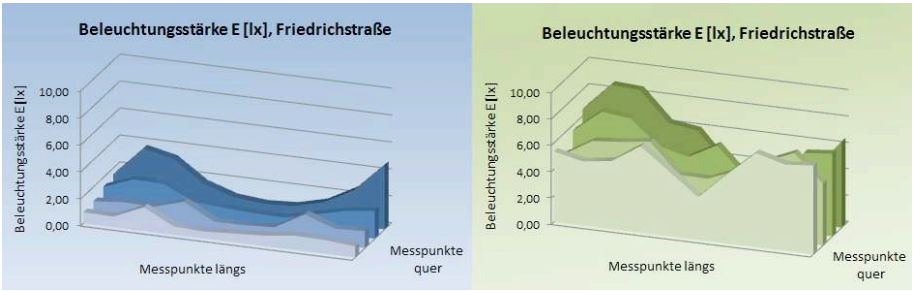


Abb. 2: Beleuchtungsstärke E [lx] in der Friedrichstraße, Königsfeld vor (80W HQL, links) und nach der Umrüstung auf LED.

ermittelt werden, ob die Beleuchtung normkonform ist und zum anderen festgestellt werden, wie viel Energie eingespart wird.

Modell	Messfeld	Ausgangs-zustand normkonform	Neuzustand normkonform	Energie-einsparung
Historischer Ortskern	Münsterplatz, Villingen	ja	ja	35%
	Rathausplatz, Königsfeld	nein	-	-
	Marktplatz, St. Georgen	ja	ja	0%
Repräsentativer Straßenraum	Obere Gerwigstraße, St. Georgen	nein	ja	35%
	Friedrichstraße, Königsfeld	nein	ja	74%
Wohngebiet	Bertha-v.-Suttner-Str., Schwenningen	ja	ja	41%
	Ginsterweg, Mönchweiler	nein	nein	40%
Sammelstraße	Hammerhalde, Villingen	ja	ja	42%
	Buchenbergerstraße, Königsfeld	nein	nein	74%
	Untere Gerwigstraße, St. Georgen	ja	ja	73%
Durchfahrtstraße	Luisenstraße, Königsfeld	nein	nein	68%
Wegebeleuchtung	Bickensteg, Villingen	-	ja	-
	Unterführung Untere Mühlenstraße, Mönchweiler	ja	ja	56%
Inszenierung	Bickentor, Villingen	-	-	-
Sensor-LED, intelligente Lichtstrecke	Sportplatzweg, Mönchweiler	-	-	-
	Fußweg zum Solara-Freibad, Königsfeld	-	-	-

Tab. 1: Normkonformität (nach DIN EN13201-2 „Straßenbeleuchtung – Teil 2: Gütermerkmale“) und Energieeinsparung

Zwei Messfelder müssen noch vermessen werden. Der Rathausplatz in Königsfeld wird derzeit nicht nur lichttechnisch, sondern auch architektonisch umgebaut und auf dem Sportplatzweg in Mönchweiler soll eine intelligente Lichtstrecke aus solarbetriebenen LED-Leuchten mit Bewegungsmeldern installiert werden. Beide Projekte sollen im Juni 2012 fertiggestellt und anschließend die lichttechnischen Messungen der LED-Leuchten abgeschlossen werden.
Beim Messfeld „Bickentor Villingen“ handelt es sich um architektonische Beleuchtung. Da es hier keine Normvorgaben für die Beleuchtungsstärke gibt, wurde die Leuchtdichte an bestimmten Messpunkten im Ausgangszustand dokumentiert. Die Umrüstung des Stadttores wird erst Ende 2012 stattfinden.
Die folgende Tabelle zeigt die Normkonformität der Messfelder vor und nach der Umrüstung auf LED, sowie die durch die Umrüstung erreichte prozentuale Energieeinsparung pro Messfeld.

Das einzige Innenbeleuchtungsprojekt ist die Bürobeleuchtung im Rathaus in St. Georgen. Hier wurde die alte, nicht arbeitsplatzbezogene Allgemeinbeleuchtung aus T8-Leuchtstoffröhren, flächendeckend durch mobile, energiesparende Arbeitsplatzbeleuchtung aus Steh- und Schreibtischleuchten der Firma Waldmann ersetzt.
Wie in der Straßenbeleuchtung wurden auch hier lichttechnische Messungen durchgeführt, wofür zwei exemplarische Büros – ein Einzel- und ein Doppelbüro – ausgewählt wurden. Die Messungen fanden nach den Vorgaben der DIN EN 12464-1 „Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätte in Innenräumen“ statt.
Die Messung der Beleuchtungsstärke in den Bereichen Sehaufgabe, Umgebung und Hintergrund (s. Abb. 3) sind für eine vollständige, lichttechnische Analyse der Arbeitsstätte erforderlich.
Abb. 4 zeigt als Beispiel die Messergebnisse für die Beleuchtungsstärke im Bereich der Sehaufgabe im Doppelbüro vor und nach der Umrüstung auf LED, sowie die sich daraus ergebende mittlere Beleuchtungsstärke $E_{m,}$ im Vergleich zum Normwert.

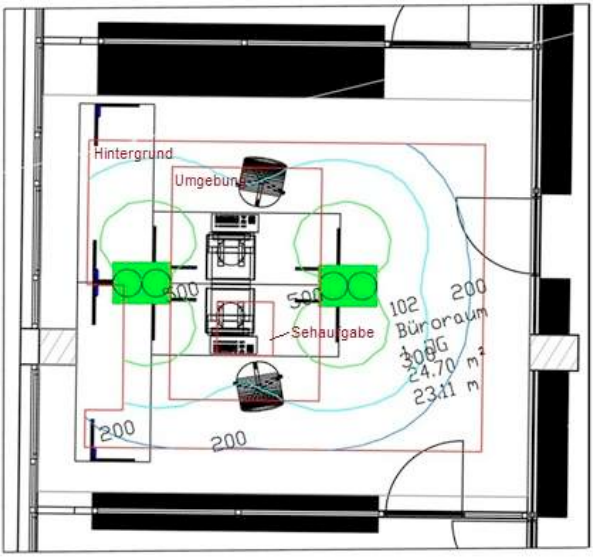


Abb. 3: Grundriss des Doppelbüros im ersten Stock des Rathauses St. Georgen.

Bereich der Sehaufgabe VOR der Umrüstung auf LED

Beleuchtungsstärke E in Lux [lx]

	Messpkte längs	1	2	3
Messpkte quer	Koordinaten [m]	*0,10*	*0,30*	*0,50*
1	*0,10*	386	417	445
2	*0,30*	365	392	434
3	*0,50*	334	339	380

E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	U_0
388,00	334	445	0,86

Normanforderung:

500	-	-	0,60

Bereich der Sehaufgabe NACH der Umrüstung auf LED

Beleuchtungsstärke E in Lux [lx]

	Messpkte längs	1	2	3
Messpkte quer	Koordinaten [m]	*0,10*	*0,30*	*0,50*
1	*0,10*	416	490	521
2	*0,30*	494	623	668
3	*0,50*	538	650	690

E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	U_0
565,56	416	690	0,74

Normanforderung:

500	-	-	0,60

Abb. 4: Beleuchtungsstärke im Bereich d. Sehaufgabe im Doppelbüro vor (oben) und nach Umrüstung auf LED. Rechts jeweils die Werte für mittlere, Mindest- und maximale Beleuchtungsstärke, sowie Gleichmäßigkeit.

4.2 Bürgerbefragung

Für die parallel durchgeführte Befragung wurde ein Fragebogen entwickelt. Der Fragebogen für die Straßenbeleuchtung besteht aus ca. 25 Fragen. Dabei handelt es sich um Fragen zur Person, sowie Fragen zur Empfindung von Ästhetik, Sicherheit und Qualität der Leuchten und des Lichts.
Die Fragebogen wurden über drei Kanäle an die Bürger herangetragen. Zum einen wurden kurze Infobriefe mit den Fragebögen in die Briefkästen der Anwohner geworfen. Passanten wurden direkt befragt und, um vor allem junge Leute zu erreichen, wurde auf der Projekt-Homepage (www.led-netzwerk-schwarzwald.de) ein Online-Fragebogen eingerichtet. So konnten bisher 334 Antwortbögen gesammelt werden.

Eine vorläufige Auswertung kann bereits einen Einblick in die Akzeptanz der neuen LED-Beleuchtung unter den Bürgern geben.
Vergleicht man Beispielsweise die empfundene Helligkeit, so beurteilten 45% die alte Beleuchtung als zu dunkel und nur 20% als optimal, wohingegen 65% der Befragten die Helligkeit der neuen Beleuchtung als optimal beurteilen. 20% ist sie etwas zu hell.
Auch die Erkennbarkeit von Personen hat sich deutlich verbessert. Konnten unter der alten Beleuchtung 71% der Befragten Personen und Hindernisse nur ausreichend bis schlecht erkennen so meinen 78% der Befragten Personen und Hindernisse unter der neuen Beleuchtung gut bis sehr gut zu erkennen.

Interessant sind bei der Auswertung auch die Unterschiede in Abhängigkeit vom Alter der Befragten. Beispielsweise sind bei den unter 70-jährigen rund 70% der Befragten zufrieden mit der Helligkeit der neuen LED-Beleuchtung. Bei den über 70-jährigen sind dies nur 44%.

In den folgenden Abbildungen ist die Einschätzung der Erkennbarkeit von Farben unter der neuen LED-Beleuchtung, sowie die Akzeptanz der Lichtfarbe in Abhängigkeit des Alters der Befragten dargestellt. Die erste Grafik zeigt, dass ältere Menschen die Farberkennung schlechter einschätzen als junge Menschen. In der zweiten Abbildung ist zu sehen, dass die Akzeptanz der neuen, meist kälteren Lichtfarbe mit dem Alter der Befragten abnimmt.

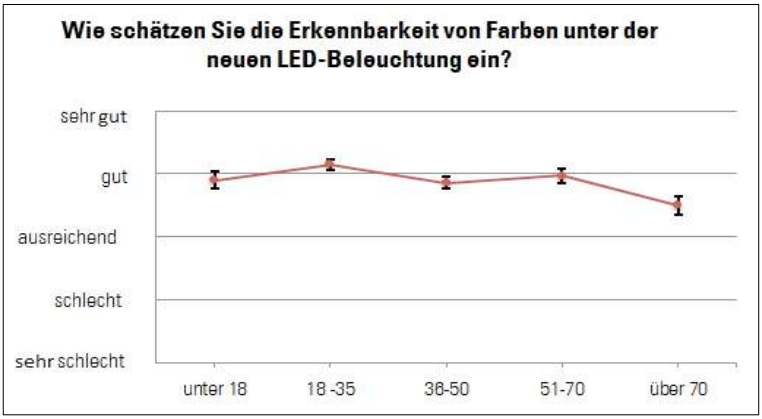


Abb. 5: Vom Alter abhängige Einschätzung der Erkennbarkeit von Farben unter der LED-Beleuchtung (sehr gut=5, gut=4, ausreichend=3, schlecht=2, sehr schlecht=1)

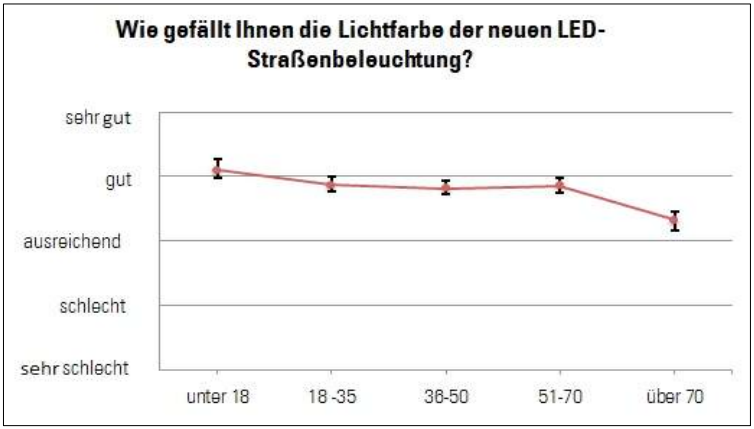


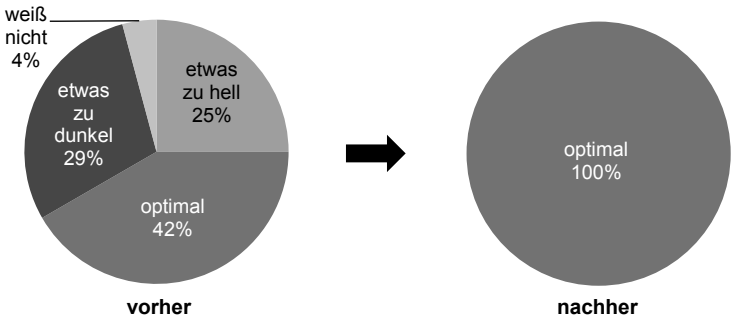
Abb. 6: Akzeptanz der Lichtfarbe der LED-Beleuchtung in Abhängigkeit des Alters der Befragten (sehr gut=5, gut=4, ausreichend=3, schlecht=2, sehr schlecht=1)

Diese Ergebnisse zeigen, dass das Empfinden der unterschiedlichen Aspekte der Straßenbeleuchtung, wie Lichtqualität, Ästhetik oder Sicherheit vom Alter der Befragten abhängig ist. Diese altersabhängige Analyse wird für alle Fragen des Fragebogens durchgeführt werden.
Auf Basis des bereits vorhandenen Fragebogens und der vorläufigen Umfrageergebnisse wurde außerdem ein detailliertes, intensives Interview erarbeitet, welches in den nächsten

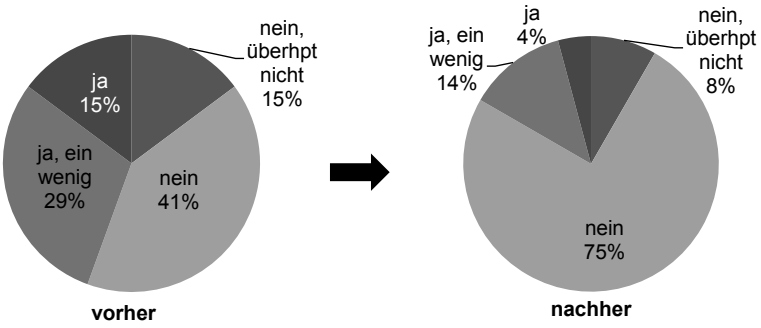
Tagen mit drei bis vier Personen durchgeführt werden soll. Hierbei soll genau erfasst werden, welches Bild der Befragte von der Beleuchtung hat.

Im Rathaus St. Georgen wurden ebenfalls Befragungen und persönliche Interviews durchgeführt, um zu erfahren, wie die Akzeptanz der neuen mobilen Arbeitsplatzbeleuchtung unter den Mitarbeitern aussieht.
Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Lichtqualität aus Sicht der Mitarbeiter verbessert hat und sie sich von der teils indirekten Beleuchtung weniger geblendet fühlen als zuvor. An der Befragung aus der die folgenden zwei Fragen stammen, haben 25 Personen teilgenommen, das sind rund 60% der gesamten Rathausmitarbeiter.

Um zu LESEN ist das Licht auf Ihrem Schreibtisch…



Blendet Sie die Beleuchtung?



5. Bewertung der eigenen Lösung im Vergleich zu anderen Lösungen

In diesem Projekt wurde die Straßenbeleuchtung erneuert und modernisiert. Kostengünstig wurden alte Leuchtmittel gegen neue energiesparende LED-Leuchten ausgetauscht. Anhand vielfältiger Modelle und Messfelder wurde der Einsatz der LED-Straßenbeleuchtung unter verschiedensten Rahmenbedingungen analysiert und dokumentiert.
Die ausführliche, nicht nur quantitative sondern auch qualitative Befragung der Bevölkerung bringt ein sehr viel detaillierteres Bild der Akzeptanz der Umrüstung bei den Bürgern, als eine rein quantitative Befragung bieten könnte.

UV-A Hintergrundbeleuchtung für ein selbstreinigendes Eingabe-System

Prof. Dr. Paola Belloni, Dipl.-Ing. Linchao Ye, Prof. Dr.Knut Möller, Hochschule Furtwangen , Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen und Maschinenbau und Verfahrenstechnik

Einleitung und Problemstellung

Desinfektion mit dem photokatalytischen Effekt, der von TiO2 induziert wird, hat in letzter Zeit große Aufmerksamkeit gewonnen. Der TiO2 wird durch die Absorption von UV(A)-Licht stark geladen, Bakterien und Keime auf der TiO2-beschichteten Oberfläche können somit unter genügender Menge von UV(A) Strahlung oxidiert werden. Wir haben mit einem Industriepartner ein aktiv selbstreinigendes Eingabe-System mit einer Glasoberfläche, basierend auf diesem Prinzip entwickelt. Es wird in verschiedenen Touch-Screens in biologischen Laboren oder medizinischen Ausstattungen für z.B. Krankenhäuser eingesetzt, z.B. beim Nurse-on-call System oder bei der Aufzug-Steuerung (Abbildung 1).

Abb. 1:Anwendungsbeispiel eines Eingabe-Systems

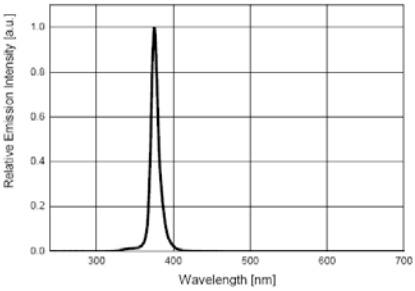


Abb. 2: Spektrum der eingesetzten LED

Zielsetzung

In dieser Arbeit wurden Hochleistungs-UV-LEDs von Seoul Optodevices mit einer zentralen Wellenlänge von 375 nm als Lichtquelle eingesetzt. Die spektrale Eigenschaft wird in Abbildung 2 dargestellt. Das Hauptziel des optischen Designs ist es eine effiziente und möglichst gleichmäßige UV-Bestrahlung auf der mit TiO2 beschichteten Glasoberfläche zu erzeugen.

Folgende Randbedingungen müssen erfüllt werden:
1) Die auf der TiO2–Schicht ankommende UV-Strahlung muss eine minimale Intensität von 3mW/cm² haben, um den photokatalytischen Effekt auszulösen.
2) Die UV-Bestrahlung soll die gesamte Glasoberfläche bedecken, eine gewisse Homogenität ist erforderlich.
3) Die Glasscheibe muss rahmenlos und die Lichtquelle unsichtbar sein.
4) Das System muss senkrecht eingestellt werden.

Unser optisches System wird deshalb als ein Hintergrundbeleuchtungs-Modell konzipiert, mit einem T-förmig geschnitteten Glas und zwei seitlich versteckt eingekoppelten LED-Reihen (Abb.3).

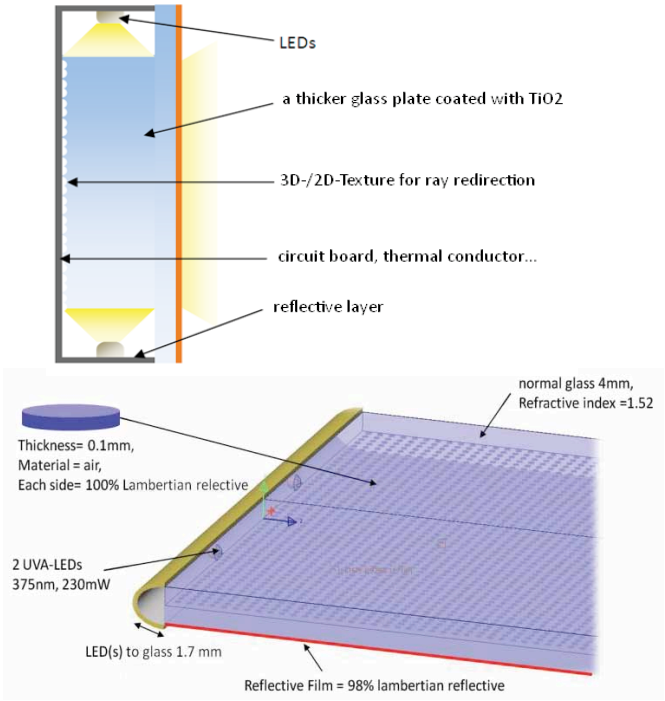


Abb. 3: Modell der Hintergrundsbeleuchtung mit optischen Komponenten

Was ist innovative / „best practice“ an der Lösung?

Das System wird mit Hilfe des Software LightTools® von Synopsis simuliert, um die optimalen Einstellungen für die LED-Position, Glasdicke, Geometrie und Anordnung der Texturen usw. zu finden und sowohl die Intensität als auch die räumliche Verteilung der austretenden UV-Strahlung zu berechnen.
Die wichtigsten Komponenten für Lichtumlenkung, nämlich die Texturen-Elemente, werden entweder auf der Glasunterseite oder in der Mitte der Glasfläche eingesetzt.

Zuerst wurde die optische Wirkung von drei Texturen-Elementen (3D-kugelförmige Texturen, 3D-rechteckige Texturen und 2D-Siebdruck) für Lichtumlenkung mit Lambertsch-reflektierender Beschichtung auf der Glasunterseite aufgebracht, untersucht und verglichen . Die optische Simulation lieferte zwar gute Ergebnisse, die Herstellung dieser Strukturen zeigte sich aber als komplex und kostenintensiv.

Realisierungsgrad

Deshalb wurde eine relativ neue Technik untersucht, nämlich die Laserherstellung von sehr kleinen 3D-Lufteinschlüssen auf einer Ebene, die sich auf der mittleren Höhe des Glases befindet.

Laut den Ergebnissen der optischen Simulation kann durch diese Art von Texturen eine gute Gleichmäßigkeit der UV-Bestrahlung erreicht werden (Abb.5). Der erste Prototyp wird gerade gefertigt, um diese Ergebnisse durch Messungen zu bestätigen. Ein Vorteil dieser Technik ist, dass weder für den 2D-Siebdruck noch für die 3D-Texturen eine zusätzliche Lambertsch-reflektierende Beschichtung auf der Glasunterseite benötigt wird, was die Herstellungskosten des Produktes reduziert. Ein weiterer Vorteil dieser gelaserten 3D-Lufteinschlüsse ist, dass ein standardisierter Produktionsprozess - Kleben der Leiterplatten auf der Glasunterseite - nicht geändert werden müsste.

Bewertung der eigenen Lösung im Vergleich zu anderen Lösungen

Alle untersuchten Texturen-Elemente, 2D-Siebdruck, 3D-Extractor und diese neue Lasertechnik wurden optimiert und können verschiedene Wege zur Erzeugung eines homogenen UV-Bestrahlungsfeldes auf der beschichteten Glasfläche liefern, die die photokatalytische Wirkung von TiO2 ermöglicht.

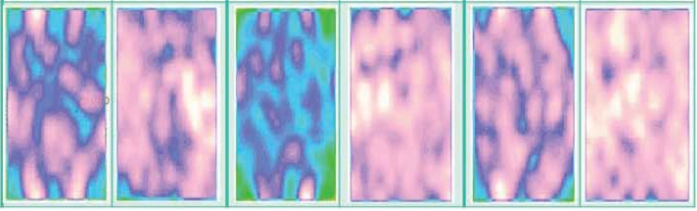
Radius		1.0mm		0.5mm		0.3mm	
Original Spacing		x=y=3mm	BPO(S/N)	x=y=1.5mm	BPO(S/N)	x=y=0.9mm	BPO(S/N)
Total Power (mW)		358	501	348	490	352	486
Irradiance (mW/cm^2)	min.	1.0	1.3	0.7	1.23	0.9	1.4
	max.	2.6	3.1	3.0	2.9	2.3	2.7
	average	1.58	2.23	1.54	2.17	1.56	2.16
Average Deviation		0.171	0.140	0.184	0.117	0.153	0.108
Illuminance Intensity Chart							

Abb. 4: Ergebnisse mit gelaserten 3D-Lufteinschlüssen für verschiedene Radien und Abstände. Die Strukturen können entweder eine gleichmäßige räumliche Verteilung haben (x=y Koordinaten) oder Signal/Noise optimiert werden (BPO-S/N).

Dachoberlichter trotz der geringeren Transparenz der Fenstersysteme angehoben werden. Bei den Regelklassenräumen bestand die Option der Schaffung neuer Tageslichtöffnungen nicht. Hier wurde die Rohbauöffnung durch Abschlagen eines Teils des Fenstergewändes geringfügig vergrößert und die äußere Verglasung des Kastenfensters wurde als Einfachverglasung aus Weißglas und nicht als Wärmedämmverglasung ausgeführt. Aufgrund dieser Maßnahmen fiel die Minderung des Taglichtniveaus im Regelklassenraum geringer aus als bei einer herkömmlichen Sanierung. Aufgrund des integrativen Ansatzes des Kontrollsystems, das Tageslichtsysteme und die künstliche Beleuchtung gesamtenergetisch regelt und aufgrund der geringen installierten Leistung der künstlichen Beleuchtung betrug der gemessene Energieverbrauch der Beleuchtung sowohl in den Regelklassenräumen als auch in den Klassenräumen im Dach weniger als drei Kilowattstunden je Quadratmeter und Jahr. Damit war die Sanierung der Beleuchtung nicht nur gestalterisch überzeugend sondern auch energetisch erfolgreich.

Projektbeteiligte und Projektförderung

Bauherr	Landkreis Görlitz
Forschungsprojekt, Gesamtleitung	HS Zittau/Görlitz, Fakultät Bauwesen, Lehrgebiet Bauklimatik, Prof. Dr. Jens Bolsius
Forschungsprojekt, Unterauftrag Beleuchtung	TU-Dresden, Fakultät Architektur, Institut für Bauklimatik
Projektbegleitung	Projektträger Jülich
Architekt	AIZ - Architektur- und Ingenieurbüro für Hoch- und Tiefbau Zittau GmbH
Elektroplanung	ILM - Ickrath Land Messner, Ingenieurbüro für Elektroenergieanlagen

Tab. 7: Projektbeteiligte

Das diesem Beitrag zugrundeliegende Forschungsprojekt wurde aufgrund eines Beschlusses des Bundestages mit Mitteln des Bundeswirtschaftsministeriums gefördert. Förderkennzeichen des BMWi: 0327430C.

Fotonachweis: Abb. 1, Abb. 2, Abb. 3, Abb. 6, Abb. 7, Abb. 8, Abb. 9, Abb. 10, Abb. 11 Copyright: Roman Jakobiak; Abb. 5 Copyright: Uwe Meinhold.

Wissenschaftlich-technische Untersuchung einer Beleuchtungsanlage

Karim Daoudi
Zur Feldmühle 6
59821 Arnsberg

1. Praktische Analyse eines Teils der Beleuchtungsanlage (Ist-Analyse)

Für die praktische Analyse eines Teils der Beleuchtungsanlage (Ist-Analyse) werden verschiedene Messungen in einem ausgewählten Klassenraum durchgeführt. Durch diese Messungen der Beleuchtungsanlage für den jeweiligen relevanten Raum wird der Ist-Zustand erfasst, somit können vorgeschriebene Grenzwerte, welche in den entsprechenden Normen festgelegt sind, kontrolliert werden. Außerdem können Vergleiche zwischen Messung und Planung (Beleuchtungsberechnung) gezogen werden.

Ziel dieser Analyse ist unter anderem die Untermauerung folgender Thesen:

- Die Rechenresultate vom verwendeten Lichtberechnungsprogramm Dialux) liegt verglichen mit gemessenen Ergebnisse bei < +/- 10%.

- Je genauer man die Ergebnisse einer Beleuchtungsmessung erfassen möchte, umso komplexer und intensiver werden die Vorbereitung und die Durchführung der Messung.

- Wiederholungsmessungen verbessern die Qualität und Plausibilität der Ergebnisse.

Insbesondere die erste These repräsentiert den Stand der Wissenshaft bzw. der Technik und wurde durch verschiedene Vergleichstests renommierter Universitäten belegt. /1/

Folgende Ausgangsinformationen liegen der durchgeführten Messung zugrunde:

Messobjekt:

- Punktuelle horizontale Beleuchtungsstärke (E_h)
- Punktuelle vertikale Beleuchtungsstärke (E_v)
- Leuchtdichte (L)
- Reflexionsgrad (ρ)
- Netzspannung (U)
- Raumtemperatur (T)
- Leuchtenumgebungstemperatur (T)

Messort:

- Klassenraum 015 – EG

Königin-Luise-Stiftung
Podbielskialle 78
14195 Berlin

Messdatum: 29.04. 2010

Messperson: Karim, Daoudi

Angewendete Normen:

/2/DIN 5035-6:2006-1	Beleuchtung mit künstlichem Licht Teil 6: Messung und Bewertung
/3/DIN EN 12464-1:2003-03	Beleuchtung von Arbeitsstätten Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen
/4/DIN EN 12665:2002-09	Licht und Beleuchtung Grundlegende Begriffe und Kriterien für die Festlegung von Anforderungen an die Beleuchtung
/5/Beleuchtung 2006	Hinweise für die Innenraumbeleuchtung mit künstlichem Licht in öffentlichen Gebäuden (Hrsg. AMEV)

1.1 Messgeräte

Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichtemessgeräte werden entsprechend ihrer Güte in drei Genauigkeitsklassen eingeteilt und die dazugehörigen Fehlergrenzen aufgelistet.

Klasse	Güte	Anwendung
A	Hohe	Präzisionsmessungen
B	Mittlere	Betriebsmessungen
C	Geringe	Orientierende Messungen

Abb. 1 – Photometerklassen

Das wichtigste Kriterium bei den Fehlergrenzen der einzelnen Genauigkeitsklassen ist der zulässige Gesamtfehler f_{ges}, welcher nicht überschritten werden darf. In den technischen Datenblättern der Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichtemessgeräte sind unter anderem die Genauigkeitsklasse und die einzelnen Fehlergrenzen aufgelistet.

Zur Realisierung der Messungen in dem Klassenraum 015 wurden folgende Messgeräte eingesetzt:

Abb. 2 – CHY 505 RTD

Abb. 3 – Siemens B1022

Abb. 4 – Konica Minolta Luxmeter T-10

Abb. 5 – LMT L1009

1.2 Vorbereitung der Messung

Zur Vorbereitung der Messungen wurden folgende Daten erfasst und dokumentiert:

- Angaben zum Raum und zur Beleuchtungsanlage
- Angaben zum verwendeten Messraster

Das Messraster für die punktuelle horizontale Beleuchtungsstärke (E_h) wurde nach den Vorgaben der DIN 5035–6 auf einer Messhöhe von 0,85m ermittelt. Durch Anwendung folgender Formel (1):

$$p = 0{,}2 \times 5^{\log_{10} d} \qquad (1)$$

… ergibt sich für die zu messende Bewertungsfläche von 4,60m x 4,60m ein Messraster von 11 x 9 Punkten. Dies ergibt einen Punktabstand von 420mm in X-Richtung und von 510mm in Y-Richtung. Nachfolgende Abbildung (Abb. 6) veranschaulicht das aufgestellte Messraster von 11 x 9 Punkten.

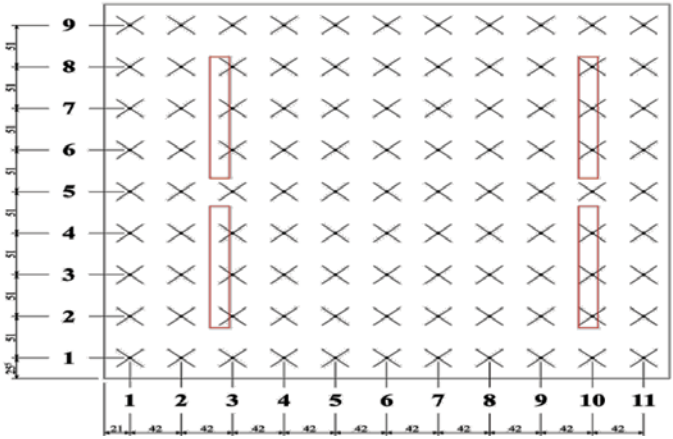


Abb. 6 – Messraster zur Messung der punktuellen horizontalen Beleuchtungsstärke (E_h); Maße in cm

1.3 Durchführung der Messung

Für die Untersuchung des Ist-Zustandes wurde die Beleuchtungsanlage im jeweiligen Betriebszustand zu messen, daher wurden folgende Messvoraussetzungen erfüllt:

- Fremdlicht durch Tageslicht oder andere Lichtquellen wurde ausgeschlossen (Messung fand in der Nacht statt)
- Da die Beleuchtungsanlage und hierbei insbesondere die Leuchtstofflampen seit geraumer Zeit in Betrieb sind, ist die Forderung nach 100h gealterten Lampen erfüllt.
- Vor Beginn der jeweiligen Messung wurden die Lampen mindestens eine Stunde in der Leuchte betrieben, um ein stabiles Lichtstromverhalten zu gewährleisten.
- Der Regelungszustand der Leuchten wurde unterbrochen, indem die Steuerleitung des DALI-Signals vorübergehend gekappt wurde, da bei 100% Lichtstrom gemessen wird.

Bei der Durchführung der Messung wurden die Empfehlungen der DIN 5035–6 befolgt und es wurden 3 Messversuche unternommen, die als Basis für eine statistische Verifizierung der durchgeführten Messung, dienen sollte.
Nachfolgend wird jedoch von einem Messversuch ausgegangen. /2/

1.4 Messergebnisse

1. Messversuch

Messzeitpunkt: 00.35 Uhr – 00.55 Uhr

Versorgungsspannung

Anfang der Messung: an der Steckdose 229,9 V

Ende der Messung: an der Steckdose 229,8 V

Temperatur

Raumtemperatur: 24,9° C Umgebungstemperatur der Leuchten: 34,5° C

In der nachstehenden Tabelle 11 sind die gemessenen Werte in lx für die punktuelle horizontale Beleuchtungsstärke (E_h) dargestellt:

9	210	209	205	209	254	283	300	273	237	217	220
8	250	263	260	280	338	374	388	363	298	278	274
7	330	310	310	334	407	444	443	429	356	338	343
6	348	347	358	383	486	528	460	425	400	389	386
5	413	362	368	368	437	509	512	449	427	402	404
4	404	397	413	460	570	600	588	511	452	431	464
3	390	377	389	405	555	592	575	507	442	420	447
2	353	362	377	449	476	404	465	430	409	389	408
1	308	317	330	382	452	474	453	389	360	337	360
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**

Tab. 1 – Gemessene Werte der punktuellen horizontalen Beleuchtungsstärke (E_h)

1.5 Statistische Auswertung von Messdaten

Gegenstand der statistischen Auswertung sind die gemessenen Werte der punktuellen horizontalen Beleuchtungsstärke (E_h). Die drei durchgeführten Messversuche werden im Folgenden als Stichproben bezeichnet.

1.5.1 Einstichproben t-Test

Die Messwerte einer Stichprobe sind normalverteilte, unabhängige Werte mit dem Erwartungswert μ und der Standardabweichung σ. Es soll geprüft werden, ob der Erwartungswert einer Stichprobe größer gleich einem bestimmten Wert μ_0 ist, also ob $\mu \geq \mu_0$ erfüllt ist. Dies ist die sogenannte Nullhypothese. Allerdings ist die Standardabweichung σ unbekannt.

Aus der Stichprobe lassen sich das arithmetische Mittel und die empirische Standardabweichung bestimmen. Diese Statistik ist unter der obigen Nullhypothese dann nicht mehr normalverteilt, sondern t-verteilt mit n-1 (n-1 = v) Freiheitsgraden.

Mit steigender Anzahl von Freiheitsgraden bzw. mit zunehmendem Stichprobenumfang nähert sich die t-Verteilung der Standardnormalverteilung an. Die t-Verteilungen der verschiedenen Stichprobenumfänge, z.B. n = 3, n = 4, n = 11 mit den jeweiligen Freiheitsgraden v = 2, v = 3 und v = 10 werden im Diagramm 1 dargestellt. Dabei ist die Annäherung bei steigender Anzahl der Freiheitsgrade an die Standardnormalverteilung ersichtlich. /6/, /7/

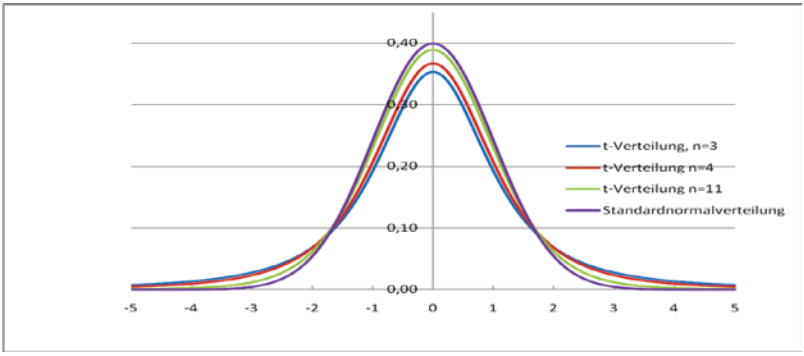


Diagramm 1 – Dichtefunktion der t-Verteilung

Vorgehen:

Es soll die Nullhypothese H_0: $\mu \geq \mu_0$ getestet werden, wobei μ_0 ein fest vermuteter Wert ist. Die sogenannte linksseitige Alternative (auch Alternativhypothese genannt) ist dann H_1: $\mu < \mu_0$.

Die Nullhypothese H_0 wird zum Signifikanzniveau α abgelehnt, falls $-\infty < T \leq -t(1-\alpha; n-1)$. T ist die Prüfgröße und $t(1-\alpha; n-1)$ wird als das (1-α)-Quantil der t-Verteilung mit n-1 Freiheitsgraden bezeichnet. Die Anzahl der Freiheitsgrade ergibt sich aus der Differenz des Stichprobenumfanges und der Anzahl zu schätzender Parameter. Geschätzt wird die Standardabweichung σ, also genau ein Parameter, damit ist die Anzahl der Freiheitsgrade n-1.

Aus den ermittelten Werten wird zusammenfassend H_0 abgelehnt wenn $T \leq - t$ ist. Dies ist jedoch falsch, deshalb wird die Nullhypothese H_0 nicht abgelehnt. Der Erwartungswert μ ist mit 99%-iger statistischer Sicherheit $\geq \mu_0$.

1.5.2 t-Test für gepaarte Stichproben

Durch wiederholte Messung an einer Untersuchungseinheit entstehen paarweise verbundene Stichproben. Es soll die Nullhypothese H_0 getestet werden, ob der Erwartungswert μ_x der Stichprobe X gleich dem Erwartungswert μ_y der Stichprobe Y ist bzw. ob sich die Erwartungswerte nur um einen festgelegten Wert ω_0 unterscheiden. Auch hier wird wieder von einer normalverteilten Grundgesamtheit ausgegangen. Die Nullhypothese lässt sich dann mit H_0: $\mu_x - \mu_y \leq \omega_0$ und die hier sogenannte rechtsseitige Alternative mit H_1: $\mu_x - \mu_y > \omega_0$ formulieren. /6/, /7/

Aus den ermittelten Werten wird H_0 abgelehnt wenn $t \leq T$ ist. Dies ist jedoch falsch, deshalb wird die Nullhypothese H_0 nicht abgelehnt. Die Differenz der Erwartungswerte ($\mu_x - \mu_y$) ist mit 99%-iger statistischer Sicherheit $\leq \omega_0$, also ≤ 2 lx. Bezogen auf den geforderten Wert von $\bar{E}_m = 300$ lx bzw. unter Berücksichtigung des Wartungsfaktors, den Wert von $\bar{E}_n = 375$ lx ergibt sich relativ ($\omega_0/375$) ein Unterschied der Differenz der Erwartungswerte ($\mu_x - \mu_y$) von weniger als 1%. Dies ist ein Indikator für die Qualität der Durchführung der jeweiligen Einzelmessung hinsichtlich der Vergleichbarkeit untereinander.

Fazit

Bezugnehmend auf die Ergebnisse des Einstichproben t-Tests und des t-Tests für gepaarte Stichproben kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse der Messungen als statistisch gesichert und plausibel bezeichnet werden kann. /24/, /14/, /23/

1.6 Auswertung der Messergebnisse

Forderungen für den Klassenraum 015 nach AMEV (Beleuchtung 2006) und DIN EN 12464-1:

- Allgemeinbeleuchtung:
  - Wartungswert der Beleuchtungsstärke $\bar{E}_m \geq 300$ lx
  - Gleichmäßigkeit $g_1 \geq 0{,}3$

Erfüllung der Forderungen für den Klassenraum 015 nach AMEV (Beleuchtung 2006) und DIN EN 12464-1:

Allgemeinbeleuchtung:

Messergebnisse der punktuellen horizontalen Beleuchtungsstärke (E_h)

Wartungswert der Beleuchtungsstärke $\bar{E}_m = 305{,}3$ lx erfüllt die Forderungen
Gleichmäßigkeit $g_1 = 0{,}51$ erfüllt die Forderungen

Reflexionsgrade

Die Messergebnisse der Reflexionsgrade, weichen von den häufig verwendeten Standardwerten 70% für Decken, 50% für die Wände und 20% für Böden ab. In der AMEV (Beleuchtung 2006) werden für Klassenräume Mindestwerte für die Reflexion von 80% (Decke), 50% (Wand) und 30% (Boden) vorgegeben. Dadurch, dass die Wände und die

Decke einen hohen Reflexionsgrad ρ (ρ_w = 84,4%, ρ_D = 89,7%) aufweisen, wird ein hohes Beleuchtungsniveau im Klassenraum 015 erreicht.

Temperatur

Die gemessenen Werte für die Raum- und Umgebungstemperatur der Leuchten weisen keine Auffälligkeiten auf, so dass man hinsichtlich des Lichtstromverhaltens der Leuchtmittel von konstanten Bedingungen ausgehen kann. Bei den eingesetzten T-16 Leuchtmitteln wird der maximale Lichtstrom bei 35 °C erreicht, während die in den Tabellen der Leuchtmittel-Hersteller enthaltenen Werte sich auf eine Umgebungstemperatur von 25 °C beziehen.

Versorgungsspannung

Durch die gemessenen Werte für die Versorgungspannung konnten keine nennenswerten Abweichungen zu den vereinbarten Nennspannungen der Leuchtmittel festgestellt werden. Somit sind auch keine Korrekturfaktoren zu berücksichtigen.

Bewertung der Beleuchtungsanlage

Unter Berücksichtigung des Gesamtfehlers von +/- 10% des verwendeten Messgerätes für die Beleuchtungsstärke, kann geschlussfolgert werden, dass die Allgemeinbeleuchtung des Klassenraumes 015 die Forderungen nach AMEV (Beleuchtung 2006) und DIN EN 12464-1 erfüllt.

2. Vergleich Berechnungsprogramm Dialux – Messung

Dieser Vergleich zwischen dem Berechnungsprogramm Dialux und der Messung soll die allgemein gültige Erkenntnis beweisen, dass sich die Ergebnisse um < +/- 10% unterscheiden. Um diesen Vergleich durchführen zu können, wurden die aufgenommenen Verhältnisse, die aus der Messung des Klassenraumes 015 resultierten, wie Abmessungen, Reflexionsgrade, Leuchten, Leuchtenposition, Leuchtmittel und Messpunkte etc. in das Lichtplanungs-Programm Dialux übertragen und berechnet. Wichtig bei dieser Vorgehensweise ist die präzise Übertragung der Ist-Verhältnisse des Klassenraumes 015 in das Lichtberechnungsprogramm (Dialux).

Die für die Durchführung des Vergleichs relevanten Parameter der Messung sind bereits erfasst worden. In Tabelle 2 erfolgt eine Gegenüberstellung der zu vergleichenden Größen für die Allgemeinbeleuchtung

	Klassenraum 015	
	Allgemeinbeleuchtung	
Mittlere Beleuchtungsstärke $\bar{E}_m$	408lux	381,6lux
Gleichmäßigkeit g_1	0,62	0,51

Tab. 2 – Ergebnisse des Vergleichs Dialux - Messung der Allgemeinbeleuchtung

Die Werte der einzelnen Messpunkte aus dem Berechnungsprogramm Dialux wurden mit den Werten der einzelnen Messpunkte der Messung (Tab. 1) verglichen und zeigten eine maximale punktuelle Abweichung von ca. 40,6% (Diagramm 2)

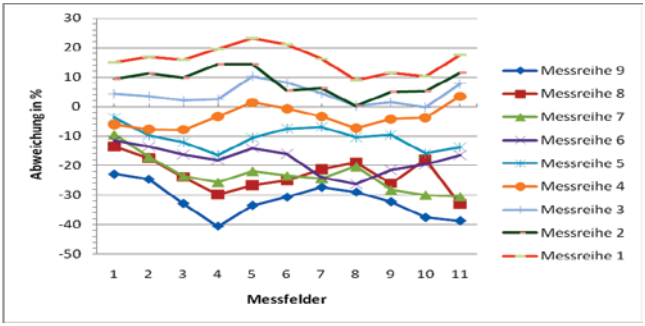


Diagramm 2 – punktuelle Abweichung der einzelnen Werte der Messpunkte (Dialux-Messung)

Die Abweichung der einzelnen Ergebnisse des Berechnungsprogramms lag im Mittel ca. 9,1% über den Werten der realen Messung. Dagegen lag die mittlere Beleuchtungsstärke $\bar{E}_m$ des Berechnungsprogramms Dialux nur um ca. 6,5% über den ermittelten Werten aus der Messung. Somit kann die allgemeingültige Erkenntnis, dass sich die Ergebnisse zwischen dem Berechnungsprogramm Dialux und der Messung um < +/- 10% unterscheiden, untermauert werden.

Die errechnete Abweichung der Gleichmäßigkeit g_1 des Berechnungsprogramms Dialux lag um ca. 21,6% über dem ermittelten Wert für die Gleichmäßigkeit g_1 der realen Messung. Hinsichtlich der festgestellten Abweichung bei der Gleichmäßigkeit g_1 gibt es keinen allgemeingültigen Toleranzunterschied, der für den Vergleich zwischen Berechnung-Messung repräsentativ wäre.

Literaturverzeichniss

/1/ Beleuchtungstechnik für Praktiker : Grundlagen - Lampen - Leuchten - Planung - Messung (Hans, Ris, VDE VERLAG GmbH, 4. Auflage, 2008)

/2/ DIN 5035-6:2006-1
Beleuchtung mit künstlichem Licht; Teil 6: Messung und Bewertung

/6/ Auswertung von Messdaten, Statistische Methoden für Geo- und Ingenieurwissenschaften (Wilhelm Caspary, Klaus Wichmann, Oldenbourg Verlag München Wien, 2007)

/7/ http://de.wikipedia.org/wiki/T-Test, (Stand: 10.06.2010)

Diagramm 1 ; Diagramm 2 Excel: Eigene Erstellung und Bearbeitung

Tab. 1; Tab. 2 Eigene Erstellung und Bearbeitung

Abb. 1 Literaturhinweis /2/

Abb. 2 http://us.100y.com.tw/PNoInfo/31592.htm Stand 15.05.2010

Abb. 3 http://cgi.ebay.de/ws/eBayISAPI.dll?ViewItem&item=110509498577 Stand 15.05.2010

Abb. 4 http://www.mercateo.com/p/389-Art53%282d%2907000/ Stand 15.05.2010

Abb. 5 www.lmt-berlin.de/de/l1009.html, Stand 15.05.2010

Abb. 7 Eigene Erstellung und Bearbeitung

Lichtstrommessung mit verschiedenen Ulbricht-Kugel-Geometrien Eine detaillierte Analyse, Messunsicherheitsbestimmung

Dipl.-Ing. Andreas Groh, (TU Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik)

Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh (TU Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik)

1. Problemstellung (Forschungsfrage):

Die Bestimmung des Lichtstroms Φ_v einer Lichtquelle kann mit der Methode nach Ulbricht oder durch eine goniophotometrische Messung durchgeführt werden. Diese Lichtstrommessungen sind notwendig, um den Lichtstrom einer Lichtquelle, oder mit einer zusätzlichen elektrischen Leistungsmessung auch die Lichtausbeute, zu bestimmen. Bedingt durch die Bemühungen Energie zu sparen, gewinnt letztere immer mehr an Bedeutung. Eine Bestimmung des Lichtstroms kann auch in Abhängigkeit von zum Beispiel unterschiedlichen Umwelt- oder Betriebsbedingungen wie etwa Temperaturen und Strömen, DC-oder PWM-Betrieb, etc. durchgeführt werden. Diese Kenngrößen sind vor allem bei der Entwicklung von Leuchten von Interesse.

Während goniophotometrische Messungen nur mit relativ aufwendigen Messsystemen durchgeführt werden können, lange Messzeiten erfordern und demzufolge den Standardinstituten, Forschungseinrichtungen und großen Lampen- bzw. Leuchtenherstellern vorbehalten sind, ist die Lichtstrommessung mit einer Ulbricht-Kugel aufgrund der vergleichsweise kurzen Messzeiten und dem geringeren Platzbedarf in einem industriellen Umfeld sinnvoll. Um eine wie in der LED-Produktion notwendige vollständige Kontrolle der Produktion zu gewährleisten, kommt aufgrund der sehr hohen Durchsatzrate nur eine schnelle integrale Messung wie die Ulbricht-Kugel-Messung zur Charakterisierung der LEDs in Frage.

Um die Messungenauigkeit der Ulbricht-Kugel-Methode, vor allem in Bezug auf die Vermessung von Hochleistungs-LEDs zu senken, sind folgende Forschungsfragen zu beantworten:

1. In wieweit wird die Messunsicherheit durch die Anordnung der Testlichtquellen (Lichtquellen in der Mitte der Kugel, Lichtquellen auf der Kugelwand, durch eine Kugelöffnung hindurch) sowie durch die Anordnung und Größe der Schatter beeinflusst?
2. Welche ist die bessere Position und Art des Detektorsystems für die Ulbricht-Kugel? Ein Photometerkopf in der Ulbricht-Kugelwand mit einem Schatter (klassische Anordnung) oder mit einem Photometerkopf in einem Tubus, bei dem bedingt durch den Öffnungswinkel des Tubus, lediglich das Licht welches von der Rückseite des Schatters ausgesandt wird, gemessen wird (Leuchtdichtemessung). Hierbei ist hauptsächlich die Frage: „Welche Empfängeranordnug ist unempfindlicher in Bezug auf Geometrieänderungen innerhalb der Ulbricht-Kugel oder auf von der Kalibrierlichtquelle abweichenden Abstrahlcharakteristiken der Messobjekte?“ von Interesse.

2. Ziele:

Ziel der Untersuchung ist es, eine Verringerung der Messunsicherheit der konventionellen Lichtstrombestimmung mit der Methode nach Ulbricht, wie sie in der DIN 5032 „Lichtmessung“ Teil 1 „Photometrische Verfahren“ und der CIE-Publikation Nr. 84 „The Measurement of Luminous Flux“ beschrieben sind, hauptsächlich in Bezug auf Messungen von Hochleistungs-LEDs, zu erreichen. Weiterhin sollen Verbesserungspotentiale aufgezeigt und ihr Einfluss quantifiziert werden. Ein Augenmerk hierbei soll vor allem auf der Anwendbarkeit der Messung im industriellen Bereich, also am Ende der Kalibrierkette und nicht bei den Standardinstituten oder Forschungseinrichtungen liegen.

Anhand einer Ulbricht-Kugel mit 1 m Innendurchmesser werden vergleichende Messungen bzw. Messreihen vorgenommen. Als Vergleichsobjekte werden hierbei zunächst Halogenglühlampen und danach verschiedene farbige als auch weiße Hochleistungs-LEDs und verschiedene Optiken verwendet. Die unterschiedlichen Optiken werden verwendet, um Rückschlüsse auf unterschiedliche Abstrahlcharakteristiken in Bezug auf die Kalibrierlichtquelle zulassen zu können.

Die Messergebnisse werden untereinander als auch mit goniometrischen Messungen verglichen, um Rückschlüsse auf den Einfluss der verschiedenen Messanordnungen, Empfängeranordnungen oder Ulbricht-Kugelgeometrien auf die Messunsicherheit treffen zu können. Hierbei werden auch Einflüsse der Bedienung bzw. Fehlbedienung durch den Benutzer auf die Messergebnisse untersucht.

3. Stand der Wissenschaft/Technik; Forschungshypothesen

Den Stand der Technik stellt nach wie vor die DIN 5032 „Lichtmessung“ Teil 1 „Photometrische Verfahren“ und der CIE-Publikation Nr. 84 „The Measurement of Luminous Flux“ dar. In dieser werden Empfehlungen für den Reflexionsgrad des Kugelinneren, die Größe und Anordnung der Schatter sowie die Position und Art der Empfänger ausgesprochen.

Die zur Messung erforderliche Kalibrierung erfolgt in der Regel mit einer (Halogen-) Glühlampe welche auf Lichtstrom von einer zertifizierten Stelle kalibriert ist. Bei einer Lichtstrom-Kalibrierung mit einem Lichtstromnormal wird die Normallampe, in der Regel in der Mitte der Ulbricht-Kugel angebracht (4π-Messung). Hochleistungs-LEDs werden im Gegensatz dazu meist in der Kugelwand für eine Messung angeordnet (2π-Messung). Durch die unterschiedliche Abstrahlcharakteristik können somit Fehler bei der Messung des Lichtstroms entstehen.

Eine weitere Methode eine Ulbricht-Kugel zu Kalibrieren ist mittels einer Normallampe welche durch eine Öffnung in der Kugelwand in die Kugel strahlt. Hierbei muss die genaue Größe der Öffnung der Kugel bekannt sein, um aus der Fläche und der Beleuchtungs- bzw. Bestrahlungsstärke den eintretenden Lichtstrom bzw. Strahlungsfluss berechnen zu können. Auch hier treten in der Regel deutliche Unterschiede zwischen den Abstrahlcharakteristiken der Kalibrierlichtquelle und der zu messenden Lichtquelle auf.

Einige Hersteller stellen Ulbricht-Kugeln mit höheren Reflexionsgraden des Kugelinneren her und/oder setzen als Empfänger ein speziell kalibriertes Spektrometer ein. Mit dieser

Methode versucht man die spektralen Nachteile, welche durch den hohen Reflexionsgrad entstehen, durch eine spektrale Messung auszugleichen.

Folgende Forschungshypothese wird in diesem Beitrag aufgestellt:

Die Anordnung des Empfängers als Leuchtdichtemesser des Schatters senkt die Richtungsabhängigkeit der Ulbricht-Kugel. Somit wird durch mindestens eine zusätzliche Reflexion an der Kugelinnenwand die Abhängigkeit der Kugel von der Lichtverteilung des Normals zu einer anderen Lichtverteilung des Messobjektes gesenkt.

4. Voruntersuchungen

Die Voruntersuchungen wurden an einer Ulbricht-Kugel der Firma LMT LICHTMESSTECHNIK GMBH BERLIN mit einem Durchmesser von 1 m durchgeführt. Als Referenzempfänger dient der dort eingebaute Photometerkopf mit dem angeschlossenen Anzeigegerät U1000. Die Streuscheibe des Photometerkopfes ist bündig in die Kugelinnenwand eingelassen und hat einen Durchmesser von 30 mm. Vor dem Photometerkopf befindet sich ein Schatter im Abstand von ca. 1/6 des Kugelinnendurchmessers zur Kugelinnenwand.

Der Aufbau entspricht somit DIN 5032 „Lichtmessung“ Teil 1 „Photometrische Verfahren“ und der CIE-Publikation Nr. 84 „The Measurement of Luminous Flux“. Abweichend zu den empfohlenen Kugelgeometrien befindet sich in der Kugel eine zusätzlichen Öffnung für einen zweiten Empfänger. Diese ist in einem Winkel α von ca. 10° zu dem Referenzempfänger, bezogen auf die Kugelmitte, angeordnet.

Der Schatter innerhalb der Kugel ist zwischen den beiden Öffnungen für die Empfänger angeordnet. Die Flächennormale des Schatters ist somit in einem Winkel von ca. 5° zu jeder der beiden Öffnungen angeordnet. Um beide Öffnungen abschatten zu können ist der Schatter oval ausgeführt (ca. 16 cm x 10,5 cm).

Der für diese Untersuchung verwendete Vergleichsempfänger ist ein Leuchtdichtemessgerät des Typs L1009 der Firma LMT LICHTMESSTECHNIK GMBH BERLIN. Dieses ist so positioniert, dass es durch die zusätzliche Öffnung in der Ulbricht-Kugel die Rückseite des Schatters sieht. Weiterhin ist die optische Achse des Leuchtdichtemessgerätes auf die Kugelmitte ausgerichtet. Somit wird während des Vergleiches die Leuchtdichte der Schatterrückseite gemessen.

Um die Vergleichbarkeit mit anderen Messgeräten zur Bestimmung des Lichtstroms zu gewährleisten, ist der gesamte Aufbau vor den Vergleichsmessungen mit einem Lichtstromnormal kalibriert worden.

In Abb. 1 ist der Messaufbau schematisch dargestellt. Zu sehen ist ein horizontaler Schnitt durch die Mitte der Ulbricht-Kugel. In der Mitte der Ulbricht-Kugel ist die für die Voruntersuchungen verwendete gebündelte Lichtquelle drehbar angeordnet.

Bei den durchgeführten Messungen wird diese gebündelte Lichtquelle um den Winkel α in 5°-Schritten von oben gesehen gegen den Uhrzeigersinn gedreht und jeweils die Beleuchtungsstärke mittels des in der Kugelwand eingelassenen Photometerkopfes als auch die Leuchtdichte der Schatterrückseite gemessen. Bei dem Winkel $\alpha = 0°$ ist die Ausstrahlrichtung der Lichtquelle auf den Photometerkopf ausgerichtet.

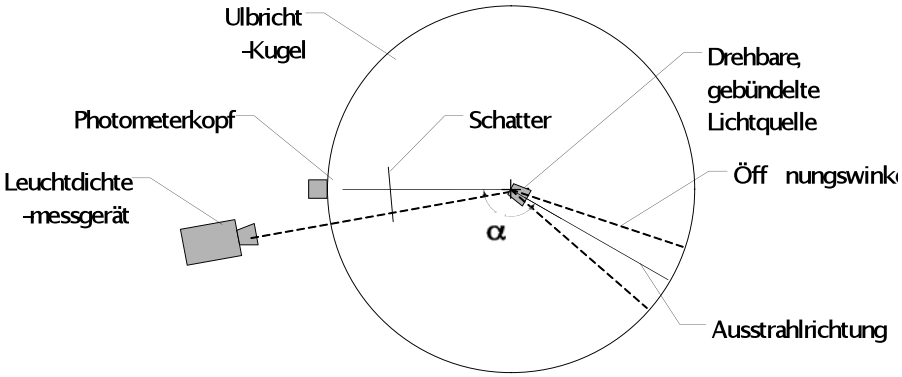


Abb. 1: Schematische Darstellung des Messaufbaus

5. Ergebnisse der Voruntersuchungen

In Abb. 2 sind die Ergebnisse der Voruntersuchungen graphisch dargestellt.

Zusehen ist die relative Abweichung zum Mittelwert der mit der klassischen Empfängeranordnung gemessenen Beleuchtungsstärke (Linie mit Dreiecken) bzw. der gemessenen Leuchtdichte (Linie mit Quadraten), in Abhängigkeit des Winkels, um welchen die gebündelte Lichtquelle gedreht wurde.

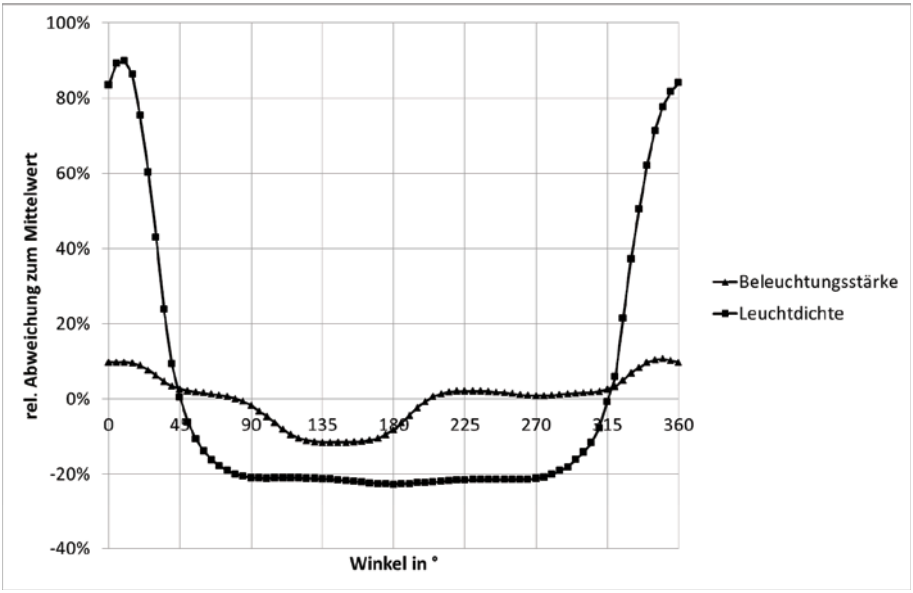


Abb. 2: Abhängigkeit des Messwertes vom Verdrehungswinkel der gerichteten Lichtquelle

Auffällig ist, dass die Leuchtdichte deutlich höhere Abweichungen zum Mittelwert aufweist als die herkömmliche Lichtstrommessung.

Diese Abweichungen treten in den Bereichen zwischen α = 0° - 80° bzw. α = 280° - 360° auf. In dem Bereich zwischen 80° und 280° sind die Messwerte der Leuchtdichtemessung deutlich konstanter als die Messwerte klassischen Lichtstrommessung.

Eine mögliche Erklärung liegt bei der Anzahl der Reflektionen welche das von der zu vermessenden Lichtquelle ausgestrahlte Licht benötigt, um zu einem der Empfänger zu gelangen. Nach der Ulbricht-Kugel-Theorie stellt sich nach wenigen Reflektionen bereits eine konstante Beleuchtungsstärke auf der gesamten Innenfläche der Kugel ein. Dies gilt allerdings nur für eine ideale Ulbricht-Kugel. Bei realen Ulbricht-Kugeln ist das bedingt durch Störfaktoren wie Schatter, Messobjekthalterungen, Inhomogenitäten der Kugelbeschichtung und ähnlichem nicht der Fall.

Bedingt durch die gebündelte Ausstrahlung der verwendeten Lichtquelle trifft mehr Licht nach nur einer Reflektion an der Kugelinnenwand auf die Schatterrückseite, wenn die Ausstrahlrichtung der Lichtquelle in die Halbkugel mit den Öffnungen für die Empfänger zeigt.

Licht, welches in den Winkelbereich zwischen 80° und 280° emittiert wird, wird hingegen mindestens 2-mal reflektiert bevor es auf die Rückseite des Schatters auftreffen kann. Durch die höhere Anzahl der Reflektionen und durch eine störungsfreie Halbkugel (keine Schatter, Öffnungen) ist der entstehende Messwert unabhängiger von dem Winkel in dem die Ausstrahlrichtung der Lichtquelle liegt.

Der leichte Anstieg der Leuchtdichte im Winkelbereich zwischen 0° und 20° ist mit der Ausrichtung der Ausstrahlrichtung zu begründen. Bei einem Winkel α = 10° ist die Ausstrahlrichtung genau deckungsgleich mit der optischen Achse des Leuchtdichtemessgerätes. Dadurch, dass der Schatter unsymmetrisch vor der Öffnung der Ulbricht-Kugel für das Leuchtdichtemessgerät angeordnet ist (vgl. Abb. 3), gelangt das meiste Licht schon nach nur einer Reflexion auf die Rückseite des Schatters. Somit ist hier auch die höchste Leuchtdichte zu verzeichnen.

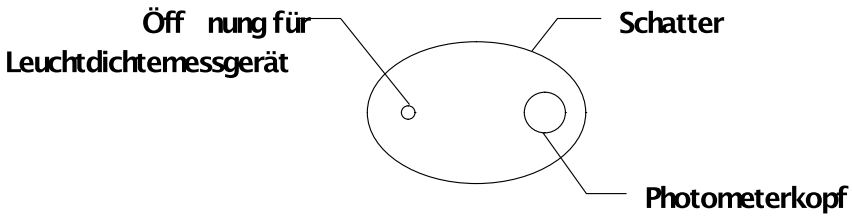


Abb. 3: Anordnung der Messgeräte bezogen auf den Schatter

Mit steigendem Winkel α sinkt die gemessene Leuchtdichte. Dies setzt sich solange fort, bis nur noch Licht auf die Schatterrückseite fallen kann, welches mindestens 2-mal reflektiert wurde.

Der Verlauf, der mit der konventionellen Empfängeranordnung gemessenen Beleuchtungsstärke, lässt sich auf ähnliche Weise erklären. Ein wichtiger Unterschied

zwischen den Empfängern ist, dass der Photometerkopf bedingt durch seine cos-Anpassung nicht nur Licht von der Schatterrückseite bewertet, sondern auch Licht welches von der Kugelinnenwand reflektiert wird. Dies führt dazu, dass es im Vergleich zu den Leuchtdichte-Messwerten keinen größeren Bereich eines konstanten Messwertes gibt, da nahezu immer Licht nach nur einer Reflektion auf den Empfänger treffen kann. Bei gebündelten Lichtquellen führt dies zu einer falschen Bewertung des auf den Empfänger auftreffenden Lichts und somit zu der Richtungsabhängigkeit der Messwerte.

6. Weitere Vorgehensweise, geplante Untersuchungen

Um die in Abschnitt 5 genannten möglichen Erklärungen für den Verlauf der Abweichung vom Mittelwert der Leuchtdichte der Schatterrückseite zu überprüfen, werden die Messungen nochmals wiederholt. Verändert wird hierbei die Ausrichtung des Leuchtdichte-Messgeräts. Dieses wird auf die Schattermitte und nicht auf Kugelmittelpunkt ausgerichtet.

Aufgrund der Voruntersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Messung der Leuchtdichte der Rückseite des in der Ulbrichtkugel notwendigen Schatters eine geringere Richtungsabhängigkeit, in einem bestimmten Winkelbereich bei gebündelten Lichtquellen, aufweisen kann als die klassische Empfängeranordnung. Durch eine gezielte Veränderung der Schattergeometrie soll, zunächst durch Simulationen, überprüft werden ob der Winkelbereich in dem der Messwert nur geringe Änderungen aufweist, zu vergrößern ist. So könnte der Messunsicherheitsbeitrag, welcher durch eine unterschiedliche Positionierung des Messobjektes innerhalb der Ulbricht-Kugel hervorgerufen wird, verringert werden.

Da in den Vorversuchen nur relative Messwerte betrachtet wurden, sollen um mögliche Einflüsse auf die Ermittlung des Lichtstroms von gebündelten Lichtquellen mit der klassischen bzw. Leuchtdichte-Methode zu ermitteln, Vergleiche mit goniometrischen Lichtstrommessungen angestellt werden. Hierzu werden die Lichtströme verschiedener Halogen-Reflektorlampen zum einen goniometrisch und zum anderen mit den zwei Ulbricht-Kugelmethoden gemessen und anschließend verglichen werden. Hierbei sollen alle Messgeräte zuvor mit demselben Lichtstromnormal kalibriert werden, um mögliche Fehlerquellen minimieren zu können. Weiterhin soll der Einfluss verschiedener Abstrahlcharakteristiken von Lichtstromnormalen auf die Ermittlung des Lichtstroms untersucht werden.

7. Danksagung

Diese Untersuchung ist gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung.

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Leuchtensteuerung via Browser und Smartphone

Dipl.-Ing.(FH) Robert Heinze, TRILUX GmbH & Co.KG, Heidestr.4, 59759 Arnsberg

1 Stand der Technik

Man könnte in heutigen Tagen erwarten, dass man Leuchten direkt und einfach mit einem Smartphone oder Netbook ansteuern kann.

Prinzipiell ist es tatsächlich möglich mit mehreren uneinheitlichen und nicht universellen Hard- und Software Komponenten, wie spezielle Software für Endgeräte, Access Points und Hardware-Protokoll-Wandler (z.B. ArtNet zu DMX und DMX zu DALI), diese Funktionalität recht umständlich, teuer und großvolumig aufzubauen. Beispiele sind hier KNX(EIB) oder LON.

Fast alle Leuchten in gewerblichen Bereich sowie viele Leuchtstoff-Leuchten in privaten Haushalten werden, falls diese dimmbar sind, mittels DALI angesteuert. Auch steigt der Anteil an dimmbaren Leuchten ständig.

Und fast alle Smartphones, Net- / Notebooks, Tablets, Computer und andere Consumer-Geräte verfügen heute standardmäßig über eine WLAN-Schnittstelle.

Derzeit ist keine uns bekannte, direkte DALI Steuerung über WLAN existent.
Weiterhin ist uns, unabhängig vom Steuerungs-Bus, kein WLAN-Hardware-Web-Server bekannt, der ein User-Interface zur Leuchten-Steuerung anbietet.

2 Die Idee

Die Idee ist mit einem einfachen, kleinen und preiswerten Adapter, DALI-Leuchten mittels aller Geräte, die über WLAN und einen Browser verfügen und meist bereits vorhandenen sind (Smartphone, Tablets, Notebooks, Rechner, Satellitenreceiver, …), zu steuern.

2.1 Grundsätze

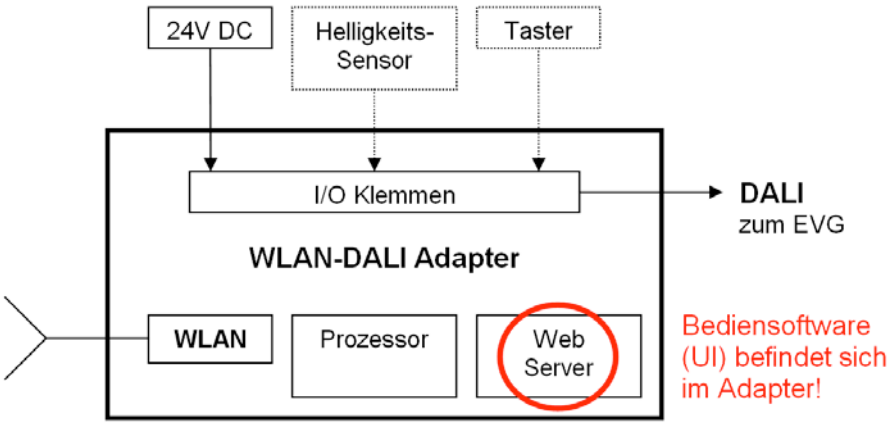


Abb. 1: Schematische Skizze des WLAN-DALI Adapters

Das Gerät soll eine HTML-basierte Leuchtenansteuerung per Smartphone, iPhone oder auch Notebook mittels WLAN ermöglichen. Der WLAN-DALI Adapter hat die Größe zwischen einer Zigaretten- und Streichholzschachtel, ist in die Leuchte integriert und setzt die WLAN Signale direkt auf DALI, zur Ansteuerung von DALI Betriebsgeräten / EVGs, um (Abb. 1).

Die Leuchte, mit integriertem WLAN-DALI-Adapter, kann somit direkt über WLAN angesprochen werden und stellt selber das User Interface (das Bedienungsprogramm) über HTML zur Verfügung (Abb. 2). Es wird keine spezielle Software (außer einem Standard Browser), keine extra Hardware (außer dem WLAN fähigen Endgerät) oder andere Steuerungsprotokolle benötigt.
Die nicht benötigte Softwareinstallation erlaubt eine maximale Auswahl an potentiellen Bediengeräten. Neben klassischen Smartphones oder Rechnern können dies heute auch portable Videospielkonsolen, Satelliten Receiver, Fernseher oder Kühlschränke sein.
Das Bedieninterface wird über den Adapter als HTML Seite zur Verfügung gestellt. Es ist keine Software oder App nötig.
Es werden einfache, trotzdem grafische und farbige HTML Seiten, wie auf einem Router Admin-Menü zur Bedienung verwendet. Auf eine größtmögliche Browser- und Endgeräte-Unabhängigkeit wird geachtet.

Das Bediengerät (also z.B. Smartphone oder Notebook) meldet sich ist auf möglichst einfache Art und Weise an der Leuchte an. Dabei ist denkbar, dass die Elektronik Informationen über die Leuchte und deren mögliche Funktion an das Bediengerät übermittelt. Theoretisch können alle DALI Parameter in beide Richtungen ausgetauscht werden.
Grundsätzlich sind über eine in den WLAN-DALI Adapter integrierte HTML-Seite ein Ein- und Ausschalten sowie das Dimmen der Leuchte möglich. Weitere Funktionen wie z.B. Farbmischungen oder Gruppenzuordnungen sind für die Zukunft denkbar.

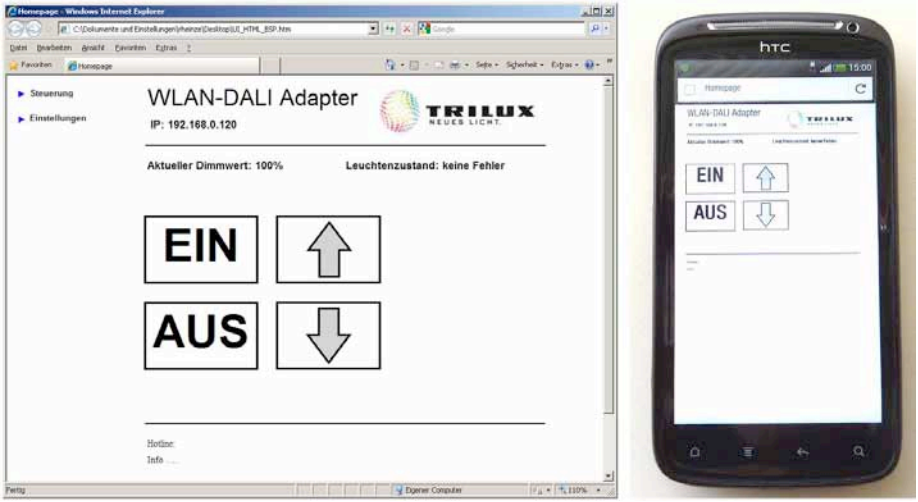


Abb. 2: Beispiel einer Benutzerschnittstelle (User Interface) auf HTML Basis, welches sich bereits fertig in dem Adapter befindet. Links in einem Browser auf einem Computer; Rechts auf einem Android Mobiltelefon

Im ersten Schritt soll eine Einzel-Leuchten-Lösung realisiert werden (integriert in z.B. Standleuchte oder Hängeleuchte) die vom Arbeitsplatz aus steuerbar ist.

Im zweiten Schritt soll darüber hinaus eine Raumsteuerung generiert werden, welche die gesamte Beleuchtung im Raum über eine DALI Strecke steuert. Der WLAN-DALI Adapter ist dazu entweder in einer Leuchte integriert oder separat im Raum installiert.
Per HTML können eine Gruppeneinteilung der Leuchten, sowie die Ansteuerung unterschiedlicher Leuchtengruppen erfolgen.

Es wird angestrebt alle DALI Funktionen und Befehle (bidirektional) über HTML / WLAN nutzbar zu machen.

2.1 Sensor Optionen

Denkbar wäre es auch zusätzliche Sensoren und Komponenten direkt an den Adapter anzuschließen.

Zum Beispiel könnte ein einfacher Helligkeitssensor (Fotowiederstand) zur Tageslicht Konstantlicht-Regelung angeschlossen werden. Die Leuchte dimmt dann selbständig in Abhängigkeit vom Tageslichteinfall rauf und runter. Die Sollwerteinstellung könnte dann auch über das HTML Interface eingestellt werden (im einfachsten Fall ein Button).

Auch gängige Präsenzmelder (HF/Radar oder IR) könnten über Klemmen angeschlossen werden und das Licht bei Abwesenheit von Nutzern selbstständig ausschalten. Einstellungen, wie Sensibilität, Verzögerung oder Mindest-Dimmwert, könnten dann auch via HTML erfolgen.

Durch den Anschluss eines Tasters an dem Adapter in der Leuchte können Grundfunktionen, wie Schalten und Dimmen, erfolgen ohne dass man einen Browser öffnen muss. Damit könnten alle DALI Leuchten direkt und auch ohne WLAN mit einem Dimm Taster im Schutzkleinspannungsbereich erweitert werden.

Mit dem Einschalten der Leuchte wird grundsätzlich die Konstantlichtregelung aktiv. Sobald manuell in die Regelung eingegriffen wird, wird Diese ausgesetzt. Über einen zusätzlichen Button wird die automatische Regelung fortgeführt.

Auch ohne zusätzliche Klemmen bzw. elektrotechnische Anschlüsse am Adapter selber ist es möglich zusätzlich IP Sensoren (Helligkeit, Anwesenheit) und IP Interfaces (z.B. Bedienstellen, Fernbedienungen, Webseiten, Software, ...) zu verwenden. Dann allerdings nur mit zusätzlicher Software.

2.2 Aufwendige Bedienoberflächen

Neben der Basis-Bedienung mittels der durch den Adapter bereitgestellten einfachen (dafür universellen) HTML Seiten, ist es auch möglich aufwendigere und schönere Bedienoberflächen für verschiedene Endgeräte zu entwerfen.

So können Leuchten-Steuerungs-Applikationen (Apps) für iPod, iPhone, iPad, Android, Windows Mobile oder Andere individuell und beliebig aufwendig gestaltet werden.
Die Programme nutzen eine Protokollebene des WLAN-DALI Adapters, die auch einfach über IP angesprochen wird.

Nachteil ist die nötige Softwareinstallation auf den Nutzer-Bediengeräten und die Festlegung auf das jeweilige Betriebssystem.

2.3 Netzwerk Topologie

Der WLAN-DALI-Adapter ist entweder direkt als Access-Point ansprechbar oder in ein bestehendes Netzwerk integrierbar.
Der Nutzer kann mit einem einfachen, handelsüblichen WLAN-Access-Point eigene Netzwerke mit Leuchten, dem Internet und einer beliebigen Anzahl an Bediengeräten (Computern, Smartphones, Tablets, etc.) aufbauen.

WLAN-, Zugangs- und DALI- Einstellungen sind ebenfalls über HTML zu tätigen. Vorbild sind hier Administrations-HTML-Seiten von Routern.

HTML-Seiten bzw. das User-Interface des Web-Servers ist vom Hersteller des WLAN-DALI-Adapters anpassbar und veränderbar (CI und Logo Änderungen, Änderungen an Bedienbarkeit und Funktionsumfang, etc.)

Jeder WLAN-DALI Adapter verfügt über eine eigene feste MAC Adresse und eine zugewiesene individuelle IP Adresse (vom übergeordneten Netzwerk). Somit ist jede Leuchte individuell ansteuerbar.
Die Leuchte kann im einfachsten Fall als IP oder über eine URL als „Webseite“ geöffnet werden. Auf der Leuchten-Webseite (die physikalisch in dem WLAN-DALI Adapter liegt und ähnlich einer Router-Setup-Seite funktioniert) kann über einfache Button und/oder Textfelder die Helligkeit, AUS/EIN, der Sollwert, grundlegende Einstellungen, etc. eingestellt werden.
Auch der aktuelle Status (AUS/EIN, Dimmwert, Lampe defekt, alles was DALI zur Verfügung stellt etc.) kann hier angezeigt werden.

Es können auch mehrere Nutzer gleichzeitig auf die Leuchte (die Webseite) zugreifen. Der zuletzt eingegebene Wert kommt zur Geltung (LTP) und wird (nach einer Aktualisierung der Webseite) allen Nutzern angezeigt.

Über einen simplen Passwortschutz kann der Zugang zu den Leuchten für bestimmte Nutzer erlaubt bzw. verweigert werden (Einstellung über die HTML Webseite).
Weitere tiefere Netzwerkschutzsysteme sind nicht nötig, da die Leuchte nur ein Netzwerk Teilnehmer ist und dessen Schutz mit nutzt (die Administration erfolgt übergeordnet).

2.4 Kommunikation zwischen mehreren Adaptern

Weitergedacht könnte eine Kommunikation zwischen Leuchten / DALI Komponenten über WLAN nützlich sein, um komplexe Steuerungsvorhaben umzusetzen. Dies könnte z.B. auch eine simple Funk-DALI-Strecke sein.

<u>Option 1:</u>
Mit einem WLAN-DALI-Adapter können auch mehrere DALI Leuchten angesteuert werden. Beziehungsweise nachträglich vorhandene Leuchten hinzugefügt werden.
Die Adressierung erfolgt laut DALI-Norm über das Webinterface.

<u>Option 2:</u>
Zusammenfassen von mehreren WLAN-DALI-Adaptern in demselben Netzwerk zu einem gemeinsamen System (Master-Slave).

Zwischen den WLAN-DALI-Adaptern kann eine Master-Slave-Einstellung über das Webinterface ermöglicht werden. Die Steuerung erfolgt nur noch über den Master und die Slaves folgen nach.

Option 3:
Zentrales Steuern von mehreren WLAN-DALI-Adaptern in einem Netzwerk über eine zentrale Software, die eine Adressierung von einzelnen Adaptern und deren DALI-Adressen erlaubt.

Option 4:
Leuchten-Fernwartung über DALI (Zustand, Dimmlevel, Fehlerfall, Leuchtmittel defekt) per Internet, wenn übergeordnetes Netzwerk eine Verbindung ins Internet aufweist.

Option 5:
Eine Kommunikation zwischen zwei WLAN-DALI-Adaptern auf WLAN-Ebene. Damit könnte man DALI-Signale bequem über Funk übertragen (Abb. 3). Administration und Paarung könnte ebenfalls über HTML Seiten möglich sein.

Abb. 3: Skizze einer DALI Funkstrecke mittels zweier WLAN-DALI Adapter

Weitergehend soll auch eine komplexere Steuerung indem sich die WLAN-DALI-Adapter in einem Netzwerk sich gegenseitig erkennen und beeinflussen können. Im einfachsten Falle kann eine Software (App oder Konventionell) alle WLAN-DALI-Adapter im Netzwerk erkennen und Gruppen-Einteilungen erlauben.

Eine ferne Vision ist die gegenseitige räumlich-geometrische Erkennung der Adapter mittels WLAN-Signalpegeldifferenzen in größeren Netzwerken (Räumen mit vielen Leuchten, in der jeweils ein Adapter verbaut ist).
Durch die Stärke des WLAN Signalpegels bzw. über einen Time-Code und deren Verzögerung auf dem Funksignal kann Rückschluss auf die Entfernung geschlossen werden. Wenn man dies mit mehreren Funkstrecken kombiniert, erhält man relative Positionsdaten der einzelnen Adapter.
Diese automatisch gewonnenen Positionsdaten können Bedienoberflächen zur graphischen Anordnung der Leuchten zur Verfügung gestellt werden.
Ich bezeichne diese Idee gerne als Leuchten-WLAN-GPS, da GPS ähnlich funktioniert.

3 Realisierung

Begonnen haben wir nach der Ideen Entwicklung mit dem Bau eines funktionstüchtigen Prototyps, der allerdings keiner Grenze für die Baugröße unterlag.
Der Prototyp (Abb. 4) wurde bereits im Frühjahr 2010 fertig und bewährte sich in realen Testbedingungen. Allerdings ist hier das Webinterface nicht frei und browserorientiert gewesen, sondern starr auf einen ipod Touch bzw. iPhones festgelegt.

Recht früh haben wir eine umfangreiche Patentanmeldung veranlasst. Die Spezifikation und Entwürfe der Protopyen mit den Zielabmaßen sind weitgehend fertig. Nach Fertigstellung von Prototypen werden Funktions- und Softwaretests durchgeführt.

Die Abmessungen (H x B x L) werden bei ca. 21mm x 30mm x 80mm liegen (Abb. 5). Je nach Stückzahlen und Detail-Features sind Preise um die 50€ pro Stück realistisch.

Abb. 4: Foto eines voll funktionsfähigen Prototypes, bei dem die Größenvorgaben zunächst ignoriert wurden

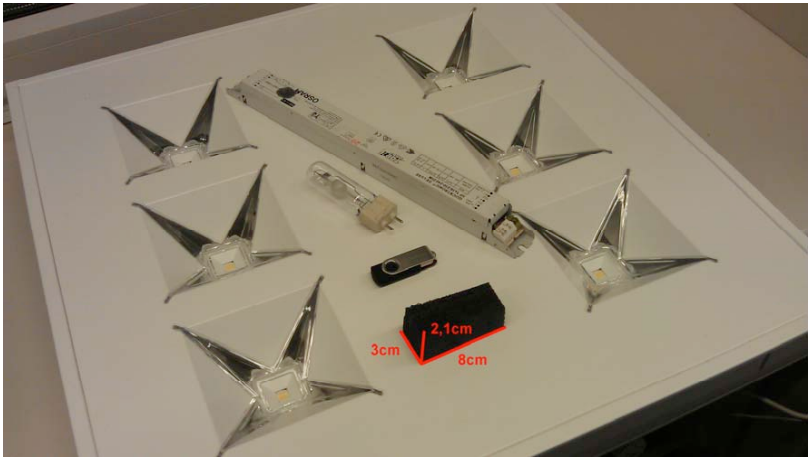


Abb. 5: Foto für einen Größenvergleich: der WLAN-DALI Adapter soll nicht größer als der schwarzen Block werden. Dank moderner kleiner WLAN Module kein Problem.

Lichtwerbung und Leuchtreklame im Wandel der Zeit – Rück- und Ausblick im Überblick

- Anwendungsorientierter Beitrag –

Dr. Rüdiger Hennig, Dipl.-Ing. Yvonne Kern, Dr. Uwe Teichert
NEL Neontechnik Elektroanlagen Leipzig GmbH,
D - 04329 Leipzig, Debyestr. 6, www.nel.de

1. Vorwort

Die Lichtwerbung gehört in Deutschland zu einer kleinteiligen Branche, angesiedelt zwischen Handwerk, Kleinunternehmen und Handel. Der Anteil der Lichtwerbung am Gesamtumsatz der Lichtindustrie beträgt etwa 5%. Diese Zahl kann nur geschätzt werden, da nach der Insolvenz des Fachverbandes für Lichtwerbung im Jahr 2009 keine aktuellen Daten mehr verfügbar sind. Auch von amtlichen Statistiken werden Kleinunternehmen nicht erfasst. Zudem befindet sich die Branche zur Zeit sehr stark im Wandel, resultierend aus der Vielzahl der Entwicklungen in den Bereichen Leuchtmittel (FL, LED, OLED), Kunststoffe (PMMA, PC, PETG – Farbe, Struktur, optische Eigenschaften), Glas, Folien, verschiedensten Verbundstoffen (Compoundmaterialien mit neuartigen Eigenschaften wie z.B. bruchsicheres Glas) usw. sowie neuen Montagemethoden durch Fügen, Kleben, Löten, Schweißen.
Damit haben sich natürlich auch die Freiheitsgrade für den Entwurf und die Planung von Lichtwerbeanlagen ins Unermessliche gesteigert, verbunden mit der Inkompatibilität von Materialien und Methoden in bestimmten Bereichen.
Mit diesen Veränderungen in Technologie und Markt gehen verschärfte Auflagen aus der Politik in den Bereichen Umwelt- und Klimaschutz (Lichtverschmutzung, Quecksilberverbot) und Energieeffizienz einher. Hinzu kommt der ökonomische Druck aus Asien durch entsprechende Dumping-Angebote, insbesondere im Bereich der Leuchtmittel durch die LED. Dabei ist anzumerken, dass die OLED bereits in den Startlöchern der flächendeckenden Markteinführung steht.

2. Frühgeschichte der Lichtwerbung

2.1. Lichtwerbung in der Antike

Licht hatte bereits seit Urgedenken der Menschheit seine Bedeutung nicht nur als Abprodukt des von ihr beherrschten Feuers, sondern auch als Signal für die Ferne. Es wurden Nachrichten für größere Personengruppen über weite Entfernungen weitergegeben.
Bei den alten Ägyptern wurden Geschichten der Herrscher in den Stein gehauen, um für diese bei den Göttern zu werben. Ähnliches treffen wir auch bei weiteren untergegangenen Hochkulturen auf anderen Kontinenten an. Dabei änderte sich unter Umständen das Material des Werbeträgers, aber der Versuch, Informationen und Hinweise weiterzugeben, blieb bestehen
Im antiken Pompeji waren ganze Häuserzeilen durch Alben (lat. Album – Anschlagsfläche) belegt und ein Feuerkorb, Kienspan oder Talglicht erhellte manch Eingang zu einer Taverne oder anderen markanten öffentlichen Gebäuden, wie die Ausgrabungen unterhalb des Vesuvs zeigten. Das Herausschreien und Preisen der Waren und Dienstleistungen (lat. – reklamare) hat bis heute seine Bedeutung für werbliches Tun der Menschen behalten und ähnelt sich in vielen Sprachen.

2.2. Lichtwerbung im Mittelalter

Im Mittelalter, der Zeit der Zünfte und Innungen, gab es einzelne Straßen oder auch ganze Viertel, in denen die Menschen dem gleichen Handwerk nachgingen, wie bspw. im Weberviertel in Potsdam oder Augsburg. Die Chronik der Stadt London weist bereits 1499 darauf hin, dass die Bier-Schilder im entsprechenden Viertel nicht länger als 7 Fuß sein durften, um die Reiter auf der Straße nicht zu belästigen /1/. Es gab bereits die ersten „Diakästen", bei denen mit Hilfe eines Kienspans Transparente aus bemaltem Ölpapier oder Pergament hinterleuchtet wurden.
Im 16. Jahrhundert fertigten Schmiede kunstvolle Ausstecker für Wirts- und Zunfthäuser. Ein betuchter Handwerker oder Händler wollte dem in nichts nachstehen und brachte ähnliche Hinweisschilder am Eingang seines Hauses oder Hofes an. Oftmals sind solche Schmiedearbeiten in alten Städten wie Freiburg im Breisgau, Colmar oder Oberkirch zu bewundern.

2.3. Lichtwerbung in der Neuzeit

Mit der Erfindung der Glühlampe durch Heinrich Goebel, der seinen Verkaufswagen um 1854 damit illuminierte, existierte der erste Vorläufer unserer heutigen Lichtwerbung. Es folgte die industrielle Fertigung der Glühlampe, angestoßen von den Entwicklungen durch Thomas Alva Edison 1879, die zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts mit den Arbeiten von Georges Claude aus Paris zur Gasentladungsröhre mit Edelgasen ihren ersten vorläufigen Höhepunkt erlangte. Dem gingen Arbeiten von Winkler und Geißler in Deutschland, sowie Moore in Amerika voraus.
Um 1920 konnte man die Fertigung von Gasentladungsröhren mit einem Niederdruckplasma unter Verwendung von Kaltkathoden als Handwerk bezeichnen. In dieser Zeit entstanden Kooperationen zwischen Glasbläsern und Meistern des Elektrohandwerkes, die oftmals Ausgangspunkt von heute teilweise noch bestehenden familiengeführten Handwerksbetrieben der Lichtwerbung waren. Um die Lichtausbeute der einfachen Rotentladung (Neon) oder Blauentladung (Neon 25 Vol.%, Argon 75 Vol.%, Quecksilber) zu erhöhen, wurden Leuchtstoffe auf der Innenseite der gebogenen Glasröhren eingebracht. Die Quantenausbeute der Leuchtstoffe wurde und wird auch heute noch systematisch erhöht. Bis zum Beginn des zweiten Weltkrieges standen den Glasbläsern etwa 30 unterschiedliche Farben zur Verfügung.
Nach dem zweiten Weltkrieg stieg die Anzahl der Werbeanlagen explosionsartig an und erreichte 1966 ihren Höhepunkt mit 972.000 lfm /2/ gefertigtem Rohr allein nur in der Altbundesrepublik. Auch am Osten ging diese Entwicklung nicht ganz spurlos vorbei, wie man an den Bildern 1 und 2 sehen kann.
Parallel entwickelten sich die Formen weiter. Es wurde nicht mehr nur das freiliegende Neon verwendet, sondern man baute zunehmend auch Profilbuchstaben mit Spiegeln aus PMMA (unter Handelsnamen wie Plexiglas®, Altuglas®, Perspex® u.a. bekannt), PC (Makrolon®, Lexan®, Piacryl® u.a.), teilweise auch im Verbund mit Folien /3,4/.
In Sonderfällen wie extrem großen Lichtwerbeanlagen wurden aber auch gänzlich andere Leuchtmittel wie die magnetfeldinduzierte Gasentladung verwendet und Lochblech oder Spanntuch als Spiegel vorgesetzt.

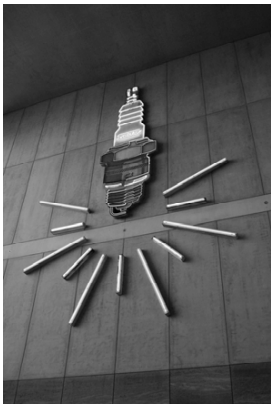


Bild 1.: Messelogo auf dem Wintergartenhochhaus in Leipzig

Bild 2.: Zündkerze im Bildermuseum zu Leipzig

Im letzten Jahrzehnt hielt die LED Einzug in die Lichtwerbung und die OLED steht als erstes Flächenlicht bereits in den Startlöchern für eine Vielzahl industrieller Anwendungen. Damit waren plötzlich andere Bauformen möglich und man war in der Lage, den Wünschen der Architekten nach immer flacheren Lichtquellen nachzukommen. Insbesondere die Kanteneinkopplung spielt sowohl in der Lichtwerbung als auch in der Beschilderung eine zunehmend wichtigere Rolle.
Inzwischen entwickeln sich neben großflächigen LED-Videowänden im Eventbereich verstärkt Bildschirmlösungen für zielgerichtete Werbung, bezogen auf einzelne Gruppen von Konsumenten am point of information und point of sale. Dies ist heute der Bereich des Digital Signage.

3. Grundlagen der Lichtwerbung

3.1. Grundlegendes Funktionsmodell der Lichtwerbung

In Bild 3 wurde versucht, die Vielfalt der Möglichkeiten in der Lichtwerbung auf die technisch relevanten Baugruppen zu reduzieren, um dann die entsprechenden Parameter ableiten und darstellen zu können.
Bei der Lichtwerbung, egal welcher Bauart und Bauform, muss zuerst zwischen der Tag- und der Nachtwirkung unterschieden werden. Zum einen haben wir das Auflicht durch das jeweilige Tageslicht, also eine Tagwirkung, und zum anderen findet man eine Be- bzw. Hinterleuchtung in der Dämmerung und den Nachtstunden, also die Nachtwirkung, vor.
In der Lichtwerbung existieren zwei grundlegende Bauformen:

- das beleuchtete und
- das hinterleuchtete Werbeelement.

Im ersten Fall haben wir eine ähnliche Anmutung wie in der Tagwirkung, vorausgesetzt es wird bei der Beleuchtung ein Leuchtmittel mit tageslichtähnlichem Licht verwendet. Damit ist „nur“ noch die Richtungscharakteristik entscheidend, um unterschiedliche räumliche Wirkungen des Informationsträgers, bedingt durch die Schattenwirkungen zu erreichen.

Im Fall der Hinterleuchtung ist eine Reihe von sehr unterschiedlichen weiteren Elementen zu berücksichtigen:

- den Informationsträger,
- eventuell ein optisches System,
- das Leuchtmittel und
- einen mehr oder minder ausgeprägten Reflektor.

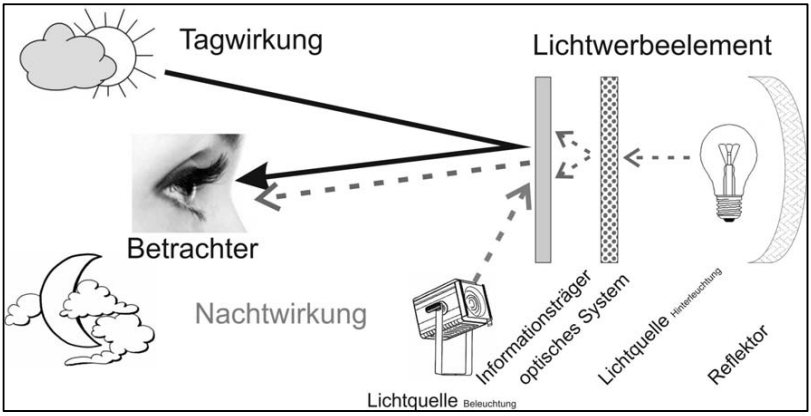


Bild 3.: Funktionsmodell der Lichtwerbung in der Be- oder Hinterleuchtung und seinen daraus resultierenden unterschiedlichen Bauformen mit einzelnen Baugruppen

Ausgehend von den sehr unterschiedlichen Corporate Identities von Kunden, stellt Tabelle 1 versuchsweise die unterschiedlichen Materialien mit den entsprechenden Technologien bzw. Funktionen dar. Dabei wurde der Reflektor dem optischen System zugeordnet.

Informationsträger		Optisches System		Lichtquelle	
Grundmaterial	Oberfläche	Grundmaterial	Funktion	Leuchtmittel	
PMMA	pur	PMMA	Filter	OLED	Industriestandard
PC	foliert	PC	Diffusor	LED	
PETG	bedruckt	PETG	Lichtleiter	Leuchtstoffröhren	
Glas	aufgeraut	Silikon		Leuchtstoffröhren	Handwerk
Metall	angeätzt	Glas			
Spanntuch	poliert				
Lochblech		Farbe	Reflektor		
Holz		Folie			
Folie					

Tabelle 1: Übersicht über die Materialien der Baugruppen, sowie deren Eigenschaften bzw. Funktion

Aus Tabelle 1 wird ersichtlich, dass es bei der Bewertung der Qualität von Lichtwerbeanlagen Parameter geben muss, die einen objektiven Vergleich unterschiedlicher Bauarten und -formen zulassen.

3.2. Elektrische, lichttechnische und betriebswirtschaftliche Parameter

Eine Lichtwerbeanlage wird aus der Erwägung der Energieeffizienz durch die komplette elektrische Leistungsaufnahme gekennzeichnet. Da in diesem Fall das gesamte System betrachtet werden muß, d.h. einschließlich etwaiger Vorschaltgeräte, Dimmer und Steuerungseinheiten, wird die Scheinleistung (S) betrachtet. Diese setzt sich aus der Wirk- (P) und der Blindleistung (Q) zusammen.

Scheinleistung [S] = 1 VA. (1)

Bestimmt werden kann die Scheinleistung über die Messung der Wirkleistung und den cos φ, wobei φ den Winkel der Phasenverschiebung zwischen Spannung und Stromstärke bezeichnet.
Die marginalen Größen der lichttechnischen Parameter sind:

die mittlere Oberflächenleuchtdichte $[\bar{L}] = 1\ cd/m^2$ (2)

mit $\bar{L} = \sum_{i=0}^{i=k} L_i$

die Homogenität $H_1 = \frac{L_{max}}{L_{min}}$ (3)

mit $1 \leq H_1 \leq 1{,}4$ für homogen,

da bei $H_1 > 1{,}4$
das System fleckig oder streifig wirkt

Hinzu kommen die Farbkoordinaten bzw. die Farbtemperatur und der Farbkontrast.

In der Betrachtung der betriebswirtschaftlichen Kosten sind für die Effizienz der Be- bzw. Hinterleuchtung folgende Kostenblöcke interessant:

- Investitionskosten
- Wartungs- und Servicekosten (gerechnet auf eine LD_{80} oder LD_{50})
- Betriebskosten (Verbrauch Elektroenergie)

$$[K] = 1\ €$$

mit $K = \sum_{j=1}^{j=k} K_j$ (4)

Das bedeutet, mit j=1 würden ausschließlich die Investitionskosten miteinander verglichen. Dies entspricht auch der bisherigen Praxis. Betrachtet man hingegen die Fortschreibung der Kosten über das Zeitintervall der Nutzung von technischen Anlagen, so ergibt sich aus (4):

$$K|_{t=const}(t) = \sum_{j=1}^{j=k} K_j\,(t), \quad (5)$$

wobei t die Zeit ist.

Dabei ist in der Lichtwerbebranche nicht von einer mittleren Anlagenlaufzeit zwischen 10 bis 15 Jahren auszugehen, sondern der Wechsel der Corporate Identity erfolgt im Durchschnitt spätestens nach 8 Jahren.

3.3. Effizienz der Lichtwerbung

Ausgehend von Waymouth /5/ stellt sich somit die Frage, welche Oberflächenleuchtdichte der Kunde für einen Euro, bezogen auf die eingesetzte elektrische Systemleistung bekommt. Damit kann folgend aus (1) bis (3) die unmittelbare Effizienz der Investition wie folgt berechnet werden:

$$\eta = \frac{K = \sum_{j=1}^{j=k} K_j}{L * S}. \qquad (6)$$

Außerdem ist die Akkumulation der Kosten über die Gesamtbetriebszeit nach (5) mit t = 8 a bzw. der zu erwartenden Betriebszeit zu betrachten. Die grafische Darstellung ist gegenüber dem Kunden oftmals sehr hilfreich.

4. Entwicklungstendenzen in der Lichtwerbung – ein Ausblick

Aus der heutigen Sicht ergeben sich folgende Tendenzen für die Lichtwerbung:

- Steigerung der Energieeffizienz durch:
  - Einsatz neuer und verbesserter Lichtquellen z.B. OLED
  - Steigerung der Effizienz der Vorschalt- und Steuergeräte
  - Gesamtenergetische Betrachtung einschließlich der energetischen und ökologischen Fußspuren

- Absenkung des allgemeinen Lichtniveaus in Einklang mit sozialen Bedürfnissen wie Sicherheit

- Anpassung der Lichtwerbung an die Bedürfnisse der älter werdenden Gesellschaft

5. Quellennachweis

5.1. Literatur

/1/ Fachverband Lichtwerbung: Lichtwerbung fasziniert, Heidelberg, 1972/73
/2/ G. Gut: Handbuch der Lichtwerbung, Deutsche-Verlags-Anstalt Stuttgart, 1974
/3/ U. Fischer u.a.: Handbuch Lichtwerbung Teil 1, Hansen Neon GmbH, Haselund, 2007
/4/ U. Fischer u.a.: Handbuch Lichtwerbung Teil 2, Hansen Neon GmbH, Haselund, 2010
/5/ J. F. Waymouth: Electric Discharge Lamps, The MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1971

5.2. Bilder

Bild 1 NEL Neontechnik Elektroanlagen Leipzig GmbH
Bild 2 dito

RGB-Licht im Wechselspiel mit Digitaldruck – eine Befragung zum Picto Flat® color art und deren Auswertung

Dipl.-Ing. Yvonne Kern, Dr. Rüdiger Hennig, Dr. Uwe Teichert
NEL Neontechnik Elektroanlagen Leipzig GmbH, D - 04329 Leipzig, Debyestraße 6, www.nel.de

1 Einleitung

Die Lichtwerbung ist eine Branche, in der die visuellen Reize eine primäre Rolle spielen. Neben der Generierung und der Aufrechterhaltung von Aufmerksamkeit sollen aktuelle Produkte je nach Einsatzzweck auch eine Eignung als Stimmungsgeber oder Orientierungsmedium besitzen.
Die Verfügbarkeit von aktuellen Technologien, wie ansteuerbaren RGB-LEDs, wirft die Frage auf, inwieweit Produkte der Lichtwerbung durch deren Einbau aufgewertet werden können. Insbesondere soll ermittelt werden, inwieweit maßgebliche Kriterien wie Werbewirksamkeit, Gefallen und Erkennbarkeit beeinflusst werden.
Zum Gewinn genauerer Erkenntnisse dazu, wie förderlich eine Hinterleuchtung verschiedenster Motive mit farblichen Verläufen für die zielgruppenorientierte Endkundenansprache ist, wurde ein entsprechender Fragebogen erstellt und ausgewertet.

2 Einsatz neuer Technologien in der Lichtwerbung

Neuartige technische Methoden mit entsprechender Eignung für die Lichtwerbung findet man teilweise auf Messen und in Ausstellungen. Sie haben sich jedoch im tagtäglichen Geschäft meist noch nicht durchgesetzt.
In der Praxis muss aber eine einfache und schnelle Auswechselbarkeit der vorgesetzten Werbemotive muss aufgrund der immer kürzer werdenden Zeitabschnitte zwischen aufeinanderfolgenden Kampagnen gewährleistet sein.
Mit der Einführung der LED, insbesondere auch der RGB-LED ist es möglich, größere Flächen (für die Werbung ab A1 und größer) mit sehr geringer Bautiefe (< 20mm) mit Farbwechslern auszustatten.
Ausgehend von vorherigen Produktentwicklungen im Bereich der Kantenbeleuchtung mit weißem Licht zur Darstellung von Logos für Park- und Wegeleitsysteme fand eine Erweiterung des klassischen „Picto Flats®“ um die Möglichkeiten mit RGB-LED-Seiteneinkopplung statt. Der seitliche Einbau der LEDs wird unterstützt durch farblose vorwärtsstreuende Acrylplatten. Innerhalb dieser befindliche kleine Partikel reduzieren die Totalreflexion durch Streuung und bedingen die gleichmäßige Lichtauskopplung an der Oberfläche. Die resultierende deutlich senkrechtere Strahlung und die gesteigerte Helligkeit tragen somit zu einer optimierten frontalen Betrachtung bei. Die Oberfläche leuchtet dabei in der Farbe des Leuchtmittels.
In der Kombination mit modernen Formen des Digitaldrucks (sehr hohe Farbbrillanz, Mehrfachdruck, Weiß-Hinterdruck, Blocker auf den unterschiedlichsten Materialien) können Inhalte sowohl auffällig als auch einprägsam vermittelt werden.

Aufgrund der bekannten psychischen und physischen Empfänglichkeit des Menschen für farbige Reize ist mit einer Wirkungs- und Bedeutungssteigerung durch den Einsatz von RBG-Lösungen zu rechnen.
Ausgehend von Parametern wie dem Abstraktionsgrad des Motivs, dessen Größe oder der Geschwindigkeit des Farbwechsels ist die Art der Beeinflussung von Atmosphäre und Stimmung im Raum lohnenswerter Gegenstand für eine eingehende Untersuchung.

3 Beurteilung von Produktqualität, -eignung und -wirkung

Die übliche Vorgehensweise zur Wirkungseinschätzung von Produkten der Lichtwerbung findet rein subjektiv und ohne numerische Festlegung statt.
Erste Forschungsbestrebungen galten lediglich dem Vergleich be- und hinterleuchteter Bildflächen. Dabei wurde bereits ein Einfluss des Motivs auf die Bewertung des Helligkeits- und Gesamteindrucks vermutet. Untersuchungen zur Kombination von farblich wechselnder Hinterleuchtung mit diversen vorgesetzten Abbildungen und Drucktechniken existierten bisher jedoch nicht.
Eine Befragung von Probanden lieferte erste Hinweise auf optische Erkennbarkeit, Einsatzmöglichkeiten und qualitativ-assoziative Eindrücke zu einer Auswahl von sechs repräsentativen Motiven.
Auch konnten dank dieser Methode Verbesserungspotenziale für den weiterführenden Produktentwicklungszyklus wie bspw. materialtechnische Optimierungsansätze aufgedeckt werden.

Um die visuelle Performanz und die Werbewirkung der Produktvariation des Picto Flat® color art zahlenmäßig zu verankern, wurde ein zweiteiliger Fragebogen konstruiert und später statistisch ausgewertet. Die Aufsplittung der Fragen fand dabei zugunsten der separaten Einschätzung von vorgesetztem Motiv und Gesamteindruck des PictoFlats statt. Als Instrument der Einstellungsmessung bzgl. der Bilder dienten Polaritätenprofile. Die 13 dafür an den Skalenenden gegenübergestellten Gegensatzpaare wurden nach jeweiliger Präsentation für jedes der Motive einzeln abgefragt.
Zur eindeutigen Charakterisierung des Picto Flats® wurden möglichst bezeichnende Variablen definiert. Zur Abfrage im zweiten Teil des Tests wurden zum einen offene Fragen, zum anderen Fragen mit einer 5-Punkt-Likert-Skala als Antwortschema konstruiert. Die beschreibenden Kriterien umfassten dabei die Kategorien der visuellen Performanz, der Werbewirkung, sowie Produktumsetzung und -einsatz.

Zur Präsentation wurde das Picto Flat® vertikal auf Augenhöhe der Versuchspersonen positioniert und die jeweils zu bewertenden Motive abwechselnd vorgesetzt. Zusätzlich zu motivabhängigen und allgemeinen Fragen zum Erscheinungsbild fand ein Durchlauf der gleichen Schwarz-Weiß-Abbildung mit drei verschiedenen Hinterdruckungstechniken statt. Die unterschiedlichen Kombinationen mit wahlweise blicktdichtem oder transluzentem Schwarz, mit weißer Unterlegung oder dem im einfachsten Falle transparenten Grund wurden dafür nacheinander vorgeführt.

Abb. 1 und 2: Verwendung diverser Motive

4 Ergebnisse der Befragung

Die Größe des verwendeten Motivs spielt eine maßgebliche Rolle für die Rezeption. So wird mit der Größenzunahme des Picto Flats® auch die empfundene Wirkung gesteigert.
Wichtige Kriterien sind zudem der Detail- und Kontrastreichtum des Bildes, sowohl die ausgestrahlte Ruhewirkung als auch die Lebendigkeit, die Neutralität und die Perspektive in der Abbildung. Einigen Motiven scheint eine bessere Eignung für das Zusammenspiel mit dem Farbwechsel innezuwohnen, da sich ihre Ausstrahlung so noch weiter verstärkt und sie imposanter oder stilvoller wirken lässt.
Die Unterlegung mit zum Motivcharakter passenden typischen Leuchtfarben wird als angenehm eingestuft. Jüngere Testpersonen empfinden komplett realistisch gehaltene Motive und dazugehörige Farben hingegen oftmals als zu herkömmlich. Eine stärkere Reizwirkung kann man ungewöhnlichen Motiv-Farbkombinationen oder der Verwendung stark gesättigter Farbtöne zuschreiben.
Großen Anklang finden Darstellungen, die durch persönliche Erfahrungen oder beobachtete Naturschauspiele vertraut sind. Die positivste Wertung erhielt das klassische Bild eines Schiffs, das seine Ausdruckskraft aus besonderer Klarheit und Plastizität zieht. Die hier durch die bunte Hinterleuchtung unterstützte Darstellung der Naturgewalt erzeugt Spannung. Andererseits gefallen aber auch jene Motive, die aus dem Zusammenhang gerissen werden oder aber in einer nicht alltäglichen Form auftreten. Verantwortlich für den Verfremdungseffekt ist hierbei die außergewöhnliche farblich changierende Hinterleuchtung. Eine durch einige Farbtöne hervorgerufene stark künstliche Anmutung oder sehr abstrakte Motive werden jedoch eher kritisch beurteilt.

Abb. 3: Favorisiertes Motiv „Schiff“

Die in der Lichtwerbung bekannte Minderung der Lesbarkeit einiger Leuchtschriften aufgrund ihrer Farbgebung äußert sich auch beim Picto Flat® color art in der Bemängelung der verschlechterten Detailerkennbarkeit bspw. bei einer blauen Hinterleuchtung.
Auch die Glanz- und Reflexionserscheinungen auf der Oberfläche werden insbesondere von älteren Testpersonen als störend empfunden. Eine matte Oberfläche zugunsten der Reduktion von Spiegelungen und der besseren Erkennbarkeit wird jedoch auch aus dem ästhetischen Empfinden heraus abgelehnt.
Die Lichtintensität wird als angemessen eingestuft, auch wenn die Option der Dimmbarkeit als Zusatzfunktion vorgeschlagen wurde.
Als kontrastreiche und ansprechendste Drucktechnik geht eine weiße Hinterlegung mit transluzentem Schwarz klar hervor.

Abhängig von der Frequenz des Farbwechsels, dem Motiv und dessen Größe besteht eine Tauglichkeit sowohl für die atmosphärische als auch für die akzentuierte Beleuchtung. So eignen sich ruhige und größere Motive kombiniert mit gedämpften und unauffälligeren Farbspielen eher zur atmosphärischen, unruhigere und kleinere Bilder zur akzentuierten Beleuchtung. Ideen bzgl. des erweiterten Produkteinsatzes reichen von segmentartig zusammengesetzten Lichtwänden bis hin zur Aufhängung mehrerer Picto Flats® mit unterschiedlich programmierten Sequenzen.

Zur Nutzung für Leitzwecke bedarf das Picto Flat® zur besseren Erkennbarkeit einer Reduktion der Reflexionen. Da Orientierungsmittel einfach, konstant und klar strukturiert sein sollen, sollten die Motive weniger komplex gehalten sein als die bei der Befragung verwendeten. Grundsätzlich weisen die durch den Sequenzer geschaffene Dynamik und die frei wählbaren Farben dank ihrer Auffälligkeit jedoch großes Potential für Richtungsweisung und Warnung vor Gefahren auf.
Das Picto Flat® wäre als Werbemittel in einer Einkaufsumgebung relativ gut aufgefallen und wird als eher einprägsam empfunden. Auch die Eignung zur Generierung von Identität bzw. eines Images und die Vermittlung von Produkt-/Firmencharakteristiken wird von den Probanden bescheinigt.

5 Fazit

Das farbige LED-Flächenlicht hat sich als adäquates Mittel zur Wirkungs- und Bedeutungssteigerung von Werbemotiven erwiesen. Beeinflussung und Unterstreichung von Atmosphäre und Stimmung oder die Setzung von Akzenten ist dank des Farbwechsels an unterschiedlichsten Einsatzorten, ob im Innen- oder Außenbereich, möglich. Eine Eignung besteht somit vorrangig als dekoratives Element.
Für eine gezielte Rezipientenansprache bedarf es jedoch weitergehender Forschung zur besseren Wirkungseinschätzung bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten des Farbwechsels und zu Auswahl und Abfolge der einprogrammierten Farbtöne.

Abbildungen

1. Privatfoto R. Hennig, Rosarium Sangerhausen, 2010
2. Darstellung R. Hennig, Mandelbrot Fractal Generator 2.0
3. NEL Neontechnik Elektroanlagen Leipzig GmbH, Debyestr. 6, D - 04329 Leipzig

Was sagt die SLG zu Abschaltungen in der Strassenbeleuchtung?

Jörg Imfeld, El.-Ing.HTL, Vorsitz SLG-Fachgruppe 51 Strassen und Plätze, 3000 Bern

Im Zuge des Energiesparens werden öffentlichen Beleuchtungen vielerorts teilweise oder ganz abgeschaltet. Die steigende Energie-Effizienz der LED's boomt: Bereits sind einige Gemeinden dazu übergegangen, LED-Strassenleuchten in ihr Sortiment aufzunehmen. Gleichzeitig nehmen aber auch Fragen allgemeiner Art zu, Gemeinden wollen wissen, wo noch wie beleuchtet werden soll. Welche Normen und Empfehlungen gibt es, wer ist dafür zuständig? Wie soll z.B. mit dem Thema Sicherheit, besonders an Fussgängerüberwegen, umgegangen werden? Das öffentliche Interesse an der Strassenbeleuchtung ist gestiegen, es vergeht kaum ein Tag, wo nicht irgendwo ein Artikel darüber zu lesen ist. Die folgenden Ausführungen beleuchten die Arbeit der Schweizer Licht Gesellschaft, die sich aktiv mit Themen rund um die öffentliche Beleuchtung beschäftigt.

1 Die Schweizer Licht Gesellschaft SLG

Die Schweizer Licht Gesellschaft SLG, mit Sitz in Bern, hat sich zur Aufgabe gestellt, das Kompetenz-Zentrum für sämtliche Belange des Lichtes in der Innen- und Aussenbeleuchtung zu sein. Neben Normierungsarbeiten und Durchführen von Kursen und Tagungen gehört auch die Kooperation mit Behörden und anderen Fachverbänden und Organisationen zu den Tätigkeiten. Die einzelnen Lichtbereiche werden durch die Fachgruppen behandelt. Die Fragen rund um die Anforderungen und Anwendung des Lichts in diesen verschiedenen Bereichen, energetische, gestalterische Aspekte und vieles mehr werden darin aufgenommen und bearbeitet. Daraus resultieren die Normen, Richtlinien und Empfehlungen für Planer und Anwender des Lichts. Dieses Wissen wird durch verschiedene SLG-Lichtkurse und Tagungen verbreitet. Mittelfristig ist eine neue Berufsprüfung „SLG-Lichtplaner" mit eidgenössischer Anerkennung geplant.

2 Die Fachgruppe Strassen und Plätze

ür den Bereich öffentliche Beleuchtung ist die Fachgruppe „Strassen und Plätze" zuständig. Die Aufgaben dieser Fachgruppe sind vielfältig. Ursprünglich beschäftigte sie sich mit der reinen Normierungsarbeit rund um Strassen, Plätzen und Wegen. Seit Anfang der 90-er-Jahre ist das Thema Energie ein wichtiger Bestandteil dieser Fachgruppe: 1994 kam die erste SLG-Empfehlung mit Leistungs- und Energiegrenzwerten heraus. Einmal als Bestandteil der Energieverordnung gedacht bildete die Empfehlung SLG 450/1994 die Grundlage für viele Sanierungen in der Schweiz, vielerorts wurde von den ineffizienten Quecksilber- auf die effizienteren Natriumlampen umgestellt. 2008 wurden diese Grenzwerte angepasst und im Dokument SLG 450a/2008 veröffentlicht.
Gleichzeitig kam 2005 die EN-Norm 13201 in vier Teilen heraus, die automatisch auch in der Schweiz gültig wurde und die alte SN-Norm ablöste. Die Anforderungen und Anwendung der Beleuchtungsklassen in verschiedenen Situationen unterschied sich teilweise deutlich von der alten Norm. Die Fachgruppe erarbeitete die Richtlinie SLG 202 als Ergänzung zur SN EN13201, in der viele Begriffe erklärt, Interpretations- und Anwendungshinweise genannt werden und ergänzende Informationen vorhanden sind. Als Beispiel ist die Beleuchtung von Fussgänger-Überwegen zu nennen, dies wird in der Norm EN13201 nur vage behandelt. Abb.1 gibt einen Überblick über die zugehörigen Normen und Empfehlungen der Fachgruppe.

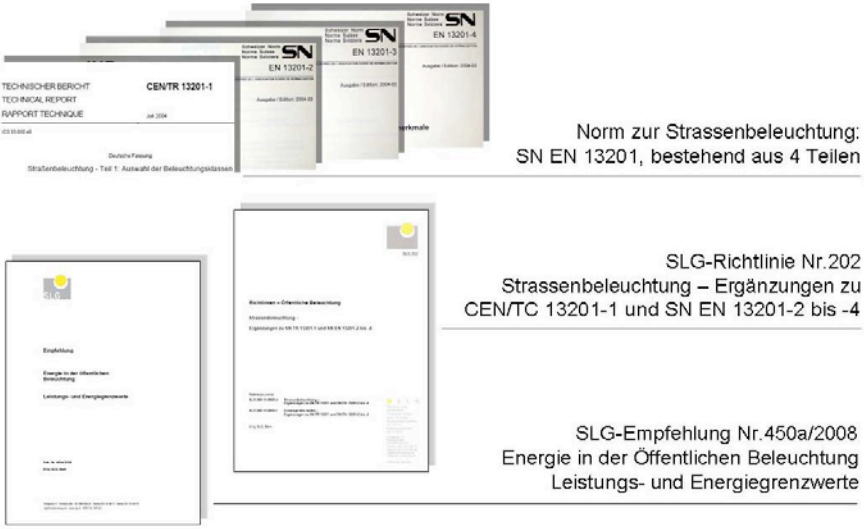


Abb.1: Normen und Empfehlungen im Zuständigkeitsbereich der SLG-Fachgruppe 51

3 Viele neue Fragen im Bereich der öffentlichen Beleuchtung

Der energetische Aspekt wird immer wichtiger. Ab Frühling 2015 dürfen per Verbot keine Quecksilberlampen mehr in den Markt gebracht werden, was noch an einigen Orten für Handlungsbedarf sorgt. Auf europäischer CEN-Ebene wird an der Überarbeitung der EN13201 und an einem fünften Teil „Energie“ gearbeitet. Durch den Einzug der LED in die Strassenbeleuchtung bekommt dieses Thema erst recht Schub: Bereits dieses Jahr hat die LED die Effizienz der Natriumlampen eingeholt und setzt nun zum Überholen an. Der Umstieg von Quecksilber direkt auf LED bietet sich an den Orten an, wo noch vergleichsweise viele Quecksilberlampen im Einsatz sind – sofern das notwendige Budget vorhanden ist. Die Arbeitsgruppe rund um topstreetlight.ch (ehemals topten) erarbeitet seit 2007 Empfehlungen zur Effizienzsteigerung in der Strassenbeleuchtung. Ein weiterer Aspekt ist die Steuerung: Dort, wo noch keine Beleuchtungsreduktion über die Nachtstunden vorhanden ist, macht man sich Gedanken zur Steuerung der Strassenbeleuchtung. Soll nachts gar abgeschaltet werden? Oder nur reduziert? Wann soll dies sein und welche Strassen? Die Lichtimmission wird ebenfalls zunehmend thematisiert: War man früher froh, noch etwas Restlicht der Strassenbeleuchtung im Garten zu haben, um die eigene Haustüre zu finden stört man sich heute meistens daran. Was sagen die Normen dazu, welche Massnahmen gibt es hier, was ist vernünftig? Wie steht es mit anderen Fragen rund um dieses Thema? Beim Thema Abschalten tauchen aber auch Sicherheitsfragen auf: Was ist mit den Fussgängerstreifen? Welche Bereiche eines Ortes oder eines Quartiers können abgeschaltet werden und sollen wie lange dunkel bleiben? Diese Fragen und noch einige mehr zeigen: Es wird zunehmend komplexer in der Strassenbeleuchtung, die Herausforderungen in der Fachgruppe nehmen zu.

4 Wirksame Arbeit der Fachgruppe

Eine Fachgruppe kann nur wirksam arbeiten, wenn sie in verschiedener Hinsicht getragen wird:

- Kompetente Mitglieder aus Industrie- und Anwenderseite, die sich professionell mit der Materie auseinandersetzen
- Möglichst breite Vertretung aus verschiedenen Sprachregionen
- Genügend Kapazität durch viele Mitglieder
- Bereitschaft der Mitglieder zur Mitarbeit an verschiedenen Themen
- Konstruktive Verbindungen mit Verbänden und Institutionen, die ähnliche Themen behandeln
- Konzentration aller Themen durch Aufteilung in kleinere, effiziente Arbeitsgruppen
- Verbreitung durch Internet, Kurse, Tagungen und andere Kommunikationswege

Die Verbindungen und Vernetzung der Fachgruppe werden immer wichtiger, da sich bereits viele andere Verbände und Institutionen mit Licht-Themen befassen. Das Engagement der Fachgruppe beschränkt sich somit nicht nur auf die eigenen Aktivitäten, sondern wird auch an anderen Orten gefragt. Arbeiten ausserhalb der SLG müssen durch einzelne Arbeitsgruppen begleitet werden, die Inputs aus diesen externen Tätigkeiten fliessen wiederum in die Fachgruppe ein. In Abb.2 sind die Verbindungen dargestellt.

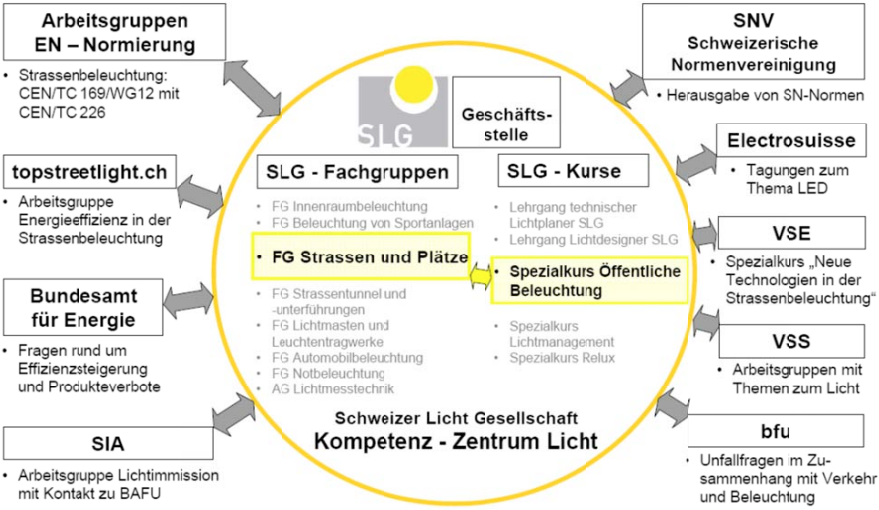


Abb.2: Verbindungen der SLG-Fachgruppe 51

5 Die Arbeitsgruppen innerhalb der Fachgruppe „Strassen und Plätze“

Durch die Themenvielfalt ist es nicht mehr möglich, in einer einzigen Fachgruppe alles bearbeiten zu können. Die Themenvielfalt und Intensität der einzelnen Themen hat

deutlich zugenommen, nicht zuletzt auch dadurch, dass das öffentliche Interesse an der Strassenbeleuchtung gestiegen ist. Das bedeutet: Viele Spezialisten mit viel Kapazität sind gefragt. So drängt sich eine Neu-Organisation der Fachgruppenarbeit durch Neugründungen von Arbeitsgruppen auf. Diese neuen Arbeitsgruppen erarbeiten Vorschläge, Empfehlungen und Stellungnahmen, die der ganzen Fachgruppe vorgelegt werden und anschliessend genehmigt werden müssen. Folgende Schwerpunkte werden in den Arbeitsgruppen gesetzt:

5.1 Arbeitsgruppe CEN

- Einsitz in der europäischen CEN-Arbeitsgruppe
- Weiterleiten von Inputs aus der FG an die CEN
- Aufarbeitung von Entwürfen, Vernehmlassungen, Stellungnahmen der CEN
- Weiterleiten und Rapportieren an die FG und an einzelne Arbeitsgruppen

5.2 Groupe Travaille Romandie

- Tätigkeiten zu allen Themen in der Westschweiz
- Erarbeitung von Vorschlägen für SLG-Richtlinie 202 und zu anderen Themen
- Vorschläge und Inputs für die anderen Arbeitsgruppen und für FG Kandelaber
- Übersetzungen der Dokumente ins Französische
- Verbindung zur französischen Licht-Gesellschaft afe

5.3 Arbeitsgruppen Energie

- Überarbeitung der Grenzwerte SLG-Empfehlung.450a/2008
- Schnittstelle zu den CEN-Bestrebungen
- Schnittstelle zu topstreetlight.ch und deren Aktivitäten

5.4 Arbeitsgruppe Normierung / SLG202

- Inputs für CEN-Gruppe zum Thema Normierung
- Arbeit an den Umsetzungen der EN- Normen
- Arbeit am Thema Sicherheit an Fussgänger-Überwegen
- Überarbeitung und Ergänzung der SLG-Richtlinie 202
- Verbindungen zu VSS und bfu

5.5 Arbeitsgruppe LED

- Erstellen von Ausschreibungsunterlagen zum Thema LED in der Strassenbeleuchtung
- Erarbeitung von Empfehlungen
- Bereitstellung von Daten für Arbeitsgruppe Energie
- Beobachtung und Trends

5.6 Arbeitsgruppen Ausbildung

- Arbeit und Aktualisierung des SLG-Kurses öffentliche Beleuchtung
- Einfliessen von Themen aus anderen Arbeitsgruppen
- Mitarbeit an Tagungen und externen Ausbildungskonzepten
- Verbindung zum VSE-Kurs

Die Arbeitsgruppen werden durch Fachgruppenmitglieder geführt und bestehen zum grössten Teil aus Mitgliedern aus der Fachgruppe. Nach Bedarf können weitere Experten und Fachpersonen aus der Branche hinzugezogen werden. Alle Arbeitsgruppen existieren und arbeiten bereits intensiv an ihren Themen. Abb.3 zeigt die Verbindungen der Arbeitsgruppen.

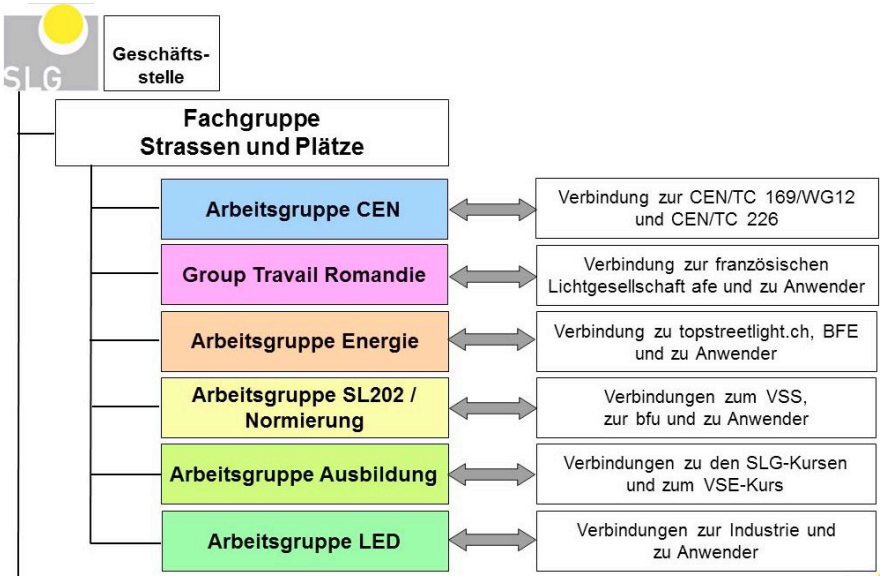


Abb.3: Verbindungen der einzelnen Arbeitsgruppen

6 Arbeitsweise

Die Fachgruppe ist das Steuerungs-Kommittée und erteilt die Aufträge an die einzelnen Arbeitsgruppen. Es stimmt bei Vernehmlassungen ab und bleibt damit das oberste Gremium. Drei Mal pro Jahr finden Sitzungen statt, vor jeder FG-Sitzung müssen die Arbeitsgruppen ihre Vorschläge und Vernehmlassungen der ganzen Fachgruppe einreichen, siehe dazu Abb.4.

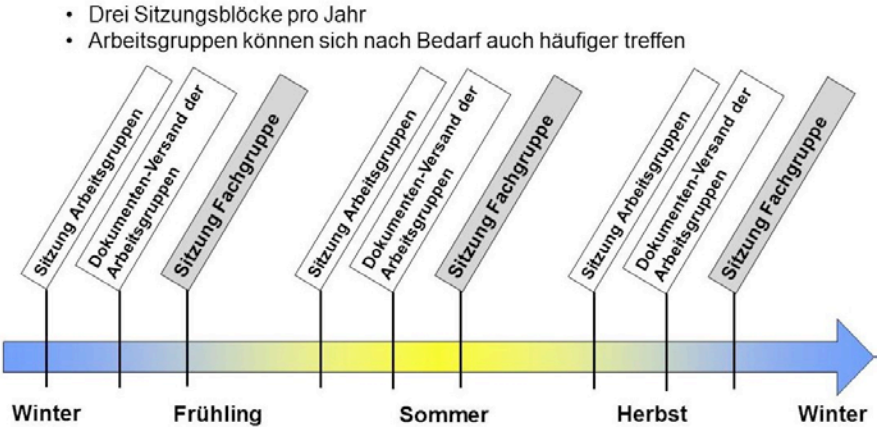


Abb.4: Arbeitsweise der Fach- und Arbeitsgruppen

7 Ausblick: Durch Kompetenz, Engagement und Vernetzung vorwärts

Die Erfahrungen der letzten Zeit zeigen: Nur durch hohe Kompetenz, starkes Engagement und Vernetzung zu anderen Verbänden und Institutionen können die immer komplexer werdenden Themen und Fragen bewältigt werden. Beispiel LED: Durch den Einzug der LED in die Strassenbeleuchtung ist ein Technologiewandel im Gange, das Wissen muss ständig aktualisiert werden. Hat man früher von der immer gleichen konventionellen Technik und deren Anwendung gesprochen, verändert sich die elektronische Technologie laufend. Aus einer jahrelangen statischen Haltung muss nun eine neue Dynamik entwickelt werden. LED lässt sich in der öffentlichen Beleuchtung ganz verschieden anwenden, deren Möglichkeiten und Systeme sind viele. Die Erarbeitung von Ausschreibungsunterlagen und Empfehlungen zum Einsatz der LED ist nur ein Beispiel der vielen Aufgaben in der neu organisierten Fachgruppe.

LED LichtEmpfindlichkeit aDe ?
Strahlungsphysikalische und konservatorische Aspekte bei der Beleuchtung von Objekten.

Werner Jordan, Werner Halbritter, Ulrich Binder und Walter Steudtner
OSRAM AG
Central Laboratory for Light Measurements
Hellabrunnerstraße 1
81543 München

1 Vorbemerkung

Der "Zahn der Zeit nagt an allen Materialen", d. h. alle Materialen verändern sich mit der Zeit, es ist nur eine Frage des Zeitmaßstabes und der Umweltbedingungen. Dabei sind Materialen unterschiedlich beständig, mineralische und metallische Gegenstände sind beständiger als Gegenstände aus organischen Substanzen.
Besonders auffällig sind Veränderungen natürlich bei Objekten/Materialien, die entsprechend unseres Zeitempfindens rasch vor sich gehen und bei denen man einen Vergleich zu unveränderten Vergleichsproben hat oder deren Neuzustand in der Erinnerung präsent ist.

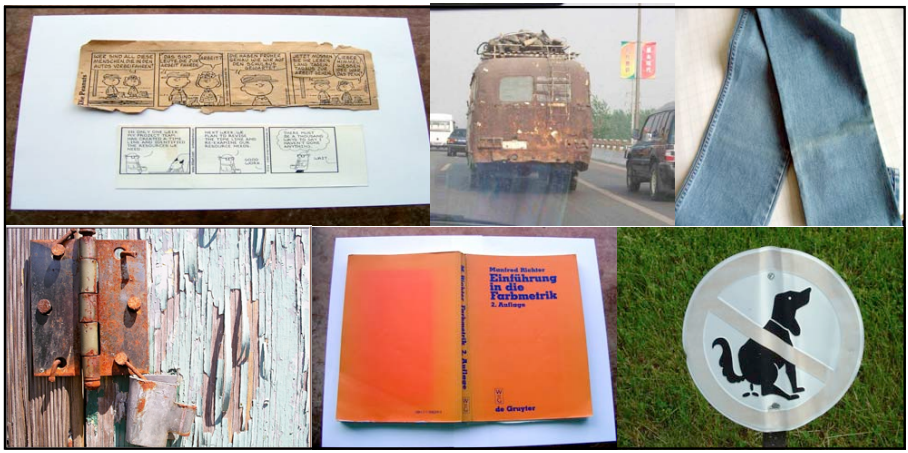


Abb1.: Offensichtliche und im Alltag zu beobachtende Materialänderungen

In den nächsten Abschnitten werden kurz Erkenntnisse aus dem konservatorischen Bereich [1,5,6] und aus technischen Reports der CIE [2, 3] zusammengestellt, um darauf aufbauend zu qualitativ und quantitativ wertenden Aussagen zur Schädigungswirkung von Lichtquellen zu kommen. Besonderes Augenmerk wird auf das konservatorische Potenzial der LED-Technologie für die Allgemeinbeleuchtung gelegt.

2 Schädigungsprozesse

Wenn wir nichts tun, d. h. keine Energie aufwenden, nimmt die Entropie zu, demzufolge streben Materialen ohne unser Zutun dem energetisch niedrigsten Zustand, also dem einer größtmöglichen „Unordnung" zu.

Schädigungsprozesse treten immer und überall auf, besonders bemerkt werden diese jedoch bei Objekten, welche eine große Aufmerksamkeit erfahren, z. B. bei musealen Objekten, Ausstellungsware in Verkaufsräumen und bei wertvollen und liebgewonnenen Gegenständen unseres persönlichen Gebrauchs.

Wichtige Einflussparameter aus konservatorischer Sicht dafür sind [1]:

- Feuchte und Temperatur
- Druck
- Luftverschmutzung
- mechanische Beanspruchung
- Strahlung (Licht)
- Bewitterung

Alle diese Einflüsse können – je nach Material – die biologische Zersetzung bzw. die chemische Umsetzung beeinflussen. Und meistens ist nicht nur ein Einflussparameter ausschlaggebend, beziehungsweise sind auch schon durch den Herstellungs- oder Bearbeitungsprozess von Materialen schon „Schädigungskeime" implementiert (besonders in der Kunststoffherstellung und - bearbeitung).
Schädigungsreaktionen werden durch thermische und/oder strahlungsphysikalische Energiezufuhr gestartet, wobei Feuchte (ionische Prozesse), Verschmutzungen (katalytische Prozesse) und mechanischer Stress beschleunigend wirken.

Ein gut bekannter, häufig auftretender Schädigungsmechanismus ist der chemische Prozess der Autooxidation, einer Reaktionskette mit radikalischem Start (durch ein Initiatorradikal I•) und einer anschließenden Kettenreaktion, an der auch der normalerweise immer verfügbare Luftsauerstoff beteiligt ist:

Allgemeine Beschreibung der Autooxidation

Kettenstart :

$RH + I^{\bullet} \rightarrow R^{\bullet} + IH$ **mit I• als Initiatorradikal**

Kettenfortsetzung :

$R^{\bullet} + O_2 \rightarrow ROO^{\bullet}$

$ROO^{\bullet} + RH \rightarrow ROOH + R^{\bullet}$

Verzweigung :

$ROOH \rightarrow RO^{\bullet} + OH^{\bullet}$

$RO^{\bullet} + RH \rightarrow ROH + R^{\bullet}$

$OH^{\bullet} + RH \rightarrow H_2O + R^{\bullet}$

Kettenabbruch / Reaktionsende :

$R^{\bullet} + R^{\bullet} \rightarrow$

$ROO^{\bullet} + ROO^{\bullet} \rightarrow$ **jeweilige Endprodukte**

$R^{\bullet} + ROO^{\bullet} \rightarrow$

usw.

Abb 2.: Prozess der Autooxidation (schematisch) [1]

Für einen photochemischen Reaktionsstart durch Strahlung gilt natürlich, dass, je kurzwelliger (energiereicher) die Strahlung ist, desto wahrscheinlicher ist das Eintreten einer entsprechenden Startreaktion. Auch Licht (sichtbare Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen 360 nm und 830 nm) kann photochemisch ausreichende Energie zur homolytischen Spaltung von Verbindungen zur Verfügung stellen.

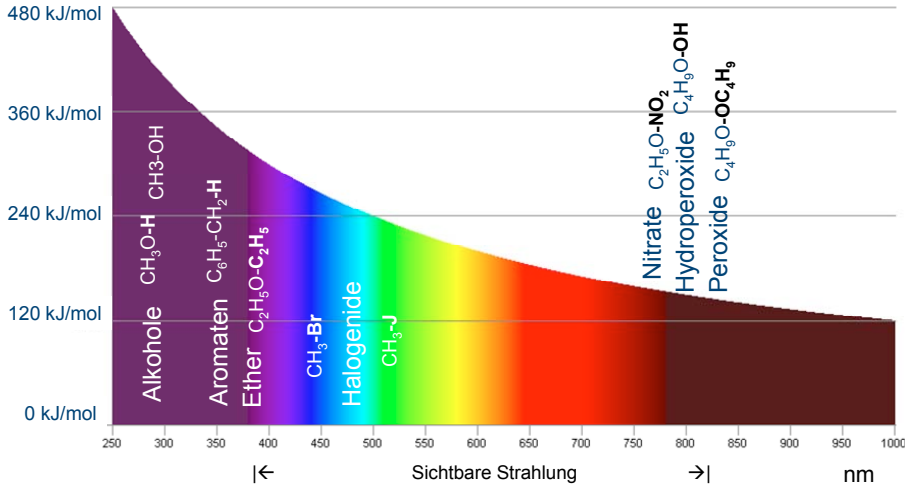


Abb 3.: Zuordnung von Bindungsenergien und Wellenlängen im UV-, VIS- und IR Bereich

3 Schädigung durch Licht / optische Strahlung

Wenn man sich nur auf die Schädigung von Objekten durch Licht respektive optische Strahlung beschränkt und andere Parameter konstant hält beziehungsweise deren Einfluss ausschließt, so sind die maßgeblichen Einflussgrößen:

- Die spektrale Empfindlichkeit des Materials/Objektes
- Die spektrale Zusammensetzung des Lichtes bzw. der optischen Strahlung
- Die Beleuchtungs- bzw. die Bestrahlungsdauer
- Die Belichtung bzw. die Dosis

Prinzipiell gilt, dass für eine bestimmte Strahlungs-/Lichtquelle die Objekt-Exposition die Integration über die Bestrahlungsstärke und die Bestrahlungsdauer ist. Dabei wird das Bunsen-Roscoe Gesetz der umgekehrten Proportionalität für das Setzen eines Schadens angewendet, wobei die relative spektrale Empfindlichkeit bezüglich der Schädigung mit zu berücksichtigen ist:

$$E_{dm} = \int_{\lambda} E_{e,\lambda} \cdot s(\lambda)_{dm,rel} \cdot d\lambda$$

$E_{e,\lambda}$ spektrale Bestrahlungsstärke in W/m²

$s(\lambda)_{dm,rel}$ relative spektrale Empfindlichkeit des Objektes bezüglich der Schädigung

und

$$H_{dm} = \int_{t} E_{dm} \cdot dt$$

= effektive Bestrahlung (Dosis),

die eine gerade unterscheidbare Farbänderung ΔE^*ab

im direkten visuellen Vergleich mit einem gleichen, unbestrahlten Objekt hervorruft

Die durch fotochemische Reaktionen hervorgerufenen Materialänderungen sind am offensichtlichsten, wenn es sich um Farbänderungen wie Ausbleichen, aber auch Dunkelung, Änderung des Farbtons und Vergilbung handelt. Weitere, schon weiter fortgeschrittene Schädigungseffekte sind dann auch der Verlust von mechanischer Stabilität, Trübung (bei transparenten Objekten) und Brechen von Oberflächen.
Hinweis: Die letztgenannten Schädigungsmanifestationen können aber auch durch thermische Belastung verursacht sein.
Für Objektpräsentationen (in Museen, für Verkaufsbereiche, für Repräsentationsräume etc.) ist die zu erwartende, mögliche Farbänderung von Objekten als ein wichtiges Gütekriterium der Beleuchtung zu betrachten. Die Farbänderung wird durch die Farbdifferenz ΔE^*_{ab} im CIELAB Farbsystem beschrieben [3], wobei der gerade wahrnehmbare Farbunterschied $\Delta E^*_{ab} = 1$ zur Definition der dazu notwendigen effektiven Schwellenbestrahlung H_{dm} benutzt wird. Da eine Farbänderung in einen „stabilen" Endzustand übergehen kann (keine weitere Farbänderung durch weitere Bestrahlung, siehe Abbildung 4) erhöht sich für bereits „vorbestrahlte" Objekte die Schwellenbestrahlung $H_{s\text{-}dm}$ mit der Vorbelastung des Objekts.

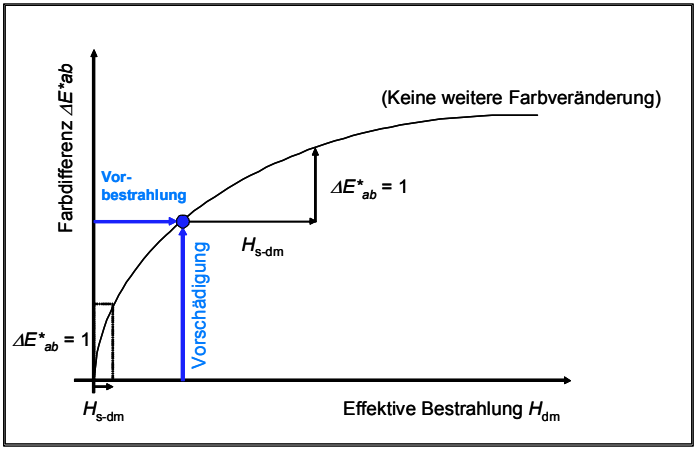


Abb. 4.: Abhängigkeit der Farbdifferenz ΔE^*_{ab} von der effektiven Schwellenbestrahlung $H_{s\text{-}dm}$, beziehungsweise Einfluss einer Vorbelastung durch Bestrahlung

4 Beschreibende Modelle

Bereits 1953 beschreibt Harrison [4] ein Modell und führt einen „Damage Index“ für optische Strahlung ein, der schädigende Wirkung für Ausstellungsobjekte quantifizieren soll. Cuttle [5] reduziert ähnliche Überlegungen auf eine generelle energetische Betrachtung für optische Strahlung. Doch erst das sogenannte Berlin-Modell [2, 3] findet eine breitere Zustimmung und Anwendung. Hier wird für konservatorisch interessante Materialen die relative spektrale Schädigungsempfindlichkeit $s(\lambda)_{\mathrm{dm,rel}}$ – basierend auf experimentellen Untersuchungen– Modell mäßig für den Wellenlängenbereich von 300 nm bis 700 nm beschrieben.

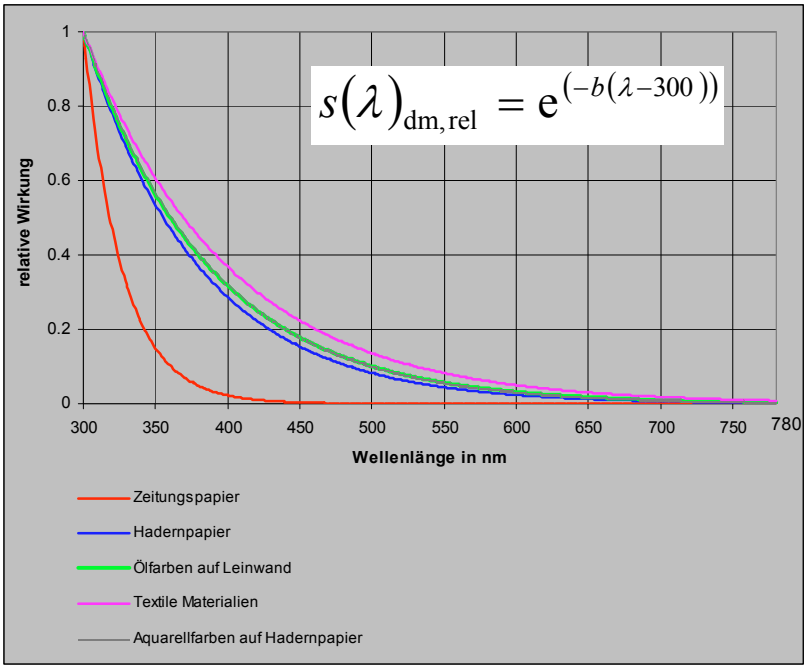


Abb. 5.: Relative spektrale Schädigungsempfindlichkeit $s(\lambda)_{\mathrm{dm,rel}}$ für verschiedene konservatorisch interessante Objekte

Nachstehende Tabelle listet die effektive Schwellenbestrahlung für bestimmte Materialen und die zugehörige Materialkonstante „b“ für die Berechnung von $s(\lambda)_{\mathrm{dm,rel}}$ auf [2].

	Zeitungspapier	Hadernpapier	Öl auf Leinwand	Textilien	Aquarellfarbe auf Hadernpapier
$H_{\mathrm{s\text{-}dm}}$ (Wh/m²)	5	1200	850	290	175
b	0.038	0.0125	0.0115	0.0100	0.0115

Mit diesem Werkzeug/Modell und den oben dargelegten Vorstellungen und Annahmen ist es nun möglich, die schädigende Wirkung von Lichtquellen auf einige Materialen quantitativ abzuschätzen, um so einen Vergleich und eine Bewertung heute üblicher

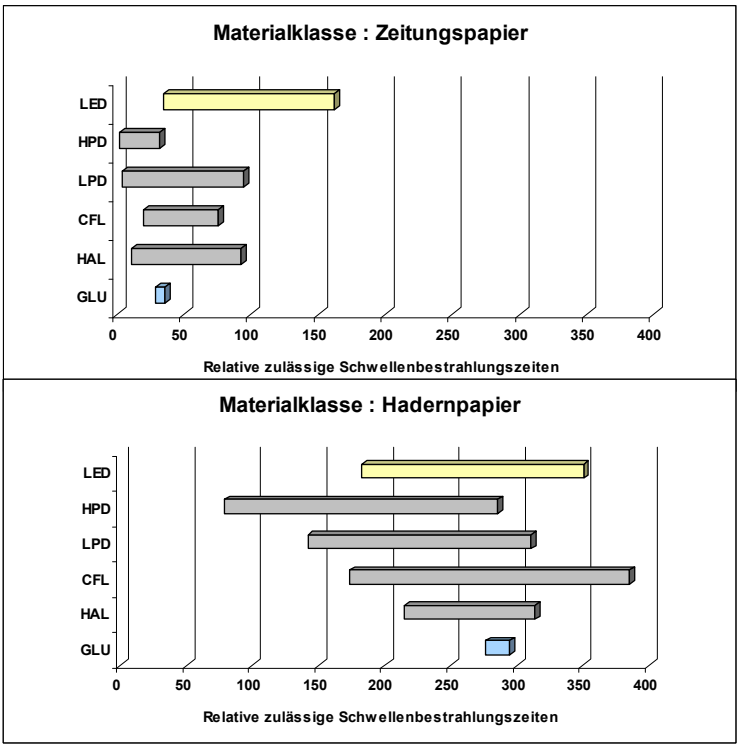
Lichterzeugungstechnologien und deren Anwendung für lichtempfindliche Objekte vorzunehmen.

5 Schädigungspotenziale von LED- und traditionellen Lichtquellen

Durch Anwendung des „Berliner Modells“ wird für verschiedene Lampentechnologien und Ausführungsformen und ausschließlich weiße Lichtquellen bei einer vorgegebenen Beleuchtungsstärke die relative Zeit für das Auftreten einer ersten wahrnehmbaren Farbänderung berechnet und für die verschiedenen Materialklassen zusammengefasst. Legende:

GLU = Glühlampe (als Orientierungs- / Referenzwert mit aufgeführt)
HAL = Halogenglühlampe, mit und ohne UV-Stopp
CFL = Kompaktleuchtstofflampe
LPD = Leuchtstofflampe alle Technologieformen, auch mit Schrumpfschlauch
HPD = Hochdruckentladungslampe, auch in Leuchten mit Abschlussscheibe
LED = LED Lampen und –Systeme in Phosphor-Konvertierungstechnologie, auch mit zusätzlichen Beimischungen von weiteren LED-Farben zur Verbesserung der Farbwiedergabe (Ra, R9 und R11 > 85)

Die horizontale Länge der Balken gibt den Zeitbereich der möglichen Expositionsdauern für die jeweiligen Lampentechnologien an: Je größer die relative zulässige Schwellenbestrahlungszeit ist, desto geringer ist das Schädigungsrisiko bezüglich einer Farbänderung.



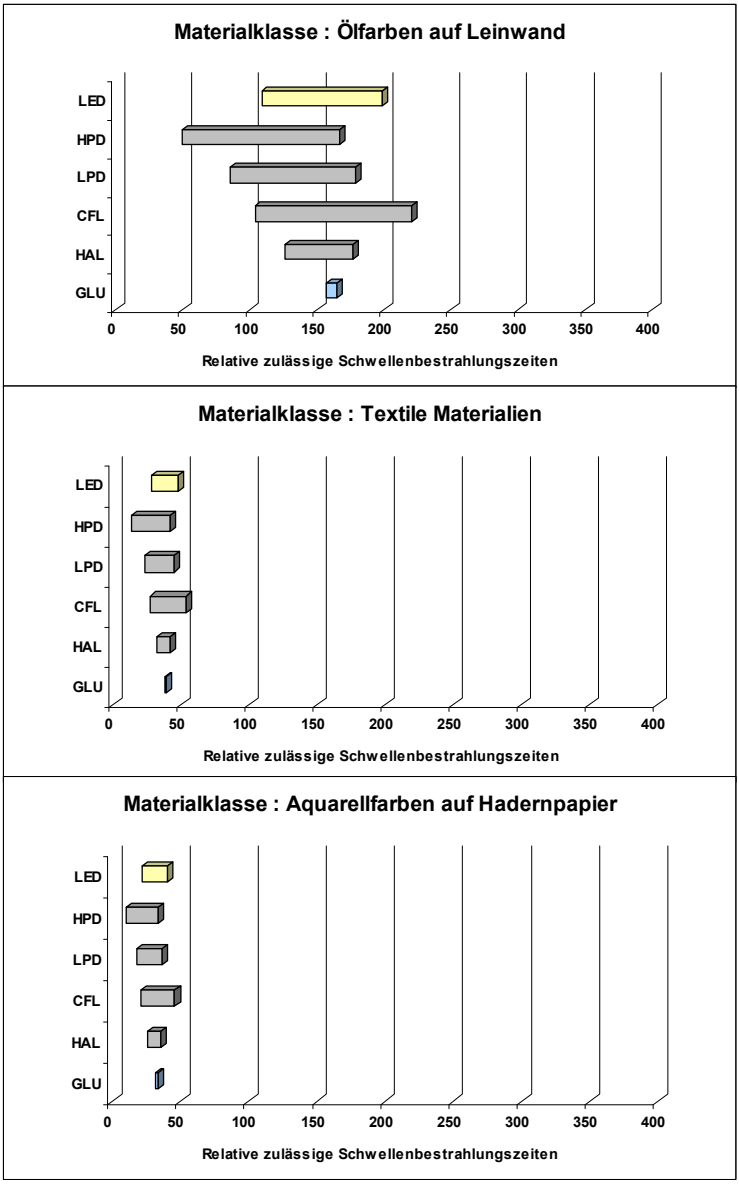


Abb. 6.: Relative, zulässige Schwellenbestrahlungszeiten bis zu einer wahrnehmbaren Farbänderung für verschiedene Lampentechnologien und Materialen

So ergeben sich für „Zeitungspapier“ zulässige Bestrahlungszeiten, welche hauptsächlich durch blaue und ultraviolette Strahlungsanteile dominiert werden. Hier kann durch eine geeignete kurzwellige Filterung noch ein verbesserter Objektschutz erreicht werden, was auch durch die Breite der Zeitbalken nach rechts veranschaulicht ist.

Eine ähnliche Aussage gilt auch für das Material „Hadernpapier“. Da es sich um das unempfindlichste Material in diesem Vergleich handelt, sind hier die zulässigen Bestrahlungszeiten am höchsten. Durch die mehr in den sichtbaren Spektralbereich verschobene wirksame Empfindlichkeit wirken sich hier neben Blau- und Ultraviolettanteilen auch die unterschiedlichen spektralen Verteilungen der Lichtquellen im Sichtbaren stark aus, was zu dieser starken Verlängerung der Zeitbalken führt.

Für „Ölfarben, Textilien und Aquarellfarben“ dominiert beim schädigenden Einfluss im Wesentlichen der sichtbare Spektralbereich, der die Länge der Balken bestimmt.

Generell gilt für den Objektschutz: Je weniger UV – und kurzwellige Strahlung, bzw. je niedriger die Farbtemperatur der Lichtquelle ist, desto geringer wird deren Schädigungspotenzial sein.

Die Lichtempfindlichkeit der betrachteten Materialen auch im Bezug zur LED-Technologie überrascht nicht, weder ist eine besondere Gefährdung (siehe Diskussion in [7, 8]), noch eine Unbedenklichkeit d. h. ein wesentlich verbesserter Objektschutz abzuleiten. Es sind aber wegen (derzeit) nicht vorhandener UV-Anteile bei LED-Beleuchtung diesbezüglich keine zusätzlichen Schutzmaßnahmen erforderlich.
Prinzipiell ist immer zu beachten, dass auch bei Verminderung von stark schädigenden UV-Anteilen, der sichtbare Spektralanteil ein noch ausreichend wirksames Schädigungspotenzial bereitstellt. Die museale Maxime einer geringen Beleuchtungsstärke auf wertvollen Objekten ist somit immer noch gültig, was aber im Verkaufs- und Repräsentationsbereichen meistens nicht gewollt ist.
Lichtempfindlichkeit „Ade“ ist also auf Grund von physikalischen und chemischen Eigenschaften von beleuchteten Materialen prinzipiell nicht zu erreichen. Veränderungen sind also nur bei ausreichenden Kenntnissen sowohl über das Material als auch die spektrale Zusammensetzung der Lampenemission– auch im Zusammenspiel mit anderen Umwelteinflüssen – zu minimieren.

6 Literaturhinweise

1 Volker Koesling, „Vom Feuerstein zum Bakelit – Historische Werkstoffe verstehen“, AdR-Schriftenreihe zur Restaurierung und Grabungstechnik, Band 5/6
2 CIE 89/3-1991, On the deterioration of exhibited museum objects by optical radiation
3 CIE 157:2004, Control of damage to museum objects by optical radiation
4 CIE 15.2-1986, Colorimetry
5 L. S. Harrision “Report on the deteriorating effects of modern light sources” Metropolitan Museum of Art, New York, 1953
6 C. Cuttle “Lighting works of art for exhibition and conservation” Lighting Res. & Technol., 20(2), 43-53, 1988
7 Offenes Schreiben von Steven Weintraub, (Art Preservation Services, Inc.) an „The Green Task Force, American Institute for Conservation“ vom 28. April 2010, Thema: “Comments regarding LEDs and the risk to light sensitive materials”
8 Offenes Schreiben von ERCO “Museumsbeleuchtung: Angebliche Gefährdung der Exponate durch LED-Licht“, Oktober 2010

Sanierungsprojekt Straßenbeleuchtung Gemeinde Wolfschlugen: LED Technik contra konventionelle NAV Technik

Autor
iGuzzini illuminazione Deutschland GmbH
Bunsenstraße 5, 82152 Planegg
Tel +49 89 85 69 88 0
Fax +49 89 85 69 88 33
Email info@iguzzini.de

Berater des Bauherren und ausführendes Unternehmen
GA Energieanlagenbau Süd GmbH
Niederlassungen Fellbach und Neuhausen

Problemstellung und Zielsetzung

Die stark veraltete Straßenbeleuchtung der Gemeinde Wolfschlugen, Baden-Württemberg mit einem HME Lampen Anteil von über 80% bedurfte der Sanierung. Als Beleuchtungsalternative für mehr als 400 Leuchten wurden sowohl NAV Technik als auch LED Technik geprüft. Ziel des Sanierungsprojektes war neben der erhöhten Effizienz der Beleuchtungsanlage vor allem die Kostenreduktion.

Innovative Lösung

Aus der Analyse der Beleuchtungsalternativen ging LED aufgrund einer Reihe von Faktoren als die vorteilhaftere Lösung für die Gemeinde hervor. Die lichttechnischen Berechnungen ergaben, dass die LED Leuchte mit einer Systemleistung von 43W/ 2800lm und die NAV Leuchte mit 82,5W und 6600lm gleichwertige technische Leistungen aufweisen. Sowohl die Werte für die Leuchtdichte als auch die Längsgleichmäßigkeit beider Varianten unterscheiden sich nur leicht und entsprechen der Straßenbeleuchtungsnorm. Bei den Blendungswerten schneidet die LED Leuchte mit 9% gegenüber der NAV Lösung mit 12% besser ab. Die positiven Leistungswerte der LED Variante sind durch eine hocheffiziente, patentierte Optik begründet. (Abb.1-3_Lichttechnische Berechnungen).

Die Gemeinde profitiert bei der LED Lösung zudem von einer innovativen, integrierten Steuerungstechnik, mittels derer verschiedene Dimmzyklen einstellbar sind, so dass jedes geforderte Lichtniveau erreicht wird. So können mit nur einer Leuchtentype die unterschiedlichsten Beleuchtungsanforderungen erfüllt werden. Die Möglichkeit zur Nachtabsenkung spart zusätzlich Energie. In dem Sanierungsprojekt kamen Leuchten mit drei Dimmprofilen zum Einsatz:
1) Einschaltwert 100%, Nachtabsenkung 2 Std. vor Mitternacht auf 70% des Einschaltswerts (EW), 4 Std. nach Mitternacht auf 90% des EW
2) Einschaltwert 70%, Nachtabsenkung 2 Std. vor Mitternacht auf 70% des EW, 4 Std. nach Mitternacht auf 90% des EW
3) Einschaltwert 60%, Nachtabsenkung 2 Std. vor Mitternacht auf 70% des EW, 4 Std. nach Mitternacht auf 90% des EW

Neben den überzeugenden technischen Leistungen war auch der Sicherheitsaspekt der nächtlichen Beleuchtung für Wolfschlugen interessant: Das neutralweiße Licht der LED hat

gegenüber dem gelben NAV Licht die bessere Farbwiedergabe und sorgt so dafür, dass Hindernisse schneller erkannt werden und Unfälle vermieden werden. Die weiße Lichtfarbe wird außerdem in Wohngebieten als natürlicher und weniger störend wahrgenommen. Positiv gewertet wird auch die umweltfreundlichere Beleuchtung durch LED, in dem das Licht kaum Insekten anzieht und weniger CO_2 Emissionen freigesetzt werden.

Entscheidend für die Gemeinde bei der Wahl der LED Lösung waren vor allem die höheren Einsparungen bei Energie-und Wartungskosten gegenüber NAV. Aufgrund der sehr langen Lebensdauer der LED und Elektronik = 100.000 Std. sind die LED Leuchten praktische wartungsfrei. Der Energieverbrauch liegt bei der LED Variante um 61% niedriger als bei NAV und um mehr als 82% niedriger als bei der veralteten HME Technik. Absolut spart die Gemeinde bei 400 ausgetauschten Lichtpunkten fast 12.000€ Energiekosten/Jahr bei 4000h Stunden Brenndauer ggü. NAV und 35.026,80 € ggü. der Altanlage. Die höheren Investitionskosten von LED werden durch eine 40% Förderung abgefangen. Dieses Beispiel zeigt, wie wichtig eine solche Förderung ist, um den Einsatz zukunftsträchtiger, energiesparender Technologien voranzutreiben.

Die Installation der LED Leuchten erfolgte im Oktober 2011.

Anhang: Tabellen und Abbildungen:

Leuchtentyp	**Leuchte 2x HME 80W**	**Leuchte HST 70W**
Bestückung	2x HME 80W	70W HST
Anschlussleistung inkl. Vorschaltgerät	89	82,5 Watt
Anzahl der Lampen je Leuchte	2	1
Anzahl der Leuchten	**402**	**402**
Preis einer Leuchte *	0,00 €	288,00 €
Montage *		47,00 €
Investitionskosten gesamt*	**0,00 €**	**134.670,00 €**
abzügl. 40% BMU-Förderung		
Jahresnutzung in Stunden	4000 Stunden	4000 Stunden
Gesamtanschlußleistung inkl. VG	**71,6 kW**	**33,2 kW**
Stromarbeitspreis ca.	0,15 €/kWh	0,15 €/kWh
Energiekosten der Gruppe ca.	**42.933,60 €/Jahr**	**19.899,00 €/Jahr**
Einsparung Energiekosten zu HME		**23.034,60 €/Jahr**
Energieverbrauch der jeweiligen Gruppe	**286.224 kWh/Jahr**	**132.660 kWh/Jahr**
Einsparung Energieverbrauch		**54%**
Einsparung CO_2 (Faktor 0,62kg/kWh)		**95.210 kg/Jahr**

*Kosten für Wartung und Material können je nach Installateur stark variieren, Stromkosten sind ca. Preise

Tabelle 1: Energiekostenvergleich: HME ggü.NAV

Leuchtentyp	Leuchte 2x HME 80W	LED Leuchte 39LED 43W	Led Leuchte gedimmt
			115 St. auf 60%
			176 St. auf 70%
			111 St. auf 100%
			= mittlere A.leistung 32,8W
Bestückung	2x HME 80W	39 LED	39 LED
Anschlußleistung inkl. Vorschaltgerät	89	43 Watt	32,8 Watt
Anzahl der Lampen je Leuchte	2	39	39
Anzahl der Leuchten	**402**	**402**	**402**
Preis einer Leuchte *	0,00 €	533,00 €	533,00 €
Montage *		47,00 €	47,00 €
Investitionskosten gesamt*	**0,00 €**	**233.160,00 €**	**233.160,00 €**
abzügl. 40% BMU-Förderung		139.896,00 €	139.896,00 €
Mehrkosten Invest LED zu HST		**5.226,00 €**	**5.226,00 €**
Jahresnutzung in Stunden	4000 Stunden	4000 Stunden	4000 Stunden
Gesamtanschlußleistung inkl. VG	**71,6 kW**	**17,3 kW**	**13,2 kW**
Stromarbeitspreis ca.	0,15 €/kWh	0,15 €/kWh	0,15 €/kWh
Energiekosten der Gruppe ca.	**42.933,60 €/Jahr**	**10.371,60 €/Jahr**	**7.911,36 €/Jahr**
Einsparung Energiekosten zu HME		**32.562,00 €/Jahr**	**35.022,24 €/Jahr**
Einsparung Energiekosten LED zu HST		**9.527,40 €/Jahr**	**11.987,64 €/Jahr**
Energieverbrauch der jeweiligen Gruppe	**286.224 kWh/Jahr**	**69.144 kWh/Jahr**	**52.742 kWh/Jahr**
Einsparung Energieverbrauch		**76%**	**82%**
Einsparung CO_2 (Faktor 0,62kg/kWh)		**134.590 kg/Jahr**	**144.759 kg/Jahr**

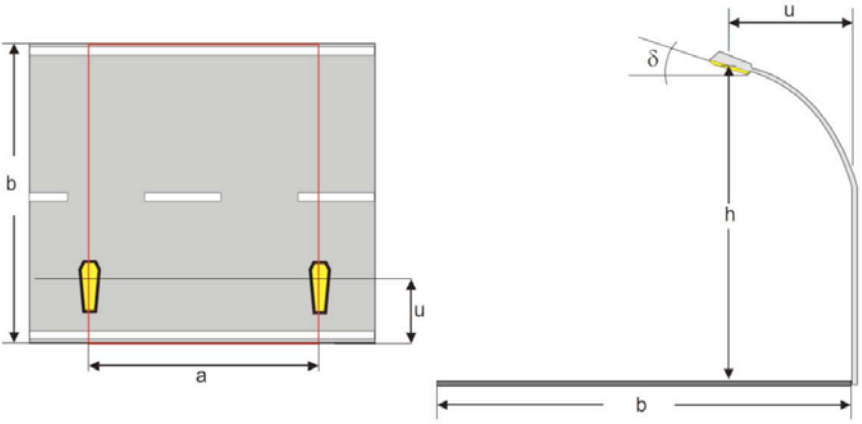
*Kosten für Wartung und Material können je nach Installateur stark variieren, Stromkosten sind ca. Preise

Tabelle 2: Energiekostenvergleich: HME ggü.LED

1 Variante LED

1.1 Zusammenfassung, Variante LED

1.1.1 Ergebnisübersicht, Straße



Leuchtendaten

Fabrikat	: iGuzzini illuminazione S.p.A/Lab/Ver. 10.07
Bestell Nr.	: BE940000
Leuchtenname	: Archilede: BE94 - 39 x 1W neutral white 4000K- street opti c
Bestückung	: 1 x LED / 44W / 2800 lm

Straßenprofil	: ohne Richtungstrennung	Leuchtenplazierung	: Reihe rechts
Breite der Fahrbahn	(b): 7.50 m	Lichtpunkthöhe	(h): 8.00 m
Anzahl der Fahrstreifen	: 2	Leuchtenabstand	(a): 26.00 m
Straßenbelag	: R3	Leuchtenüberhang	(u): -1.50 m
q0	: 0.08	Leuchtenneigung	(δ): 3.00°
Rechtsverkehr		Wartungsfaktor	: 0.80

Leuchtdichte

Beobachterposition 1	: x=-60.00m, y=1.88m, z=1.50m	
Mittel	: 0.5 cd/m²	(ME5 mind. 0.5)
U0 (Min/Mittel)	: 0.4	(ME5 mind. 0.35)
Beobachterposition 2	: x=86.00m, y=5.63m, z=1.50m	
Mittel	: 0.56 cd/m²	(ME5 mind. 0.5)
U0 (Min/Mittel)	: 0.38	(ME5 mind. 0.35)

Längsgleichmäßigkeit

Ul (B1: x = -60.00, y = 1.88, z = 1.50)	: 0.81	(ME5 mind. 0.4)
Ul (B2: x = 86.00, y = 5.63, z = 1.50)	: 0.76	(ME5 mind. 0.4)

Blendung / Umgebungshelligkeit

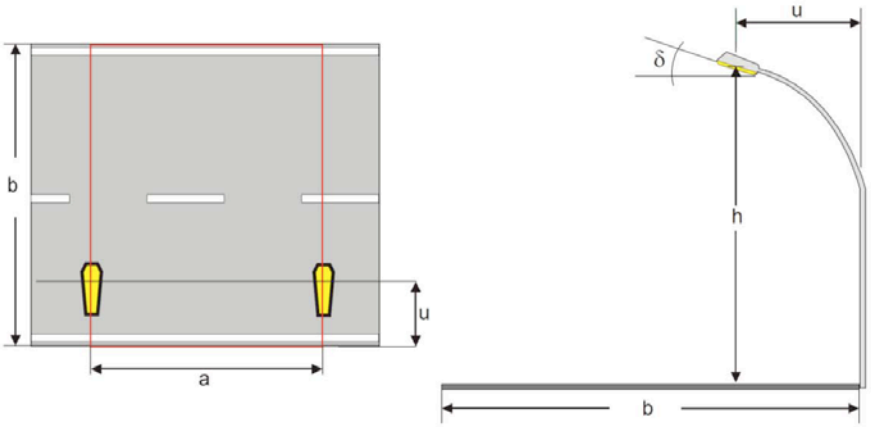
TI (B1: y=1.88m)	: 9 %	(ME5 höchst. 15)
SR	: 0.33	(ME5 mind. 0.5)

Abbildung 1: Lichttechnische Berechnung LED Leuchte

2 Bestand 2xHME 80W

2.1 Zusammenfassung, Bestand 2xHME 80W

2.1.1 Ergebnisübersicht, Straße



Leuchtendaten

Fabrikat	: neutral
Bestell Nr.	: 2x HME 80W
Leuchtenname	: Mastaufsatzleuchte
Bestückung	: 2 x HME E27 80W / 3700 lm

Straßenprofil	: ohne Richtungstrennung	Leuchtenplazierung	: Reihe rechts
Breite der Fahrbahn	(b): 7.50 m	Lichtpunkthöhe	(h): 8.00 m
Anzahl der Fahrstreifen	: 2	Leuchtenabstand	(a): 26.00 m
Straßenbelag	: R3	Leuchtenüberhang	(u): -1.50 m
q0	: 0.08	Leuchtenneigung	(δ): 3.00°
Rechtsverkehr		Wartungsfaktor	: 0.80

Leuchtdichte

Beobachterposition 1	: x=-60.00m, y=1.88m, z=1.50m	
Mittel	: 0.43 cd/m²	(ME5 mind. 0.5)
U0 (Min/Mittel)	: 0.35	(ME5 mind. 0.35)
Beobachterposition 2	: x=86.00m, y=5.63m, z=1.50m	
Mittel	: 0.46 cd/m²	(ME5 mind. 0.5)
U0 (Min/Mittel)	: 0.34	(ME5 mind. 0.35)

Längsgleichmäßigkeit

Ul (B1: x = -60.00, y = 1.88, z = 1.50)	: 0.66	(ME5 mind. 0.4)
Ul (B2: x = 86.00, y = 5.63, z = 1.50)	: 0.75	(ME5 mind. 0.4)

Blendung / Umgebungshelligkeit

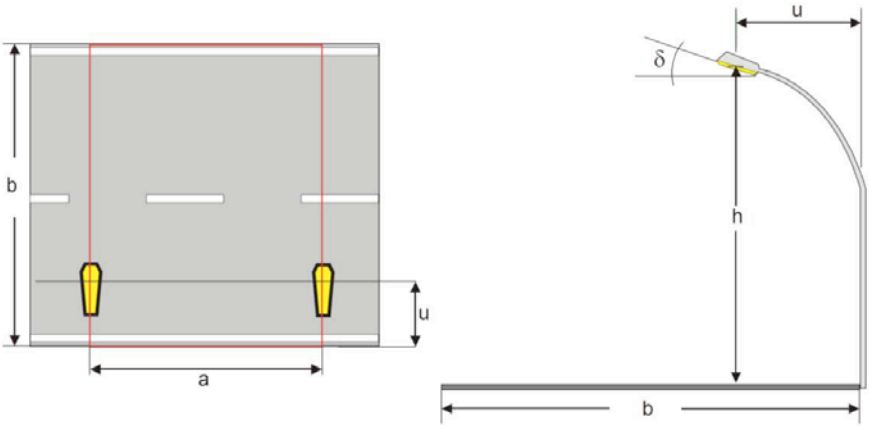
TI (B1: y=1.88m)	: 6 %	(ME5 höchst. 15)
SR	: 0.76	(ME5 mind. 0.5)

Abbildung 2: Lichttechnische Berechnung HME Leuchte

3 Variante HST 70W

3.1 Zusammenfassung, Variante HST 70W

3.1.1 Ergebnisübersicht, Straße



Leuchtendaten

Fabrikat	: iGuzzini illuminazione S.p.A/Lab./Ver. 04/01
Bestell Nr.	: ! HST 70 W
Leuchtenname	: Mastaufsatzleuchte
Bestückung	: 1 x HST E27 70W / 6600 lm

Straßenprofil	: ohne Richtungstrennung	Leuchtenplazierung	: Reihe rechts
Breite der Fahrbahn	(b): 7.50 m	Lichtpunkthöhe	(h): 8.00 m
Anzahl der Fahrstreifen	: 2	Leuchtenabstand	(a): 26.00 m
Straßenbelag	: R3	Leuchtenüberhang	(u): -1.50 m
q0	: 0.08	Leuchtenneigung	(δ): 5.00°
Rechtsverkehr		Wartungsfaktor	: 0.80

Leuchtdichte

Beobachterposition 1	: x=-60.00m, y=1.88m, z=1.50m	
Mittel	: 0.59 cd/m²	(ME5 mind. 0.5)
U0 (Min/Mittel)	: 0.4	(ME5 mind. 0.35)
Beobachterposition 2	: x=86.00m, y=5.63m, z=1.50m	
Mittel	: 0.67 cd/m	(ME5 mind. 0.5)
U0 (Min/Mittel)	: 0.37	(ME5 mind. 0.35)

Längsgleichmäßigkeit

Ul (B1: x = -60.00, y = 1.88, z = 1.50)	: 0.76	(ME5 mind. 0.4)
Ul (B2: x = 86.00, y = 5.63, z = 1.50)	: 0.71	(ME5 mind. 0.4)

Blendung / Umgebungshelligkeit

TI (B1: y=1.88m)	: 12 %	(ME5 höchst. 15)
SR	: 0.59	(ME5 mind. 0.5)

Abbildung 3: Lichttechnische Berechnung HST Leuchte

Abbildung 4: Fotoaufnahme des realisierten Projektes

LSR-Optiken – Lichtdurchlässig, stabil, reversibel verformbar

Dipl.-Ing. Marc Kaup
L-LAB / Hella KGaA Hueck & Co., Rixbecker Str. 75, 59552 Lippstadt
Marc.Kaup@L-LAB.de

1 Einleitung

Glas und transparente Thermoplaste (PC, PMMA etc.) stoßen in Beleuchtungsanwendungen, wie z.B. dem Kraftfahrzeugscheinwerfer, oft an ihre Grenzen. Temperatur- und Strahlungsbeständigkeit, bei gleichzeitiger Gestaltungsfreiheit und Massenproduktionstauglichkeit werden verlangt. Insbesondere „weiße“ Hochleistungs-LEDs fordern und ermöglichen in vielen Bereichen die Applikation von „neuen“ Materialien und Konzepten, im Hinblick auf Effizienz, Lebensdauer und Design.

Hochtransparenter Flüssigsilikonkautschuk (kurz LSR = Liquid Silicone Rubber) stellt in diesem Zusammenhang mehr als nur eine werkstofftechnische Alternative dar. Elastomeroptiken (insbesondere hochtransparente Silikone) sollen strahlungs- und temperaturempfindliche Thermoplaste sowie nicht oder nur aufwendig herstellbare Glasoptiken an geeigneter Stelle in Beleuchtungseinrichtungen ersetzen.

Darüber hinaus soll über die Anwendung als starre LED-Primäroptik hinaus, die Flexibilität / Elastizität des Materials genutzt werden, um durch gezielte Deformation einer Optik, Lichtverteilungen zu steuern.

Im Rahmen derzeitiger Forschungsarbeiten sollen Möglichkeiten, aber auch Grenzen des Materials untersucht und potenzielle Applikationen erkannt sowie realisiert werden. Als Forschungseinrichtung fungiert das L-LAB, das in öffentlich-privater Partnerschaft von der Universität Paderborn und der Hella KGaA Hueck & Co. getragen wird.

2 Werkstoff LSR = Liquid Silicone Rubber

Siloxane nehmen hinsichtlich ihrer chemischen Struktur eine Zwischenstellung zwischen typisch organischen und typisch anorganischen Verbindungen, also zwischen kohlenstoffbasierten Polymeren und (Quarz-)Glas ein.

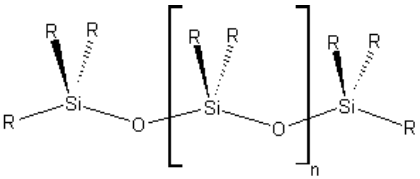


Abb. 1: Strukturformel Polysiloxan

Silikonkautschuke unterscheiden sich von den organischen Kautschuken dadurch, dass die Hauptkette nicht durch Kohlenstoffverbindungen aufgebaut ist, sondern aus alternie-

renden Silizium- und Sauerstoffatomen besteht. Silizium als Homolog zu Kohlenstoff (gleiche Gruppe im Periodensystem der Elemente) ist gewissermaßen prädestiniert, in makromolekularen Strukturen das C-Atom als vierbindiges Kettenglied zu ersetzen /3/.

Ein Siloxan-Elastomer, auch als Silikonkautschuk bezeichnet, entsteht durch eine weitmaschige Vernetzung der Polysiloxane. Diese Vernetzungen sind letztendlich der Grund für das typische elastische Verhalten und die teilweise hohen reversiblen Verformungen von Elastomerbauteilen. Heißvernetzende Flüssigsilikonkautschuke (LSR) sind nicht zuletzt aufgrund ihrer Verarbeitung darüber hinaus ein besonderes Material. LSR-Typen vernetzen über eine platinkatalysierte Additionsreaktion. Die Reaktion läuft bei Raumtemperatur langsam, bei Erhöhung der Temperatur sehr rasch ab. Vorteilhaft sind, im Hinblick auf Serienanwendungen, daraus resultierend kurze Vulkanisationszeiten und ein verbessertes Entformungsverhalten. Des Weiteren besteht der Vorteil der Additionsvernetzung darin, dass keine flüchtigen Spaltprodukte frei werden. Silikonkautschuke sind hochpolymere, vernetzte Siloxane, die sich besonders durch hohe thermische Beständigkeit, gute Kälteflexibilität, gute dielektrische Eigenschaften, ausgeprägten Widerstand gegen den Angriff von Sauerstoff und Ozon und vor allem durch geringe Temperaturabhängigkeit der technologischen Eigenschaften auszeichnen /2/, /6/.

Hochtransparenter LSR als Werkstoff für optische Bauteile in Leuchtenanwendungen ist nicht zuletzt deshalb als hochinteressant einzustufen, da der Transmissionsgrad den von etablierten thermoplastischen Kunststoffen sogar übersteigen kann. Die Lichtdurchlässigkeit bleibt auch unter hoher Beanspruchung erhalten. Probleme der Vergilbung bis hin zur Zerstörung des Werkstoffs sind aufgrund der Beständigkeit des Silikonkautschuks, hinsichtlich energiereicher Strahlung und hohen Temperaturen (Langzeit >150 °C), als unkritisch anzusehen. Die Begründung ist hier maßgeblich in der Bindungsenergie des Si-O-Rückgrats der Silkone zu suchen (451 $kJ \cdot mol^{-1}$), die um fast 30 % höher ist als die des C-C-Gerüsts entsprechender amorpher Thermoplaste /1/.

Aufgrund des charakteristischen Vernetzungsmechanismus lassen sich auch dickwandige, optische Bauteile spannungsfrei im Spritzgussverfahren herstellen, ohne dabei eine lange Nachdruckzeit, ein überdimensioniertes Angusssystem oder einen geringen Temperaturgradienten im Werkzeug berücksichtigen zu müssen, wie es der „klassische" Thermoplastspritzguss eines Polycarbonats (PC) oder Acrylglases (PMMA) erfordern würde /1/. Diese Spannungsfreiheit ist gleichbedeutend mit einer optischen und mechanischen Isotropie, die nicht nur die Handhabung eines LSR-Bauteils im Rahmen von Simulationen erleichtert. Die hohe Abformgenauigkeit und kalkulierbare Flexibilität des Silikons innerhalb des Verarbeitungsprozesses erlaubt zugleich die Gestaltung von komplizierten Oberflächen ohne Einfallstellen, den Verzicht auf Ausformschrägen und die Entformung von Hinterschnitten.

3 Applikationen am Beispiel Kraftfahrzeugscheinwerfer

Die Beständigkeit des LSR gegenüber der zum Teil energiereichen Strahlung einer phosphorkonvertierten, blauen Leuchtdiode ist belegt. Eine Applikation in unmittelbarem Kontakt zum LED-Chip ist daher möglich. High-Power-LED-Hersteller wie *Osram* sehen den Werkstoff Silikon als Primäroptik zum Teil als alternativlos /4/. Über die typischen

Silikonvergussmassen hinaus, bietet der LSR-Spritzguss u.a. die Gelegenheit der Herstellung von komplizierten Optiken.

Als Beispiel einer stabilen Primäroptikapplikation lässt sich das Prinzip eines LED-Matrix-Scheinwerfers anführen. Um den Lichtstrom jedes einzelnen LED-Chips nicht nur dazu zu nutzen, das Vorfeld eines Kraftfahrzeugs statisch auszuleuchten, sondern Scheinwerferlichtfunktionen, wie blendfreies Fern-, Markierungs- oder Kurvenlicht zu realisieren, muss das Licht in diskrete Raumwinkel abgestrahlt werden. Primäroptiken in der unmittelbaren Umgebung der leuchtenden Flächen sind somit unverzichtbar, um in einer engen Matrixstruktur die Lambert-Charakteristik der einzelnen Leuchtdioden außer Kraft zu setzen und diese Struktur auch innerhalb der Lichtverteilung zu nutzen.

Luce et al. belegten bereits anhand eines praktischen Versuchs, dass LSR-Optiken aufgrund ihrer thermischen Stabilität sogar in Halogen- oder Gasentladungsmodulen Anwendung finden könnten. Dabei wurde jedoch nur die ausbleibende Degradation (Vergilbung) in einem Lebensdauertest belegt /5/. Wie sich unterschiedliche Temperaturen auf die optischen Abbildungseigenschaften auswirken und wie diesen eventuell zu begegnen ist, gilt es zu klären. Festzuhalten bleibt, dass sich der Brechungsindex des Silikons verhältnismäßig stark mit steigender Temperatur reduziert (ca. -0,0003 K^{-1}). Einer thermisch bedingten Änderung der optischen Eigenschaften des Kunststoffs könnte ggf. mechanisch entgegen gewirkt werden. Diese Möglichkeit bieten nur wenige Werkstoffe.

Über eine Materialsubstitution von Glas und thermoplastischen Polymeren als derzeitige Materialien der Wahl hinaus, kann die Flexibilität des Elastomers genutzt werden, um optische Eigenschaften einer Optik im Scheinwerfer mechanisch zu beeinflussen. Als natürliches Vorbild dient die Linse innerhalb des menschlichen Auges, die aufgehängt an Fasern, über einen Ringmuskel ihre Brennweite verändert. Ein vergleichbares Aktorsystem könnte in diesem Zusammenhang zur Realisierung akkommodierender Scheinwerfermodule beitragen. Dieses Prinzip befindet sich in einer Machbarkeitsstudie. Mit Hilfe der Methode der finiten Elemente ist es dabei möglich, die Verformung eines Bauteils anhand von Materialparametern, eines mechanischen Modells und vorgegebenen Kräften oder Wegen zu prognostizieren.

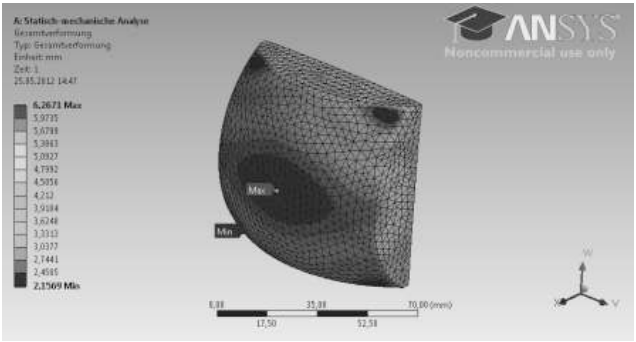


Abb. 2: Verformungsanalyse mittels FEM-Simulation

Parallel dazu erfolgt die optische Auslegung anhand diskreter Verformungszustände, um beispielsweise Funktionen eines adaptiven Frontbeleuchtungssystems (AFS) zu simulie-

ren. Mechanische und optische Simulationen bilden somit einen iterativen Prozess. Funktionen einer geeigneten Aktorik, Form- und Werkstoffstabilitäten sind in praktischen Versuchen anschließend jeweils zu untersuchen.

Einsätze des Materials in Beleuchtungseinrichtungen – insbesondere im Hinblick auf die LED als Lichtquelle und über den Kfz-Scheinwerfer hinaus – sind genauso denkbar, wie Werkstoffhybridlösungen, wie sie z.B. bereits in Photovoltaikmodulen Verwendung finden.

4 Literatur

1 Bayerl, H.: *Ultratransparente Flüssigsilikone – ein neuer Werkstoff für optische Technologien.* Beitrag zur VDI-Konferenz Technologien in der Fahrzeugtechnik, Karlsruhe, April 2010

2 Domininghaus, H.: *Kunststoffe – Eigenschaften und Anwendungen.* 7. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2008.

3 Kaiser, W.: *Kunststoffchemie für Ingenieure – Von der Synthese bis zur Anwendung.* 3. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2011.

4 Kräuter, G.: *Kunststoffe in der LED-Technologie – Herausforderungen und Trends.* Beitrag zur SKZ-Fachtagung Kunststofftechnologien in der Fahrzeugbeleuchtung, Würzburg, November 2010

5 Luce, T.; Schalle, E.; Ziegler, N.: *The Advent of Polymer Projector Headlamp Lenses.* Beitrag zur ISAL, Darmstadt, 2009

6 Röthemeyer, F.; Sommer, F.: *Kautschuk Technologie – Werkstoffe, Verarbeitung, Produkte.* 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2006

Elektronische Ulbrichtkugel mit Spiral-Abtastung

Prof. Dr.-Ing. Peter Marx, Berlin, www.mx-electronic.com

1. Messung des Lichtstroms mit der Ulbrichtkugel

Mit traditionellen Ulbrichtkugeln sind nur Relativmessungen möglich. Infolge der unvermeidlichen Diskrepanz zwischen den theoretischen Voraussetzungen der klassischen U-Kugel-Messmethode (die Kugel ist vollkommen leer, der Kugelinnenanstrich reflektiert vollkommen diffus und spektral aselektiv) und den realen Verhältnissen, ist eine absolute Lichtstrommessung gemäß Formel (1) nicht möglich.

$$\Phi = 4\ \pi\ r^2 \bullet E_{ind} \bullet (1-\rho) / \rho \qquad (1)$$

r = Kugelradius

ρ = Reflexiongrad des Anstrichs

E_{ind} = indirekte Beleuchtungsstärke

Es muss daher vor der Lichtstrom-Messung einer Lichtquelle mit unbekanntem Lichtstrom mittels zeitaufwendigen Goniophotometer-Messungen (i.d.R.>30 Minuten) ein geeignetes Lichtstromnormal hergestellt werden, das möglichst dieselbe spektrale und räumliche Verteilung wie die zu messenden Lichtquelle aufweist.

Die U-Kugel bietet den Vorteil, dass die Lichtstrommessung relativ schnell in wenigen Minuten durchzuführen ist. Nachteilig ist jedoch die relativ große Mess-Unsicherheit, die nur bei sehr großer Sorgfalt und unter Berücksichtigung sämtlicher Fehlereinflüsse unter 5% herabgedrückt werden kann.

2. Messung des Lichtstroms von LEDs, LED-Engines, LED-Leuchten und sonstigen Lichtquellen nach dem Prinzip der „Elektronischen Ulbricht-Kugel mit Spiral-Abtastung“

Hierbei tastet der photometrische Empfänger mit Cosinus- und V(λ)-Anpassung oder alternativ ein geeigneter Arrayspektrometer-Empfänger eine virtuellen Kugeloberfläche, in deren Zentrum sich die zu messende Lichtquelle befindet, auf einer spiralförmigen Bahn kontinuierlich ab (Abb.1).

Vorteile: Absolut-Lichtstrommessung, es werden keine Lichtstromnormale benötigt, hohe Messgenauigkeit durch geringe Winkelschrittweiten Δφ und Δϑ und geringe Messzeit (wenige Minuten). Trotz geringer Messzeit ist der numerische Lichtstromintegrationsfehler < 0,1 %.

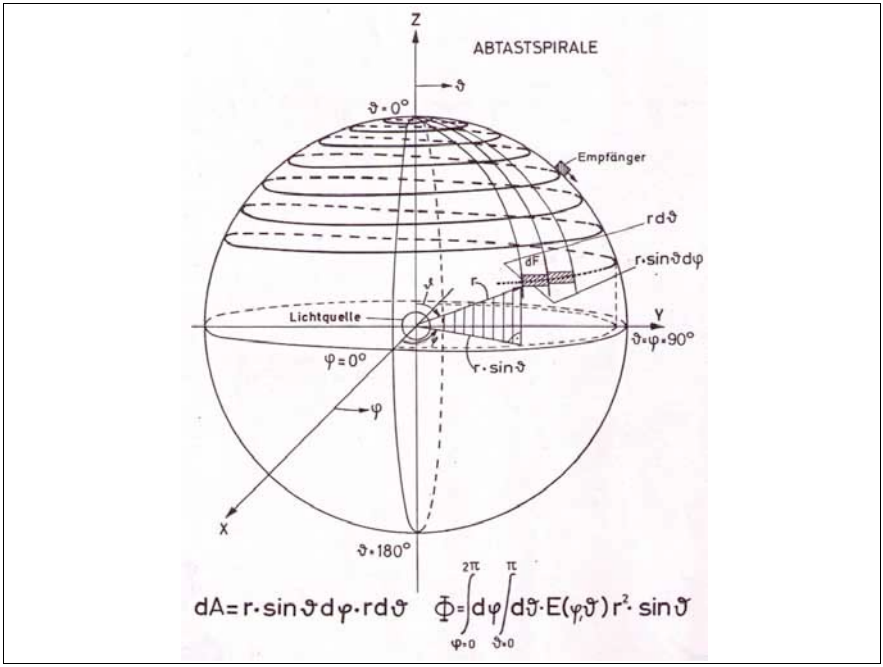


Abb.1: Elektronische Ulbrichtkugel mit Spiral-Abtastung /1/

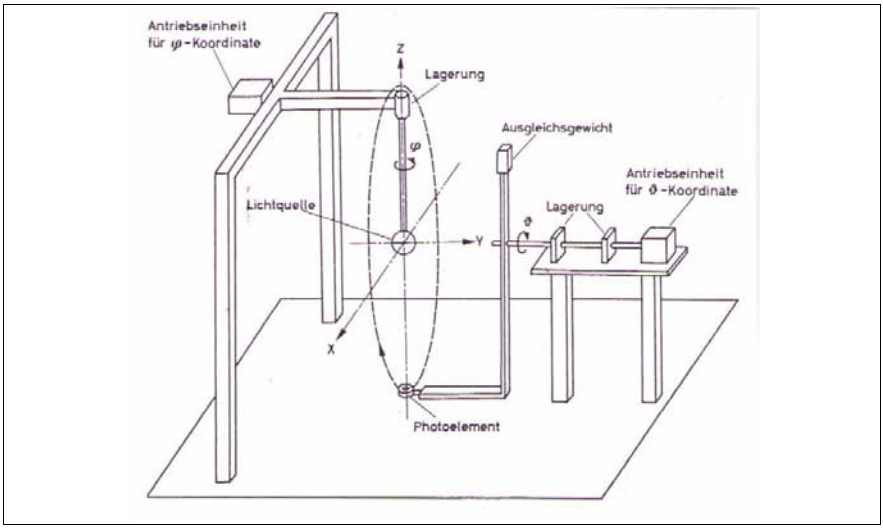


Abb.2: Einfache Spiral-Abtastmechanik für die Elektronische U-Kugel

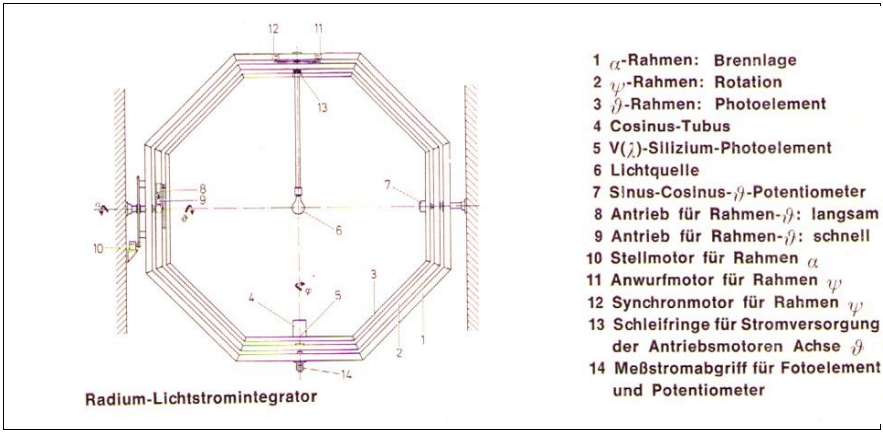


Abb.3: Kardan-Spiral-Abtastmechanik für die Elektronische U-Kugel /2/

Vorteil: Messung der Lichtquelle in beliebiger ruhender Brennlage ohne elektrische Schleifringübertragung (Anwendung bei Radium / Osram Wipperfürth und in der PTB)

2.1 Mathematische Ableitung für die Elektronische Ulbrichtkugel mit Spiral-Abtastung

Für den Lichtstrom gilt die einfache Näherung (Δ φ, Δ ϑ im Bogenmaß)

$$\Phi \approx r^2 \Delta\varphi \, \Delta\vartheta \sum_{i=1}^{M-1} E(\varphi_i, \vartheta_i) \sin\vartheta_i \qquad (2)$$

Zahl der Spiralwindungen $z = \dfrac{180^\circ}{\Delta\vartheta}$ (3)

Zahl der abgetasteten Messwerte auf der Spiralbahn $M = \dfrac{z \bullet 360^\circ}{\Delta\varphi}$ (4)

Inkrementierter Messwinkel: $\vartheta_i = \dfrac{i \bullet 180^\circ}{M}$ (5)

Der Lichtstrom wird nach Formel (2) bestimmt, indem fortlaufend die Beleuchtungsstärke E_i in Abhängigkeit vom Azimut (φ) und der Elevation (ϑ) gemessen und jeweils mit den zugehörigen $\sin\vartheta_i$ – Wert multipliziert wird. Die Produkte werden aufsummiert und mit dem konstanten Faktor ($r^2 \Delta\varphi \Delta\vartheta$) bewertet.

2.2 Rechen-Beispiel für ein elektronisches U-Kugelsystem mit r = 1m und 5°- Abtastung für φ und ϑ

Winkelintervalle $\Delta\varphi = \Delta\vartheta = 5° \triangleq 0{,}087266$ (im Bogenmaß) (6)

Zahl der Spiralwindungen $z = 36$ (7)

Messwertanzahl $M = \dfrac{z \bullet 360°}{\Delta\varphi} = 2592$ Messwerte (8)

inkrementierter Meßwinkel: $\vartheta_i = \dfrac{i \bullet 180°}{M} = i \bullet 0{,}06944°$ (9)

Damit erhält man die sehr einfache Formel zur Lichtstrombestimmung:

$$\Phi \approx (1m)^2 \Delta\varphi \cdot \Delta\vartheta \sum_{i=1}^{2591} E_i \sin\vartheta_i \qquad (10)$$

mit $\Delta\varphi \bullet \Delta\vartheta = 5° \bullet 5° \triangleq 0{,}007615$ (im Bogenmaß)

folgt die Formel für die elektronische U-Kugel mit Spiralabtastung

$$\Phi[lm] \approx 0{,}007615\,[m^2] \sum_{i=1}^{2591} E_i[lx] \cdot \sin\vartheta_i \qquad (11)$$

2.3 Zahlenbeispiel

Der Lichtstrom eines idealen Kugelstrahlers mit der Lichtstärke 1 cd beträgt exakt

$$\Phi = \int_{4\pi sr} I(\vartheta,\varphi)\, d\omega \qquad (12)$$

$$\Phi = I \bullet 4\pi = 1 \text{ cd} \bullet 4\pi = 12{,}5664 \text{ lm} \qquad (13)$$

Die numerische Berechnung – mittels MATLAB - mit der Spiralphotometer-Formel (11) liefert mit E=1 lx und r =1m:

Programm: S=0; for i = 1 : 2591;

S = S + sin(i • (pi / 180) • 0.06944) end; S = 1650,2

mit $\Delta\varphi \bullet \Delta\vartheta = 0{,}007615$ (Bogenmaß) folgt

$\Phi \approx 1650.2 \bullet 0{,}007615 = 12{,}5663$ lm (14)

Der relative Lichtstrom-Integrationsfehler F_Φ der Spiralabtastung ist extrem gering!

$$F_\Phi = \frac{12{,}5663 - 12{,}5664}{12{,}5664} = \mathbf{-\,0{,}0008\ \%}$$

3. Rechnergeführte Mess-Elektronik

Die mit einem Impulsgeber (Takt i) abgetasteten Beleuchtungsstärken werden mittels Operationsverstärker in proportionale Spannungen transformiert, anschließend mit einem Analog-Digitalwandler in den PC eingelesen und mit den inkrementierten $\sin\vartheta_i$–Werten multipliziert. Die Produkte werden aufsummiert und mit dem konstanten Faktor $(r^2 \Delta\varphi \Delta\vartheta)$ bewertet.

Wenn z.B. 10 Abtastwerte E_i pro Sekunde gemessen werden, benötigt man 2592/10 = 259,2 Sekunden = 4,32 Minuten für eine vollständige Absolut-Lichtstromintegration! Bei dieser Abtastfrequenz liegen 100 ms zwischen zwei Abtastungen, d.h. es bleibt dazwischen noch genügend Zeit für eine automatische Bereichsumschaltung, womit die Genauigkeit der Messung noch erheblich gesteigert werden kann.

Teure Winkelgeber für φ und ϑ sowie Positionier-Antriebe sind nicht erforderlich, da preiswerte Gleichstrommotoren mit Drehzahlregelung verwendet werden und die Messwert-Triggerung mittels eines einfachen elektronischen Taktgebers erfolgen kann. Alternativ können auch sehr kostengünstige Netz- Synchronmotoren eingesetzt werden.

4. Technische Erläuterung zur Wahl geeigneter Abtast-Winkel-Intervalle

Um eine hinreichend genaue Lichtstromintegration durchführen zu können, ist ein geeignetes Messraster unter Berücksichtigung der Geometrie des Lichtverteilungskörpers der zu messenden Lichtquelle zu wählen.

Zur Abschätzung des Messfehlers, der u.U. durch ein zu grob gewähltes Messraster verursacht werden kann, wurde für einen horizontal ausgerichteten Lambertstrahler gemäß Abb. 4 mit analytisch berechenbarer Lichtverteilung, die nicht rotationssymmetrisch zur z-Achse ist, der Lichtstrom durch geschlossene Lösung des Lichtstromintegrals exakt bestimmt und anschließend für diesen Strahler die Lichtströme durch numerische Integration bei spiralförmiger Abtastung für verschiedene Messraster (5°, 10°, 20°) ermittelt.

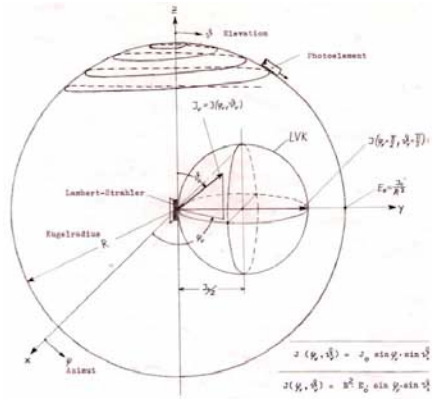


Abb. 4: Skizze zur numerischen Integration eines horizontal angeordneten Lambert-Strahlers mit spiralförmiger Abtastung

Um das Lichtstromintegral für den dargestellten Strahler lösen zu können, muß zunächst die Lichtstärke als Funktion der Elevation und des Azimuts abgeleitet werden.

Es gilt:

Kugelgleichung $$x^2 + (y - J_o/2)^2 + z^2 = (J_o/2)^2 \qquad (144)$$

Geradengleichung im Raum $$x^2 + y^2 + z^2 = J(\varphi_v, \vartheta_v)^2 \qquad (145)$$

Gl.(145) eingesetzt in Gl.(144) liefert

$$J(\varphi_v, \vartheta_v)^2 - y\, J_o = 0 \qquad (146)$$

mit $$y = J(\varphi_v, \vartheta_v) \sin\varphi_v \cdot \sin\vartheta_v \qquad (147)$$

erhält man die Lösungen der quadratischen Gleichung Gl.(146)

$$J_1(\varphi_v, \vartheta_v) = J_o \sin\varphi_v \cdot \sin\vartheta_v \qquad (148)$$
$$J_2(\varphi_v, \vartheta_v) = 0 \qquad (149)$$

bzw. allgemein $$J(\varphi, \vartheta) = J_o \sin\varphi \cdot \sin\vartheta \qquad (150)$$

Bei Messung außerhalb der photometrischen Grenzentfernung folgt

$$J(\varphi, \vartheta) = R^2 \cdot E_o \cdot \sin\varphi \cdot \sin\vartheta \qquad (151)$$

Gl.(151) eingesetzt in das bekannte Lichtstromintegral

$$\Phi = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\vartheta=0}^{\pi} J(\varphi, \vartheta) \cdot \sin\vartheta \, d\varphi \, d\vartheta \qquad (152)$$

liefert

$$\Phi = R^2 \cdot E_o \int_{\varphi=0}^{\pi} \int_{\vartheta=0}^{\pi} \sin\varphi \cdot \sin^2\vartheta \cdot d\varphi \, d\vartheta = R^2 \cdot E_o \cdot \pi \qquad (153)$$

Abb. 5: Exakte Berechnung des Lichtstroms für den Lambertstrahler nach Abb. 4 (Gleichung 153)

$$\Phi_{Sp} = R^2 \Delta\varphi \Delta\vartheta \sum_{\nu=1}^{M-1} E(\varphi_\nu, \vartheta_\nu) \sin\vartheta_\nu = R^2 \Delta\varphi \Delta\vartheta \sum_{\nu=1}^{M-1} E_\nu \cdot \sin\vartheta_\nu \qquad (154)$$

mit

$$E(\varphi_\nu, \vartheta_\nu) = E_o \sin\varphi_\nu \cdot \sin\vartheta_\nu$$

$$n = \frac{\pi}{\Delta\vartheta} \quad \hat{=} \text{ Zahl der Spiralwindungen}$$

$$M = \frac{n \cdot 2\pi}{\Delta\varphi} \quad \hat{=} \text{ Zahl der Meßpunkte auf der Spiralbahn}$$

$$\varphi_\nu = \nu \cdot \Delta\varphi = \nu \cdot \frac{2\pi \cdot n}{M}$$

$$\vartheta_\nu = \nu \cdot \frac{\pi}{M}$$

folgt

$$\Phi_{Sp} = R^2 \cdot E_o \Delta\varphi \Delta\vartheta \sum_{\nu=1}^{M-1} \sin(\nu \frac{2\pi \cdot n}{M}) \sin^2(\nu \cdot \frac{\pi}{M}) \qquad (155)$$

Abb. 6: Summendarstellung (Gl. 155) für den Lichtstrom (Approximation) nach dem Abtastspiralprinzip

Für die 5°-Abtastung gilt:

$$\Delta\varphi = \Delta\vartheta = 5^\circ = 0{,}087266 \; ; \qquad \varphi_\nu = \nu \cdot \frac{2\pi \cdot 36}{2592} = \nu \cdot \frac{\pi}{36}$$

$$n = \frac{\pi^c}{5^\circ} = 36 \; , \quad M = \frac{36 \cdot 2 \cdot \pi^c}{5^\circ} = 2592 \; ; \qquad \vartheta_\nu = \nu \cdot \frac{\pi}{2592}$$

Mit diesen Zahlenwerten erhält man die endgültige Formel zur numerischen Lichtstromermittlung des Lambert-Strahlers bei spiralförmiger Abtastung im 5°-Raster.

$$\Phi_{Sp\,5^\circ} = R^2 \cdot E_o \Delta\varphi \Delta\vartheta \sum_{\nu=1}^{2591} C \cdot \underbrace{\sin(\nu \cdot \tfrac{\pi}{36})}_{D} \cdot \sin^2(\nu \cdot \frac{\pi}{2592}) \qquad (156)$$

es gilt: C = 1, wenn D ≥ 0
C = 0, wenn D ≤ 0

Die Formel (156) wurde von MARX-REHBEIN /90/ in FORTRAN IV programmiert und mit einem Digitalrechner - System Siemens 4004 - ausgewertet.

Man erhält

$$\Phi_{Sp\,5^\circ} = R^2 E_o \cdot 7{,}6154 \cdot 10^{-3} \cdot 412{,}19 = R^2 \cdot E_o \cdot 3{,}1391$$

Der Lichtstromfehler beträgt dann

$$f_{\Phi 5^\circ} = \frac{\Phi_{Sp5^\circ} - \Phi}{\Phi} \cdot 100 \;\; (\%) \qquad (157)$$

$$f_{\Phi 5^\circ} = \frac{R^2 \cdot E_o \cdot 3{,}1391 - R^2 \cdot E_o \pi}{R^2 \cdot E_o \cdot \pi} 100 \;\; (\%) = -0{,}08 \;\%$$

Abb. 7: Für die 5°-Abtastung ergibt sich ein sehr geringer Lichtstromintegrationsfehler von -0,08 %

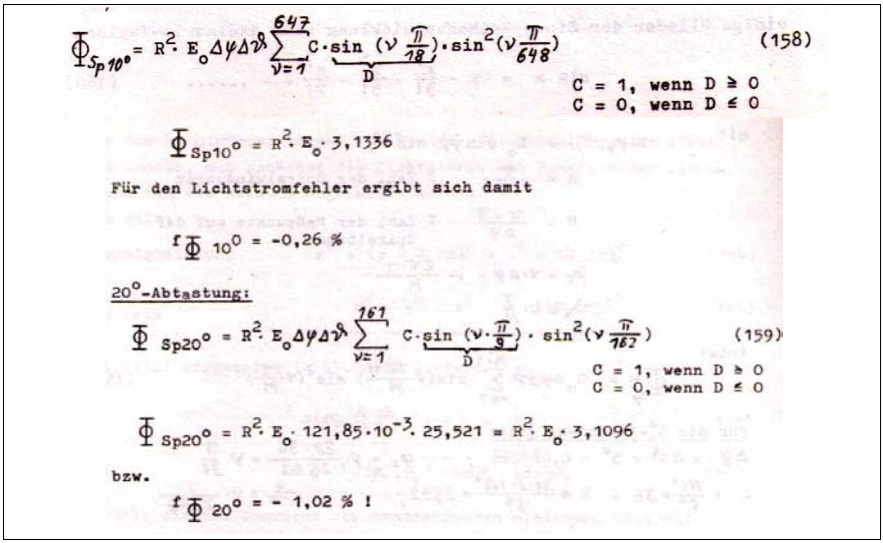


Abb. 8: Für die 10°-Abtastung (647 Messwerte) erhält man -0,26% und selbst bei einer 20°-Abtastung mit nur 161 Messwerten liegt der Fehler noch bei 1%

5. Zusammenfassung

Die Elektronische Ulbrichtkugel mit Spiral-Abtastung zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

Absolute Lichtstrommessung, es werden keine Lichtstrom-Normale benötigt

Die Lichtstrommessung ist weitgehend unabhängig von der Strahlungsfunktion und der räumlichen Verteilung der zu messenden Lichtquelle

Die minimale Messzeit für eine Lichtstromintegration bei lückenloser Abtastung beträgt etwa 5 Minuten

Lichtquellen können in beliebig einstellbarer Brennlage gemessen werden, während der Messung wird die Lichtquelle nicht bewegt (dies gilt jedoch nur für das Kardan-System, vgl. Abb.3)

Literatur

/1/ Marx, P.: Spiralphotometer. Deutsches Patent Nr. 1928815

/2/ Galaschik, H.; Marx, P.: Kardan-Goniophotometer. Deutsches Patent Nr. 2226253

Renopol, die kostengünstige Lichtmast- Lösung

Autor: L.R.G.M. Moormannn
Managing Director
Sapa Pole Products
Postfach 21, 5150 BA
Drunen, Niederlande

Einführung

Renopol™

Das revolutionäre und patentierte Sanierungskonzept „Renopol“ wurde speziell für Renovierungsmaßnahmen entwickelt, wobei die erhebliche Reduzierung von Kosten bei der Mastmontage und dem Masttausch im Vordergrund stehen. Renopol bietet Städten, Kommunen, Energieversorgern und privaten Unternehmen somit die ideale Möglichkeit, ihre Außenbeleuchtung günstig auf einen aktuellen technischen Stand zu bringen.

Grundsätze des Renopol-Systems

Kostengünstig

Renopol ist so konzipiert, das ein Masttausch OHNE jegliche Erdarbeiten realisiert werden kann. Darüber hinaus wurde auf eine einfache Montage Wert gelegt, wodurch sich insgesamt eine Kostenersparnis von mehr als 50% gegenüber den herkömmlichen Systemen ergibt (lt. Aussagen diverser Kommunen liegen die Kosten für die notwendigen Erdarbeiten zwischen 450 – 900 €).

Details

Renopol verfügt über ein speziell konifiziertes Erdstück, welches sich automatisch dem existierenden Erdstück der Altanlage anpasst. Ein speziell entwickelter Füllmörtel garantiert die Standsicherheit von Renopol, wobei es keine Rolle spielt, wie es um die Beschaffenheit der Altanlage bestellt ist. Renopol steht autonom.

Abb. 1 Abtrennen des alten Mastes

Abb. 2 Kabelschutz

Abb. 1 Aufstellen Renopol Mast

Abb. 4 Renopol Mast komplett installiert

Eigenschaften eines Renopol Lichtmastes

Dauerhaft und umweltfreundlich

Aluminium ist grundsätzlich wiederzuverwerten – nach einer langen Lebensdauer können Aluminiummasten vollständig recycelt und erneut zu neuen Aluminiumprodukten verarbeitet werden. Dabei wird, im Gegensatz zur Neuherstellung von Aluminium aus Bauxit, bis zu 95% Energie eingespart. Obendrein findet kein Qualitätsverlust statt.

Zuverlässig und sicher

Renopol™ wird konform des in der EN 40-3-3 vorgeschriebenen Standards für Statikberechnungen produziert. Weiterhin ist Renopol™ CE zertifiziert und wird nach ISO 9001 und ISO 14001 gefertigt.

Wartungsfrei

Durch die natürliche Widerstandsfähigkeit von Aluminium gegenüber Umwelteinflüssen wird kein zusätzlicher Oberflächenschutz, wie beispielsweise eine Lackschicht, benötigt.
Das bedeutet eine wesentliche Einsparung bei den Unterhaltskosten und liefert somit einen weiteren positiven Beitrag zum Umweltschutz. Aluminiummasten haben eine lange Lebenserwartung, Standzeiten von 45 Jahren sind durchaus die Regel.

Lange Lebensdauer

In Zusammenarbeit mit dem international anerkannten Institut für wissenschaftliche Untersuchungen (TNO) ist eine Serie von Versuchsreihen durchgeführt worden:
Die Ergebnisse (2003_BC-R0035/MLJ) zeigen, dass der Einsatz eines korrosionsabweisenden Kunststofftapes den besten Korrosionsschutz bietet.

Abb. 5 das Renopol Prinzip

Ausführungen

Fussdurchmesser von 114 mm bis 165 mm und Höhen von 4-6 m stehen zur Verfügung (auf Anfrage bis 8 m). Das heißt, es existiert eine adäquate Lösung für jeden alten Lichtmast.

Lichtpunkthöhe in M	Bauform	Fußdurchmesser in mm
4.0	zylindrisch	114 / 120
4.5	zylindrisch	114 / 120
5.0	zylindrisch	114 / 120
4.0	konisch	114 / 120
4.5	konisch	114 / 120 / 135
5.0	konisch	114 / 120 / 135
6.0	konisch	114 / 120 / 135 / 165
8.0	konisch	135 / 165

Tab. 1

Schlussfolgerung: Renopol™ ist die kostengünstige Lichtmast- Lösung:

- ⇒ **Entwickelt für Sanierungsmaßnahmen**
- ⇒ **Reduzierung der Gesamtkosten**
- ⇒ **Nutzung der vorhandenen Gründung**
- ⇒ **Einfache Installation**

www.sapapoleproducts.com

Aktivierende, dynamische Bildschirmarbeitsplatz-Hintergrundbeleuchtung für Wissensarbeitsplätze „OWLIGHT“

Jens Mühlstedt, Angelika C. Bullinger

Kurzfassung

Positive Lichtgestaltung mittels dynamischem Licht, Kontrastanpassungen und Tageslichtnachahmungen ist bekannt, etabliert sich an Bildschirmarbeitsplätzen von Wissensarbeitern aber nur durch neue Lichtanlagen. Das Nachrüsten bestehender Bürokonfigurationen stellt eine attraktive Möglichkeit dar, derartige Lichtgestaltungen umzusetzen. Dies soll durch die Applikation des nutzerzentrierten Büroarbeits-Lichtsystems OWLIGHT erfolgen.

Das OWLIGHT-System besteht aus einem Leuchtmodul, Sensormodulen sowie einer Steuerung mit Verbindung zu einem PC. Das Leuchtmodul wird auf der Rückseite eines Flachbildschirms angebracht und besteht aus mehreren neigbaren LEDs. Das Sensormodul wird auf der oberen Kante des Bildschirms befestigt und beinhaltet Helligkeits-, Bewegungs- und Schallmessfühler. Eine Software zur Konfiguration und Steuerung des Systems ergänzt den Versuchsaufbau.

Zur Arbeitsplatz-Beleuchtung kommt oft eine arbeitsplatzorientierte Allgemeinbeleuchtung zum Einsatz, Änderungen der Helligkeit oder Lichtfarbe der Leuchten werden je nach Steuerung (z. B. DALI) für den gesamten Raum oder Teile des Raumes möglich. Ergänzend sind häufig Arbeitsplatzleuchten an Bildschirmarbeitsplätzen angebracht, die nicht in die Steuerung integriert sind. Die Erweiterung um das OWLIGHT-System und damit die Nutzerzentrierung bei der Bildschirmarbeitsplatzbeleuchtung ermöglicht die Einbindung forschungsseitig bekannter positiver Effekte in ein Lichtkonzept. Dass dies notwendig ist, zeigt eine im Vorfeld durchgeführte Evaluierung der Anforderungen an Bildschirmarbeitsplätze von Wissensarbeitern. Deren Ergebnisse verdeutlichen weiterhin, dass Wohlbefinden und Leistung der Wissensarbeiter durch OWLIGHT verbessert werden können.

1 Aktivierende, dynamische Lichtgestaltung für Wissensarbeitsplätze

Die Gestaltung von Licht und Beleuchtung in Arbeitssystemen von Wissensarbeitern ist ein komplexes Thema, zu dem zahlreiche arbeitswissenschaftlich gesicherte Erkenntnisse existieren. Für die Planung und Gestaltung von Beleuchtungsanlagen besteht ein Wirkzusammenhang aus Tageslicht (DIN 5034-1, 2011), Allgemein- und Einzelarbeitsplatzbeleuchtung (DIN EN 12464-1, 2011; ASR A3.4, 2011) mit deren Steuerung, Arbeitsplatz und Gegenständen mit deren Materialien, Bildschirm(en) sowie Raum und Reflexionsgraden. Neben der klassischen Beleuchtungsgestaltung gibt es einige Konzepte, die in Forschungsprojekten diskutiert, in ersten Anwendungen genutzt und im Folgenden vorgestellt werden.

1.1 Kontrastgestaltung, dynamisches Licht und Tageslichtnachahmung

Ein grundlegendes Konzept der Lichtgestaltung ist die **Kontrastanpassung**, auch als Leuchtdichteverteilung bezeichnet. Hierbei wird sichergestellt, dass zu hohe Kontraste, die häufige, auf Dauer ermüdende Adaptationsprozesse verursachen, vermieden werden. Zu geringe Kontraste werden ebenfalls von negativen Effekten (Ermüdung, Monotonie) begleitet, treten jedoch eher selten auf. Eng mit der Kontrastanpassung verbunden sind weitere Gütemerkmale der Beleuchtung: Lichtrichtung, Schattigkeit und Direkt-/Reflexblendung. Diese sollten vermieden werden (DIN 12464-1, 2011; ASR A3.4, 2011; LASI, 2005; Rentzsch, 1982; Bartenbach, Witting, 2008; BAuA, 2011; Kleinhenz, 2011).

Ein darauf aufbauendes Konzept stellt das **dynamische Licht** dar. Hierbei wird der Lichtstrom einer oder mehrerer Lichtquellen über die Zeit verändert. Dies kann eine Anpassung im Laufe des Tages sein (licht.wissen.19, 2010), meist sind jedoch schnellere Änderungen im Minuten- oder sogar Sekundenbereich gemeint (Stefani, Pross, Bues, Hille, 2010). Im bionischen Sinn wird der Effekt von Wolken nachgeahmt (wobei, bezogen auf Unbelebtes, richtigerweise von Abionik gesprochen werden muss). Diese vorbeiziehenden Wolken verändern eine Beleuchtungssituation massiv und in unterschiedlichen Zeitspannen. Eine Umsetzung als „Himmelssimulation“ (z. B. Fraunhofer IAO, 2012) mit sichtbaren Wolken aus LEDs oder Monitoren an der Decke ist das hochtechnisierte Vorbild für aufwandsärmere Anwendungen mittels steuerbarer Lichtquellen. Der positive Effekt dynamischen Lichts hingegen ist unbestritten (Frieling, 1992; Plischke, Schauer, Schülke, Kempter, 2007). Neben Produktivitätssteigerungen bis zu 8% steigt zugleich das Wohlbefinden (licht.wissen.19, 2010). Untersuchungen zeigen weiterhin, dass auch sehr starke Dynamiken hohe Nutzerakzeptanz finden (Stefani, Pross, Bues, Hille, 2010).

Eine weitere abionische Adaption setzt den Verlauf des Tageslichts in Innenräumen um. Bei der **Tageslichtnachahmung** wird neben dem Lichtstrom auch die Lichtfarbe im Tagesverlauf verändert. Hierbei werden Erkenntnisse zum zirkadianen Rhythmus umgesetzt. Eine konstant hohe Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz führt kurzfristig zur

Erhöhung der Vigilanz, kehrt sich auf Dauer jedoch ins Gegenteil. Eine wärmere Lichtfarbe am Morgen und Abend in Verbindung mit verringerter Beleuchtungsstärke adaptiert den natürlichen Beleuchtungszustand und erhöht somit das Wohlbefinden (z. B. Möller, Dehoff, Söllner, Khanh, 2010).

1.2 Blaues, aktivierendes Licht

Ein seit einigen Jahren erforschtes und angewandtes Konzept ist die Nutzung von Licht mit Frequenzen um 460 nm. Dies entspricht **blauem Licht** (DIN V 5031-100 und -101, 2010). Dieses Licht wird einerseits vom menschlichen Auge wahrgenommen und wirkt außerdem nichtvisuell, was in spezielle Ganglienzellen (ipRGCs) begründet ist (licht.wissen.29, 2010). Die dritten Lichtrezeptoren neben Stäbchen und Zapfen, die erst vor einigen Jahren entdeckt wurden, können einen Einfluss auf die Vigilanz des menschlichen Körpers ausüben, indem die Melatonin-Suppression erhöht wird (Cajochen et al., 2005). Besonders stark ist dieser Effekt, wenn das blaue Licht nicht nur punktuell auf die Netzhaut trifft, sondern durch die Erhöhung der „Hornhaut-Beleuchtungsstärke“ die Netzhaut großflächig beleuchtet (Schierz, 2010). Blaues Licht kann somit zur Beleuchtungsgestaltung eingesetzt werden. Ähnlich wie bei „normalem“ Licht gelingt dies nur mit dem richtigen Maß von Leuchtdichten und Leuchtdauern. Ein Einsatzszenario stellt die Abschwächung des Mittagstiefs dar.

1.3 Farbiges, inspirierendes Licht

Ein weiteres arbeitswissenschaftliches Konzept ist die Nutzung von farbigem Licht zur Förderung von Inspiration und Kreativität. Hierbei wird zum einen die optische Veränderung der Umgebung genutzt, um Einfluss auf die Stimmung des Menschen zu nehmen. Andererseits können Erkenntnisse zur Entstehung von Ideen und Innovationen umgesetzt werden, die Situationen in der Freizeit, insbesondere in der Natur, als kreativitätsfördernd benennen (Fueglistaller, 2005). Weiterhin bekannt sind vielerlei psychologische Wirkungen von Farben, was besonders intensiv durch die Nutzung von Lichtquellen umgesetzt werden kann (Heller, 1999). Auch im Projekthaus METEOR – Mensch, Technik, Organisation an der Professur Arbeitswissenschaft der TU Chemnitz wird im Themenbereich innovative Arbeitswelt an der Wirkung von Farben auf Wissensarbeiter geforscht (Glöckner, Spanner-Ulmer, 2010; Mühlstedt, Glöckner, Spanner-Ulmer, 2011).

2 OWLIGHT – Office Working Light System

Im Bereich der Unterhaltungselektronik sind Systeme zur Erweiterung von Bildschirminhalten über deren Geometrie hinaus bekannt, wie Philips Ambilight (Philips Research, 2011), Philips amBX (amBX, 2012) oder weitergehende, offenere Systeme wie SmartBytes Design ARFX (ARFX, 2012) und MoMoLight (Rafke, 2008). Diese beschränken sich jedoch meist auf die Anwendung zur Unterstützung von Unterhaltungsmedien bzw. auf die „Erweiterung“ der Bildschirmanzeige.

Für Arbeitsplätze von Wissensarbeitern stellt ein derartiges System eine Novität dar, die neben den vorhandenen Lichtquellen – Monitor, Schreibtischlampe, arbeitsplatzorientierte Allgemeinbeleuchtung, Allgemeinbeleuchtung und tageslichtdurchlässige Fenster – das Beleuchtungskonzept ergänzen kann.

2.1 Aufbau und Grundkonzept von OWLIGHT

Das Office Working Light System (OWLIGHT) dient der Erweiterung eines Arbeitsplatzes um eine Beleuchtungskomponente, die die Kontrastanpassung verbessert, dynamisches Licht ermöglicht und die Tageslichtnachahmung unterstützen soll. Außerdem ist es möglich, blaues Licht zur Erhöhung der Vigilanz und farbiges Licht zur Förderung der Kreativität einzusetzen.

Das OWLIGHT ist aus drei LED-Modulen mit je vier RGB-LEDs aufgebaut. Diese sind an einer Halterung angebracht, die an die VESA-Halterung des Monitors bzw. dessen Standfuß nachgerüstet werden kann. Die RGB-LEDs sind auf einer Platine angebracht, welche wiederum flexibel gegenüber dem Modul verstellbar und somit den örtlichen Gegebenheiten anpassbar ist (Abb. 1). Derart können die LEDs die Wand hinter dem Monitor beleuchten. Das Leuchtmodul ist mit einer Steuerung verbunden, die wiederum per serieller Schnittstelle – oder mit einem Konverter per USB – von einem PC angesprochen wird. Auf dem PC dient eine Software der Steuerung und Konfiguration des Systems. Außerdem ist vorgesehen, die Steuerung mit Sensormodulen zu erweitern.

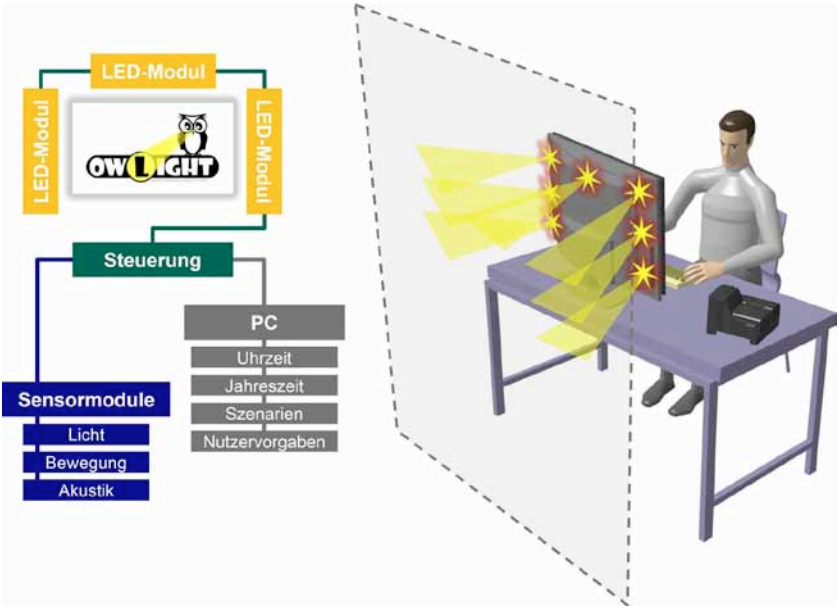


Abb. 1: Systemaufbau (links) und Funktionsdarstellung (rechts) des Office Working Light System (OWLIGHT)

Ein erster Pre-Test an den Arbeitsplätzen der Professur Arbeitswissenschaft bei verschiedenen Tageszeiten und Wettersituationen ergab für reale Arbeitsplätze Leuchtdichteverhältnisse zwischen Arbeitsgegenstand und direkter Umgebung von 1:0,3 bis 1:5,6 und zwischen Arbeitsgegenstand und weiterer Umgebung von 1:0,3 bis 1:7 (Grenzwerte <1:3 und <1:10; DIN 12464-1, 2011). Während der Wintermonate und damit früh einbrechender Dunkelheit wird sich diese Situation zweifelsohne verschärfen. Es besteht demnach ein Handlungsbedarf zur Kontrastanpassung. Weiterhin ist in den meisten Räumen der Professur, ähnlich wie in vielen Unternehmen, eine manuelle Steuerung der Beleuchtung möglich, indem einzelne Lampen zu-/abgeschaltet werden können und in einigen Räumen Dimmer eingebaut sind. Anstatt eine komplexen Lichtanlage zu installieren, entstand die Idee einer Nachrüstlösung, die sich auf das zentrale Gerät eines Wissensarbeitsplatzes – den Monitor – konzentriert.

Durch die Nutzung von RGB-LEDs ist es weiterhin möglich, die eingangs erwähnte Lichtgestaltung mittels dynamischen Lichts im Gesichtsfeld des Wissensarbeiters umzusetzen sowie eine Tageslichtnachahmung zu applizieren. Dies kann durch die Beleuchtung eines Raumausschnittes nicht umfassend erfolgen und sollte nach Möglichkeit durch weitere tageslichtnachahmende Lichtquellen ersetzt werden. Die LEDs ermöglichen es außerdem, manuell oder gesteuert zu bestimmten Zeiten bzw. Situationen, blaues Licht zur Aktivierung auszusenden und farbiges, dynamisches Licht zur Förderung der Kreativität auszustrahlen.

2.2 Komponenten und Steuerung des OWLIGHT-Prototypen

Das OWLIGHT-System integriert mehrere Szenarien und Sonderszenarien, die von der Software im PC gesteuert werden, welche Jahres-, Uhrzeit und Nutzervorgaben einbezieht. Weiterhin sind mehrere Sensormodule enthalten, die die Szenarien beeinflussen.

Der Arbeitsprozess eines Wissensarbeiters wechselt zwischen Arbeiten am PC, Arbeiten mit Papierdokumenten, Telefonieren und Face-to-Face-Kommunikationen. Für diese **Szenarien** wird in einer Standardkonfiguration eine Kontrastanpassung und Tageslichtnachahmung durchgeführt und in der Mittagszeit zusätzlich blaues Licht abgegeben. Während des Telefonierens wird die Dynamik deaktiviert, um einen gewissen beruhigenden Einfluss auszuüben sowie innerhalb Kommunikationsphasen wärmeres Licht eingestellt, um die Umgebung etwas persönlicher zu gestalten (Abb. 2).

Für bestimmte Situationen sind **Sonderszenarien** manuell wählbar. Wenn die Vigilanz sinkt und der Wissensarbeiter die Beleuchtung kompensierend anpassen möchte, kann blaues und damit aktivierendes Licht gewählt werden. Zur Unterstützung dieses Effektes kann stark dynamisches Licht zugeschaltet werden. Zu Förderung der Kreativität während Inspirationsphasen besteht zudem die Möglichkeit, farbig wechselndes Licht zuzuschalten (Abb. 3).

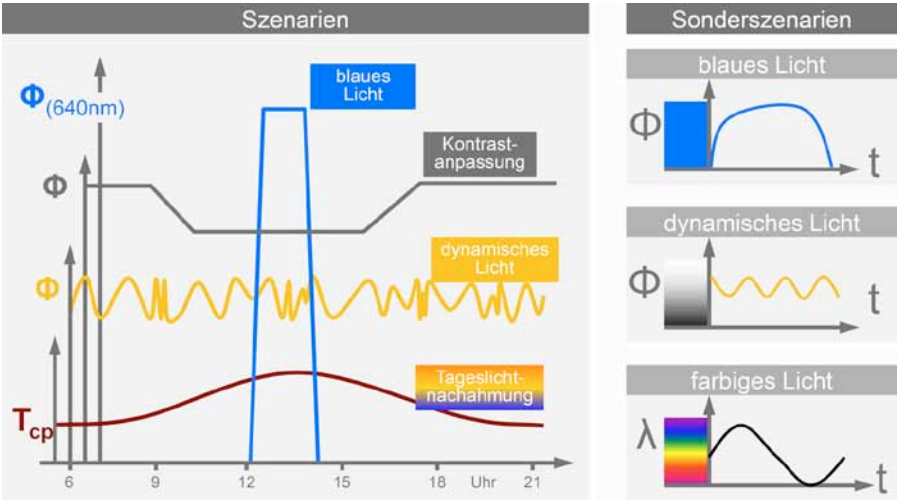


Abb. 2: Steuerung der Lichtparameter für den Standardablauf (Szenarien links) und für besondere Situationen (Sonderszenarien rechts)

Zur erweiterten Steuerung des OWLIGHT sind mehrere Sensormodule vorgesehen. Ein Lichtsensor dient der Nachführung der Kontrastanpassung je nach Umgebungssituation. Mittels eines Bewegungs- bzw. Anwesenheitssensors kann die Situation des Wissensarbeiters bis zu einem gewissen Maße detektiert werden. Der Akustiksensor hilft, eine Kommunikationssituation zu erkennen.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Evaluierung des Systems sollen anfangs Expertenevaluierungen des Prototyps genutzt werden, um einen iterativen Entwicklungsprozess durchzuführen. Hierbei wird der Prototyp je einem Experten für einen Tag zur Verfügung gestellt und anschließend mittels eines Interviews ausgewertet. Nutzerevaluierungen mit Vergleichsgruppen mit und ohne das System sowie längerfristige Untersuchungen sollen zukünftig weitere Aspekte einbeziehen und das System stetig weiterentwickeln. In diesem Zusammenhang sind auch der Aufbau und die Integration der beschriebenen Sensormodule sowie die Erweiterung der Steuerung und der PC-Software geplant.

Quellenverzeichnis

amBX. (2012). amBX - Creating unique experiences with light. amBX UK Ltd. Zugriff am 01.03.2012: http://www.ambx.com/.

ARFX. (2012). Ambient Reality FX. Zugriff am 01.03.2012: http://www.arfx.nl/shop/.

ASR A3.4. (2011). Technische Regeln für Arbeitsstätten - Beleuchtung. Ausschuss für Arbeitsstätten, Bundesministerium für Arbeit und Soziales (Hrsg.). Beuth Verlag GmbH

Bartenbach, Christian; Witting, Walter. (2008). Handbuch für Lichtgestaltung: Lichttechnische und wahrnehmungspsychologische Grundlagen. Springer Vienna.

Bieske, K.; Schierz Ch. (2010). Dynamische Beleuchtungssysteme - Zeitliche Variation der Lichtfarbe. Tagungsband 19. Gemeinschaftstagung, Wien. Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. (Hrsg.).

BAuA. (2011). Kleine ergonomische Datensammlung. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.

Cajochen, Christian, Münch, Mirjam; Kobialka, Szymon; Kräuchi, Kurt; Steiner, Roland; Oelhafen, Peter; Orgül, Selim; Wirz-Justice, Anna. (2005). High Sensitivity of Human Melatonin, Alertness, Thermoregulation, and Heart Rate to Short Wavelength Light. Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism, Nr. 90(3), S. 1311–1316.

DIN 5034-1 (2011). Tageslicht in Innenräumen – Allgemeine Anforderungen. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN EN 12464-1. (2011). Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN V 5031-100. (2010). Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik – Teil 1: Über das Auge vermittelte, nichtvisuelle Wirkung des Lichts auf den Menschen – Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Frieling, H. (1992). Farbe am Arbeitsplatz. München: Bayrisches Staatsministerium für Arbeit und Sozialordnung.

Fueglistaller, Urs. (2005). Wo Ideen entstehen und wie sie zu Innovationen transformiert werden. KMU-Magazin, Nr. 7, September 2005.

Heller, Eva. (1999). Wie Farben wirken. Reinbeck bei Hamburg: Rowohlt Taschenbuch Verlag GmbH.

Glöckner, Stev; Spanner-Ulmer, Birgit (2010). Projekthaus METEOR - innovativ Forschen und Arbeiten in der Arbeitswelt von Morgen. Nachhaltigkeit in Planung und Produktion, Tagungsband 4. Symposium Wissenschaft und Praxis und 8. Fachtagung Vernetzt planen und produzieren - VPP2010. 11. November 2010, Chemnitz, Institut für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, S. 61-69.

Kleinhenz, Stefan. (2011). Der Büroarbeitsplatz. Handbuch für Gestaltung von Arbeitsplätzen im Büro. Dr. Curt Haefner-Verlag.

LASI - Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik. (2005). Handlungsanleitung zur Beleuchtung von Arbeitsstätten. ISBN 3-936415-39-0.

licht.wissen.19 (2010). Wirkung des Lichts auf den Menschen. Frankfurt am Main: licht.de, Fördergemeinschaft Gutes Licht (Hrsg.).

Möller, Katrin; Dehoff, Peter; Söllner, Stefan; Khanh, Tran Quoc. (2010). LED-Bürobeleuchtung zur Förderung von visueller Leistungsfähigkeit, Motivation, Konzentration und Wohlbefinden / Bestandsaufnahme von Bürobeleuchtung im Hinblick auf die nichtvisuelle Lichtwirkung; Tagungsband 19. Gemeinschaftstagung, Wien. Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. (Hrsg.) .

Mühlstedt, Jens; Glöckner, Stev; Spanner-Ulmer, Birgit. (2011). Licht und Farbe am Wissensarbeitsplatz – ergonomische Anforderungen der Nutzer. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (Hrsg.). 57. Arbeitswissenschaftlichen Kongress, S. 331 - 334. Dortmund: GfA-Press.

Neuhaus, Ralf. (2002). Büroarbeit planen und gestalten. Teil 1: Bildschirmarbeit und Büroraumplanung. Institut für angewandte Arbeitswissenschaft e. V.

Rentzsch, Manfred. (1982). Arbeitsumweltgestaltung. Verlag Tribüne Berlin.

Philips Research. (2011). Ambilight - the new TV experience. Zugriff am 01.03.2012: http://www.research.philips.com/technologies/ami/ambilight.html.

Plischke, H.; Schauer, S.; Schülke, A.; Kempter, G. (2007). Untersuchungen zu visuellen und psychophysiologischen Effekten von Fernsehen mit dynamischer Hintergrundbeleuchtung. Generation Research Program, Bad Tölz Humanwissenschaftliches Zentrum der Universität München.

Rafke, P. (2008). MoMoLight. Zugriff am 01.03.2012: http://divxstation.com/article.asp?aId=151.

Stefani, Oliver; Pross, Achim; Bues, Matthias; Hille, Katrin. (2010). Heliosity - Gesunde LED Beleuchtung. Tagungsband 19. Gemeinschaftstagung, Wien. Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. (Hrsg.).

Optimierung der Absolutgenauigkeit von True Color Farbsensoren zur Regelung von n-farbigen LED-Leuchten

Dipl.-Inf. Thomas Nimz
MAZeT GmbH
Göschwitzer Str. 32
07745 Jena
Thomas.Nimz@mazet.de
Tel.: 03641-2809 59

Dipl.-Ing. (FH) Fredrik Hailer
MAZeT GmbH
Göschwitzer Str. 32
07745 Jena
Fredrik.Hailer@mazet.de
Tel.: 03641-2809 9951

1 Einleitung

Es ist bekannt, dass LEDs über die Temperatur einer Wellenlängenverschiebung und Intensitätsänderung unterliegen. Letztere wird zusätzlich durch Alterung verstärkt. In hochwertigen Anwendungen, wie medizinischen Leuchten, Maschinenleuchten oder Flugzeugbeleuchtung, ist aber eine stabile Lichtfarbe über die Lebensdauer einer LED-Leuchte für deren Einsatz Voraussetzung. Dies erfordert eine genaue Regelung des LED-Systems.

Um ein LED-System regeln zu können, wird eine präzise und schnelle Messung des aktuellen Farbortes vorausgesetzt. Für diese Zwecke ist die Verwendung eines True Color Farbsensors (TCS) notwendig. Entgegen eines Spektrometers liefert der TCS drei ADC-Werte, aus denen der Farbort ermittelt werden kann. Für die Regelung bedeutet dies, dass nicht das gesamte Spektrum vorliegt, sondern direkt von dem Farbort auf die LED-Belegung geschlossen werden muss. Somit ist es nötig bei einen LED-System mit mehr als drei verschiedenen LEDs von drei Eingabewerten (XYZ) auf mehr als drei Stellgrößen(für jede LED eine PWM-Belegung), zu schließen. In dem daraus resultierenden unterbestimmten System existieren somit für einen Farbort mehrere Belegungen. Die Eigenschaften des Lichtes je nach Belegung können sich stark unterscheiden, obwohl der resultierende Farbort derselbe ist. In der Praxis bedeutet dies, dass zwei LED-Leuchten zwar dieselbe Lichtfarbe haben, aber die beleuchtete Umgebung unterschiedlich wahrgenommen wird.

Langfristiges Ziel ist, für verschiedene LED-Regelsysteme bestehend aus n-farbigen LED-Leuchten (n >3), True Color Farbsensor und Regelalgorithmus, die genaue Farbortwiedergabe unter Berücksichtigung einer Nebenbedingung.

Zum Beispiel ist der Farbwiedergabeindex eine mögliche Nebenbedingung. Das bedeutet, der Regelalgorithmus ist so optimiert, dass er die LED-Belegung eines Farbortes mit einen möglichst hohen Farbwiedergabeindex (CRI) verwendet.

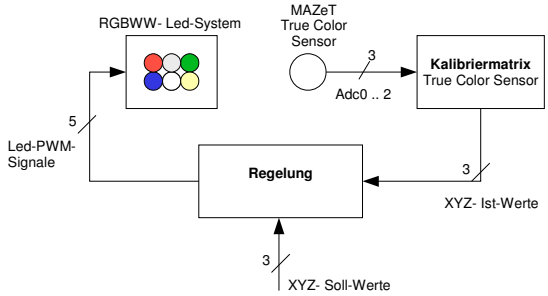


Abb 1: LED- Regelkreis

Ziel der Kalibrierung ist die Optimierung der Absolutgenauigkeit des True Color Farbsensors. Um eine sehr gute Regelung zu ermöglichen, ist es notwendig, dass der Farbsensor in dem gewünschten zu regelnden Farbgamut eine Farbgenauigkeit von 0.003 Δu'v' erreicht. Ziel dieser Untersuchung ist die Ausregelung der Farbtemperaturen 2700K, 4500K und 6500K mit maximaler Genauigkeit.

Im Folgenden wird beschrieben wie die benötigten Messreihen für die Optimierung erstellt werden und anschließend wird die Optimierung der Kalibrierung und deren Ergebnisse vorgestellt.

2 Messreihen

2.1 Ermittlung der Farborte mit passender LED-Belegung

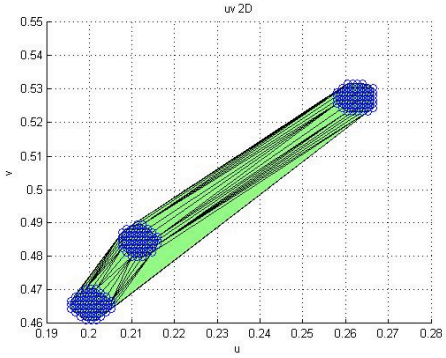


Abb 2: Farborte für 2700K, 4500K und 6500K

Es ist vorgesehen das LED-System auf 2700K, 4500K und 6500K zu optimieren. In einem ersten Schritt müssen in einem Radius von 0.005 um die drei Farbtemperaturen weitere Lu'v'– Farbkombinationen erzeugt werden, die später für die Optimierung der Kalibrierung benötigt werden. Wählt man die Schrittweite von 0,0012, so ergeben sich für jede Farbtemperatur etwa 110 Farbpunkte. Die Helligkeit wird dabei konstant gehalten. Abb 2 zeigt die Verteilung der Messpunkte.

Als Quelle für die notwendigen Messdaten dient ein Messplatz bestehend aus 6 verschiedenen LEDs, jeweils eine rote R, grüne G, blaue B, warmweiße wW, kaltweiße cW und amber A LED (kombiniert RGBwWcWA). Die LEDs werden unabhängig voneinander mittels einer PWM angesteuert. Der MAZeT True Color Farbsensor (MTCS) ist für die LED-Regelung vorgesehen. Für die Referenzmessungen wird das Spektrometer JETI Specbos 1211 verwendet. Zusätzlich wird eine Temperaturregelung zum Kühlen oder zum Beheizen der LED-Platine eingesetzt.

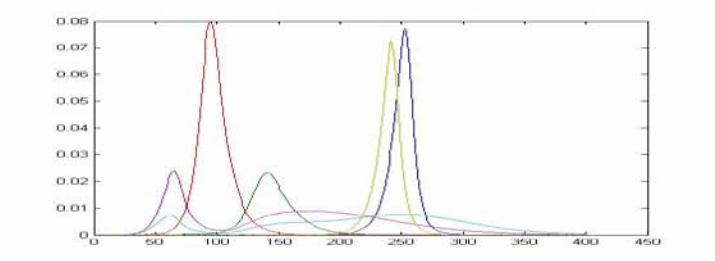


Abb 3:Spektren der LEDs des verwendeten Messplatz

Um mit dem Messplatz real gemessene Werte für die 332 Farborte zu generieren, ist es notwendig die passenden LED- Belegungen zu berechnen. Als Grundlage für die Berechnung dienen die sechs LED-Spektren, gemessen bei 20°C(siehe Abb 3). Mit dem folgenden Verfahren kann trotz des unterbestimmten Systems für jeden Farbort auf eine CRI optimierte PWM-Belegung ermittelt werden.

Schritt 1
Das unterbestimmte System wird auf mehrere bestimmte Systeme zurückgeführt, indem geprüft wird, welches Subgamut, bestehend aus jeweils drei LEDs, den vorgegeben Farbort beinhaltet. Anschließend wird für jedes betroffene Subgamut mittels einer linearen Transformation eine PWM-Belegung ermittelt.

Schritt 2
Optimierung. Ziel des Optimierungsverfahrens ist die verschiedenen PWM-Belegungen aus Schritt 1 so zu einer PWM-Belegung zusammenzusetzen, dass ein möglichst hoher Farbwiedergabeindex erreicht wird.

Schritt 3

Um die Ungenauigkeiten der zusammengesetzten PWM-Belegung, sowie deren Grenzen 0 und 255, zu bereinigen, wird anschließend noch ein Regelkreis simuliert. Hierbei fließt die PWM-Belegung als Startbelegung ein und es wird mit drei ausgewählten LEDs nachgeregelt bis das Delta zum Zielfarbort kleiner 0,003 ist.

2.2 Messungen

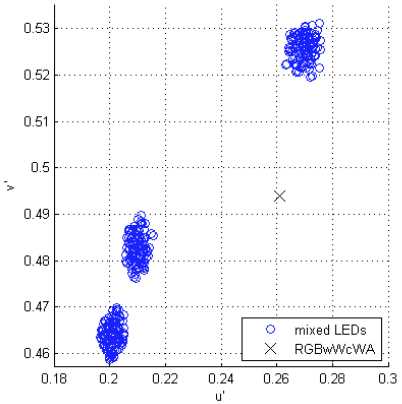


Abb 4: 20 Grad

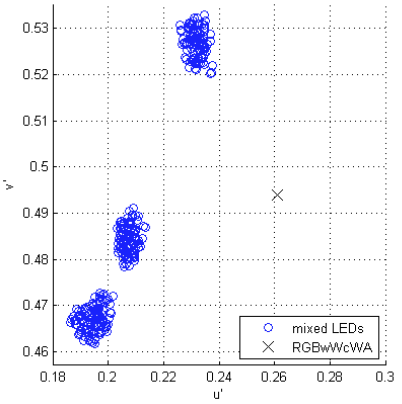


Abb 5: 80 Grad

Die in Abschnitt 2.1 ermittelten PWM- Belegungen dienen als Eingabe für den Messplatz. Ziel der Optimierung ist eine Kalibriermatrix für den TCS zu finden, die im Umkreis der drei Farbtemperaturen 2700K, 4500K und 6500K eine Farbgenauigkeit von 0.003 Δu'v' erreicht. Damit auch die temperaturbedingte Wellenlängenverschiebung und Intensitätsänderung von LEDs gemessen werden kann, werden die oben bestimmten PWM- Belegungen auch bei mehreren Temperaturen vermessen. Über die eingebaute Temperaturreglung ermöglicht der Messplatz Messungen zwischen 20 und 80 ° C.

Die Ergebnisse der Messungen sind 7 Messreihen (20 – 80℃ in 10℃ Schritten), bei der jeweils für jeden der 332 Farborte drei ADC-Werte des True Color Farbsensors und das Referenzspektrum gemessen mit einem Spektrometer vorliegen.

In den Abb 4: 20 Grad und Abb 5 sind die Messwerte des Spektrometers bei 20 ℃ und 80 ℃ gegenübergestellt. Obwohl die vorgegebenen Farborte jeweils die gleichen sind, wird eine deutliche Farbortverschiebung sichtbar. Abhängig von der Betriebstemperatur und der LED-Belegung findet eine Farbortverschiebung von bis zu 0.038 Δu'v' statt. Um diese für das menschliche Auge sichtbare Farbortverschiebung durch eine aktive Regelung auszugleichen, ist es notwendig, dass der True Color Farbsensor in den Messbereichen eine hohe Absolutgenauigkeit erreicht (Δu'v' < 0,003). Aus diesem Grund findet auf Grundlage der

gemessenen Referenzspektren und der ADC-Werte des TCS eine optimierte Kalibrierung des Farbsensors statt. Im Folgenden wird das Optimierungsverfahren genauer vorgestellt.

3 **Optimierung der Absolutgenauigkeit**

Als Kalibriermethode wird eine polynomielle Regression 1. Grades mit Hilfe der Pseudoinversen nach Gleichung (1) verwendet. Die Werte θ_h (2) werden mit einem Referenzspektrometer und die Werte σ_h (3) mit einem True Color Sensor gemessen, wobei h der Anzahl an Kalibriertargets (Primärfarben) entspricht. Bei der vorliegenden Kombination RGBwWcWA ist h = 6. Die Primärfarben werden zeitgleich mit dem Referenzspektrometer und dem Dreibereichsensor bei einer PWM von 100% duty cycle gemessen. Es empfiehlt sich dabei die Kalibrierung bei einer mittleren Temperatur des gesamten Temperaturbereichs durchzuführen. Bei dem vorliegenden Messplatz ist die mittlere Temperatur 50°C in einem Bereich von 20°C bis 80°C.

$$K = \left(\theta_h \cdot {\sigma_h}^T\right) \cdot \left(\sigma_h \cdot {\sigma_h}^T\right)^{-1} \tag{1}$$

$$\theta_h = \begin{pmatrix} X_1 & \cdots & X_h \\ Y_1 & \cdots & Y_h \\ Z_1 & \cdots & Z_h \end{pmatrix} \tag{2}$$

$$\sigma_h = \begin{pmatrix} \tilde{X}_1 & \cdots & \tilde{X}_h \\ \tilde{Y}_1 & \cdots & \tilde{Y}_h \\ \tilde{Z}_1 & \cdots & \tilde{Z}_h \end{pmatrix} \tag{3}$$

Zur Optimierung der Kalibriermethode wird ein zusätzliches ß als Wichtungsfaktor für jede Primärfarbe hinzugefügt. Dieses ß wird mit dem Verfahren „simulierte Abkühlung“ (engl.: SA - Simulated Annealing) bestimmt. Dieses Verfahren zur nichtlinearen Optimierung beruht auf einer stochastischen Suche nach dem globalen Minimum. Dieses Verfahren beruht auf der simulierten Abkühlung eines Materials. Bei hoher Temperatur unterliegen die Atome einer starken Bewegung und ordnen sich bei langsamer Abkühlung zu einer geordneten Kristallstruktur an, welche einen minimalen Energiezustand aufweist und somit am stabilsten für das Material ist. Ist die anfängliche Temperatur nicht hoch genug oder kühlt das Material zu schnell aus, ordnen sich die Atome in einem lokalen Minimum des Energiezustandes an. Es gilt somit eine geeignete Anfangstemperatur und Temperaturabnahme zu finden, um in endlicher Zeit mit hoher Wahrscheinlichkeit das globale Minimum zu finden [SA10]. Die simulierte Abkühlung ist auf die vorliegende Anwendung bezogen verwendbar. Dabei unterliegen die Wichtungsfaktoren ß einer zufälligen Bewegung zwischen 0 und 1, nach deren Kalibrierung das minimale Delta u’v’ ermittelt wird. Mit zunehmender Anzahl an Iterationen verlangsamt sich die zufällige Bewegung und die Wichtungsfaktoren ordnen sich in einem lokalen Minimum an.

Zur Optimierung werden von den über 100 Mischfarben 20 Mischfarben selektiert, sodass diese selektierten Mischfarben möglichst gleichverteilt um die jeweilige Farbtemperatur liegen. Abbildung Abb 6 zeigt diese Selektion für die Farbtemperatur 2700K. Von diesen 20 Mischfarben wird nun der maximale Fehler Δu'v' mittels Simulated Annealing minimiert.

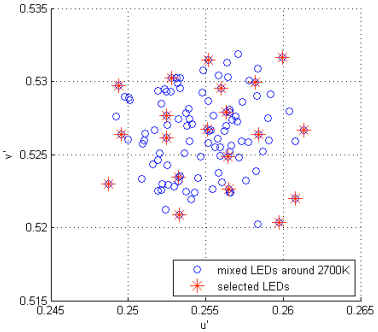


Abb 6: 20 selektierte Mischfarben um 2700K zur Optimierung

Als Prüfung, ob die Optimierung erfolgreich ist, wird die optimierte Kalibrierung auf alle 110 Mischfarben angewandt. Darunter sind also etwa 90 Mischfarben, die während der Optimierung nicht verwendet wurden. Das Ergebnis mit und ohne Optimierung zeigt Tabelle 1. Bei 2700K konnte der maximale Fehler von Δu'v' = 0,0083 auf 0,0057 minimiert werden. Die mittleren Fehler liegen nun unter 0,0034 anstatt bei 0,005. Bei den Farbtemperaturen 4500K und 6500K konnte der maximale Fehler von 0,0035 auf 0,0021 optimiert werden. Im Mittel liegen sie deutlich unter 0,0011.

		max Δu'v'		**mitteleres Δu'v'**	
	Temperatur	**standard**	**optimiert**	**standard**	**optimiert**
2700K	20°C	0,0083	0,0057	0,0050	0,0029
	50°C	0,0067	0,0035	0,0039	0,0018
	80°C	0,0070	0,0056	0,0037	0,0034
4500K	20°C	0,0029	0,0017	0,0020	0,0011
	50°C	0,0030	0,0012	0,0019	0,0008
	80°C	0,0035	0,0020	0,0020	0,0006
6500K	20°C	0,0020	0,0017	0,0011	0,0009
	50°C	0,0017	0,0016	0,0008	0,0006
	80°C	0,0020	0,0021	0,0007	0,0005

Tab. 1: Ergebnis mit und ohne Optimierung über 108-114 Mischfarben

4 Zusammenfassung

Für die Anforderungen einer hochwertigen LED-Leuchte mit stabiler Lichtfarbe über die komplette Lebensdauer ist gezeigt, dass die Messung mit einem True Color Sensor hinreichend genau ist, um eine nachfolgende Regelung zu ermöglichen.

Mittels der Optimierung kann die Messgenauigkeit des True Color Sensors für neutral- (4500K) und kaltweiß (6500K) auf Δu'v' < 0,0021 verbessert werden. Bei warmweißen Licht (2700K) wird aufgrund des hohen Einflusses der amber und der roten LED, welche einen sehr hohen Temperaturdrift besitzen, ein maximales Δu'v' von 0,0057 erreicht. Für diesen

Farbbereich ist es notwendig die Optimierung auf die Eigenschaften der LEDs weiter anzupassen.

Mit dem entwickelten Messplatz und der Optimierung sind die Grundlagen für die Umsetzung von LED-Regelungen mit 4 oder mehr LEDs vorhanden. Es ist geplant die Optimierung weiter zu verbessern und die Entwicklung der Regelalgorithmen voranzutreiben. Ein Ansatz für eine LED-Regelung ist der in Absatz 2.1 vorgestellte Ablauf zur Ermittlung der PWM- Belegung.

Weiterhin ermöglicht der aufgebaute Messplatz eine schnelle Umrüstung auf kundenspezifische LED-Systeme. Dies erlaubt eine kostengünstige Validierung weiterer LED-Systeme bestehend aus MTCS und 4 oder mehr verschiedene LEDs. Gesamtziel sind LED-Regelsysteme mit einer Absolutgenauigkeit von maximal $\Delta u'v' = 0{,}003$ und einen CRI über 90 auf der plankschen Weißkurve.

5 Dank

Die Autoren möchten sich bei Prof. Dr.-Ing. Joachim Denzler, Prof. Dr. Walter Alt (beide Friedrich-Schiller-Universität Jena) sowie von Prof. Dr.-Ing Mladen Berekovic (Technische Universität Braunschweig) für die hilfreiche Unterstützung bedanken.

Quellen

[SA10] WWW.EBERL.NET. Simulated Annealing, 12:14Uhr 14.02.2010. URL: http://www.eberl.net/chaos/Eberl/node50.html.

Modernisierung der Stadtbeleuchtung Cottbus – Erfahrungsbericht eines PPP Modells

Hans-Jürgen Rathmann

Alliander Stadtlicht GmbH

Egellsstraße 21

13507 Berlin

Aufgrund geringer Investitionen im Bereich der öffentlichen Straßenbeleuchtung in der Vergangenheit werden Beleuchtungssysteme meist weit über ihre betriebliche Nutzungsdauer hinweg genutzt und befinden sich bundesweit in einem veralteten Zustand. Dies bedeutet für zahlreiche Kommunen einen ineffizienten Betrieb der Beleuchtungsanlagen mit erheblichen finanziellen Aufwendungen insbesondere im Bereich des Energieverbrauchs und der Instandhaltung. Daher entschied sich die Stadt Cottbus im Jahr 2008, ihre öffentliche Beleuchtung sowie damit verbundene Aufgaben als Modell einer Öffentlich-Privaten Partnerschaft zu organisieren. Über ein mehrstufiges Verhandlungsverfahren konnten die Bewerber dabei ihre Leistungsfähigkeit darlegen und entsprechende Vorschläge einbringen. Die von der Stadt Cottbus gewählte Vorgehensweise basiert auf den wesentlichen Grundgedanken des Contractings. Der Contractor erneuert Beleuchtungsanlagen auf eigene Kosten. Er übernimmt das wirtschaftliche Risiko für ein geplantes Projekt, optimiert den Energieverbrauch und ist mit der Instandhaltung der Beleuchtungsanlagen betraut. Hierbei sollen beide Vertragspartner gewinnen, da sich die Anlagen durch eingesparte Kosten über eine vereinbarte Amortisationszeit finanzieren. Durch die Kombination von Einsparcontracting und zwölfjähriger Betriebsführung wird in Cottbus der Energieverbrauch der gesamten Öffentlichen Beleuchtung um 32,3 Prozent reduziert. Von den Modernisierungsmaßnahmen sind in Cottbus 4.785 Leuchten betroffen, was einer Auswechselquote von ca. 36% entspricht. Um in kurzen Zeitläufen möglichst hohe Einsparungen zu erzielen, werden die Leuchten möglichst zu Vertragsbeginn ausgetauscht.
Parallel zum Management der Stadtbeleuchtung erfordert die Strukturierung und Gestaltung der Stadt in der Nacht einen kompetenter Partner zur kommunalen Entwicklung. Die Stadt soll energieeffizient und sicher beleuchtet werden und dabei das nächtliche Erscheinungsbild verbessert werden.

Cottbus ist als bestes Beispiel zu sehen, wie lichttechnisches Entwicklungspotenzial in einer öffentlich-privaten Partnerschaft ausgeschöpft werden kann in finanzieller, energetischer und auch stadtgestalterischer Sicht.

Einsatz moderner LED Leuchten für die Beleuchtung von Arbeitsplätzen im Freien am Beispiel eines Autozugterminals

Dr.-Ing. Jan Reinhardt,
Philips Lighting
Professional Lighting Solutions
Lübeckertordamm 5
20099 Hamburg

jan.reinhardt@philips.com

Emil Wiederhold, Dipl.-Ing. (FH)
Philips Lighting
Professional Lighting Solutions
Lübeckertordamm 5
20099 Hamburg

emil.wiederhold@philips.com

Einleitung

Bei der Beleuchtung eines Autozugterminals auf der Insel Sylt; Ortsteil Westerland, sind die strengen Anforderungen der Deutschen Bahn an die Beleuchtung von Arbeitsplätzen im Freien zu erfüllen /Lit. 1 und 2/. Zu beleuchten ist eine Mischverkehrsfläche mit Fußgängern, Kraftfahrzeugen und Zugverkehr.

Die Errichtung der Anlage (mit einer Länge der zu beleuchtenden Fläche von bis zu 580 m und einer Breite bis zu 80 m) hat im Juni 2012 begonnen.

Aus ökonomischen Gründen ist die Beleuchtung mit geringen Kosten zu betreiben. Gleichzeitig sind die politischen Anforderungen an den Klimaschutz zu berücksichtigen, also niedrige CO_2 Emissionen. Für ein Konzept auf Basis von Nachhaltigkeit statt Verzicht sind hochwertige und moderne LED Leuchten besonders geeignet.

Ein langlebiges Leuchtmittel reduziert, gerade bei hohen Masten, den Wartungsaufwand und erhöht die Betriebssicherheit. Bei konventionellen Leuchten bedeutet der Ausfall eines Leuchtmittels einen lokalen Totalausfall der Beleuchtung. Dagegen führt der Ausfall einer einzelnen LED nur zu einer lokal leicht reduzierten Beleuchtung.

Im Falle eines kurzzeitigen Netzausfalls ist eine sofortige Inbetriebnahme der Beleuchtung ohne aufwendige Heißwiederzündung wie bei Entladungslampen möglich.

Weißes Licht ermöglicht eine gute Farbwidergabe und damit neben einem hohen Beleuchtungskomfort auch sehr gute Sehbedingungen.

1 Gütekriterien der Beleuchtung

Von der Deutschen Bahn wurde eine Wartungswert von 20 lx bei sehr guter Gleichmäßigkeit ($U_0 \geq 0{,}40$ und $U_d \geq 0{,}33$) vorgegeben. Parallel wurde eine Ersatzbeleuchtung (Wartungswert 15 lx) gefordert. Gleichzeitig wurde die Masthöhe auf nur 10 m begrenzt.

Neben der sicheren Einhaltung der Beleuchtungsqualität wurden eine hohe Betriebssicherheit und geringer Wartungsaufwand gefordert.

2 Ökonomische Betrachtungen

Die Beleuchtungsaufgabe erfordert den Einsatz von 52 Einzel- und 14 Doppelleuchten (Bestückung je 52 LEDs, bei Bestromung 500 mA und einer Farbtemperatur von 5700 K). Gegenüber der ursprünglichen Planung mit konventionellen Leuchten für Leuchtmittel HST konnte die Anschlussleistung (und damit auch Energiekosten und CO_2 Emissionen) um 35 % reduziert werden,
Bei der Kostenberechnung ist die relevante Größe der TCO Wert. TCO steht für „Total Cost of Ownership“ und berücksichtigt als Lebenszyklusmodell alle während des Betriebs anfallenden Kosten (Finanzierung einer neuen Leuchte mit Anschaffung und Kreditzinsen, Wartungs- und Energiekosten,…).

Auch wenn man bei LED Leuchten um 500 Euro höhere Anschaffungskosten annimmt, sinken die TCO Kosten über einen Zeitraum von 20 Jahren um ca. 950 Euro pro Leuchte (Basis: aktueller Strompreis 0,20 Euro pro kWh und 4 100 Betriebsstunden pro Jahr, bei jährlicher Steigerung der Kosten bzw. Energiekosten um 2,5 bzw. 5,0 %). Für die gesamte Beleuchtungsanlage des Autozugterminals können gegenüber dem Betrieb der Anlage mit modernen hochwertigen Leuchten für konventionelle Leuchtmittel 77 000 Euro oder 22 % der Kosten eingespart werden.

3 Ökologische Betrachtungen

Moderne und hochwertige LED Leuchten weisen trotz in der Regel deutlich höheren Anschaffungskosten eine Reihe von Vorteilen gegenüber Leuchten mit konventionellem Leuchtmittel auf. Nur ein Teil der Ersparnisse bei den Energiekosten wird für die Finanzierungskosten (mit Zins und Tilgung) benötigt.

Daher sind die ökologischen Vorteile von guten LED Leuchten deutlich höher als die ökonomischen Vorteile. Bei dieser Anlage konnten (auch gegenüber aktueller Technik) sofort 35 % des Energiebedarfs und damit auch der CO_2 Emissionen eingespart werden, bei Reduzierung der Gesamtkosten von gut 20 %.

Pro Leuchte ergeben sich jährliche Einsparungen von 92 (bzw. 101) Kilogramm CO_2. Über einen Zeitraum von 20 Jahren können in der gesamten Anlage damit 148 (bzw. 162) Tonnen CO_2 eingespart werden. Diese Ergebnisse basieren auf einem spezifischen CO_2 Emissionsfaktor 508 g/kWh /Lit. 3/ (bzw. 559 g/kWh, /Lit. 4/).

In vielen Bereichen werden Investitionen mit höheren TCO Kosten akzeptiert, um die Klimaziele zu erreichen. Dagegen ist es in kaum einem anderen Bereich möglich, CO_2 Emissionen so wirkungsvoll (niedrige Investitionen bei positiver TCO Bilanz) und schnell zu reduzieren wie durch den Einsatz der Leuchtdiode in der Außenbeleuchtung. Ein Bonus durch eingesparte CO_2 Emissionen für die Umrüstung der Beleuchtungsanlage wäre logisch.

Mit moderner Beleuchtung werden nicht nur Zusatzkosten vermieden, sondern die Umstellung auf LEDs ermöglicht sogar eine ökonomische Entlastung des Betreibers. Aus diesem Grunde sollten Investitionen in den Klimaschutz vorrangig im Bereich der Außenbeleuchtung erfolgen.
Eine ausführliche Diskussion der ökonomischen und ökologischen Eigenschaften von LED Leuchten ist in /Lit 5 und 6/ zu finden.

4 Zusammenfassung

Investitionen in moderne und hochwertige LED Leuchten sind auch bei der Beleuchtung von Gleisfeldanlagen geeignet, schnell und deutliche CO_2 Emissionen zu senken und gleichzeitig die Budgets zu entlasten.

Der Einsatz von LED Leuchten kann bei normgerechter Beleuchtung Energiebedarf und CO_2 Emissionen gegenüber modernen konventionellen Leuchten um 35 % senken. Trotz höherer Investitionskosten können die TCO Kosten um über 20 % verringert werden.

Die Deutsche Bahn nimmt im Spätsommer 2012 die Beleuchtung des Autozugterminals auf der Nordseeinsel Sylt, Ortsteil Westerland, als erste LED Anlage im gleisnahen Bereich in Betrieb. Damit sollen im praktischen Betrieb Langzeiterfahrungen mit der LED Beleuchtung gewonnen werden.

Literaturnachweis

1. TU 954.9103, Anhang 4, Beleuchtungsanlagen im gleisnahen und/oder sicherheitsrelevanten Bereich; Lichttechnische Anforderung für Außen- und sonstige Anlagen, Vorschriften und Werksnormen der Deutschen Bahn AG, Fachautor Dirk Henkel, März 2011

2. DIN EN 12464-2, Licht und Beleuchtung, Beleuchtung von Arbeitsstätten, Teil 2: Arbeitsplätze im Freien, Oktober 2007

3. Durchschnittswerte der Stromerzeugung in Deutschland 2009 (Quelle: BDEW). Informationen von Vattenfall unter http://www.vattenfall.de/de/privatkunden-bundesweit-stromkennzeichnung.htm?WT.ac=search_success; Mai 2012

4. Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2010 und erste Schätzungen 2011. Publikation Umweltbundesamt unter http://www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/co2-strommix.pdf; Mai 2012

5. Reinhardt, Jan: Leuchtdioden – ein (das?) neue Leuchtmittel für die Außenbeleuchtung? Jahrbuch 2010 zur Straßen- und Außenbeleuchtung, EW Medien und Kongresse GmbH , Frankfurt, Berlin, Heidelberg Bonn; 2010, S. 212 ff.

6. Neufassung DIN 67523 zur Beleuchtung von Fußgängerüberwegen – neue Anforderungen an konventionelle und LED Leuchten, Tagungsband der Gemeinschaftstagung der lichttechnischen Gesellschaften. Deutschlands, der Niederlande, Österreichs und der Schweiz, Berlin, September 2012

7. Karte der Nordseeinsel Sylt, Ortsteil Westerland, aus Google Maps, Juni 2012, http://maps.google.de/maps?hl=de&pq=keitumer+chaussee,+westerland&cp=7&gs_id=s&xhr=t&q=westerland&rls=com.microsoft:de:IE-SearchBox&bav=on.2,or.r_gc.r_pw.r_qf.,cf.osb&biw=1536&bih=739&wrapid=tljp1339397045762012&um=1&ie=UTF-8&ei=upPVT_mhEIPesgbvy8mXDw&sa=X&oi=mode_link&ct=mode&cd=3&sqi=2&ved=0CGUQ_AUoAg

Papier und Licht

Univ.Lektorin DI Gudrun Schach, Department of Spatial and Sustainable Design, Technische Universität Wien

Das Modul ‚SuDeCo'

Sustainable **De**sign and **Co**mmunication Strategies will einen Denkprozess in Gang setzen, der auf die veränderten Rahmenbedingungen der heutigen Zeit Bezug nimmt.

Der Gestalter ist nicht länger Formfinder, sondern Gestalter von Produktwelten. Die soziale Komponente spielt eine ebenso wichtige Rolle, wie die Betrachtung von Produkten unter dem Gesichtspunkt des Lebenszykluses. Die Identität von neuen Produkten muss formuliert, entwickelt und kommuniziert werden. Wir haben eine verantwortungsvolle Rolle in Bezug auf wirtschaftliche, politische und soziale Auswirkungen. Studierende lernen die Entwicklung, Umsetzung und Kommunikation von nachhaltigen Projekten. Die Beziehungen von Produkt-, Kommunikations-, Distributionspolitik werden dargestellt. Die Werkzeuge und Strategien werden praxisnah vermittelt und am eigenen Projekt angewendet.

Von der Konzeption bis zur Vermarktung

Der Prozess soll von der Konzeption bis zur Vermarktung dargestellt werden. Ziel ist eine ganzheitliche und nachhaltige Betrachtung einer raumbezogenen Objekt- und Produktgestaltung.

Vorlesungen vermitteln die Wissensgebiete.

Begleitende Übungsteile zeigen, wie die Theorie angewandt wird. Die Kernfächer begleiten den Designprozess von der Ideenfindung bis zur Vermarktung und vermitteln theoretisches Wissen anhand von praktischen Beispielen.

Ergänzungsfächer bieten die Möglichkeit der Vertiefung.

Anhand einer Übungsaufgabe werden die Stadien eines Projektes von der Idee, über das Konzept anhand von Modellen bis hin zu einem Prototypen im Maßstab 1:1 entwickelt. Das Unternehmen ‚ecoLUCY' dient den Studierenden als fiktives Szenario für eine erfolgreiche Produktvermittlung.

Aufgabenstellung

Das Modul ‚SuDeCo' wird anhand des Übungsthemas ‚Licht und Papier' erarbeitet. Ziel ist die Entwicklung einer hängenden Leuchte, die innovative Lösungen mit neuen Leuchtmitteln und dem Einsatz von Papier vorsieht. Parallel zur räumlichen Lösung werden Kommunikationsstrategien entwickelt und umgesetzt. Leuchten werden als Designprodukte entwickelt, stehen als Objekt für sich und definieren die Stimmung des Raumes. Es ist ein hängendes Leuchtobjekt zu gestalten, das einen Raum in seiner Lichtstimmung prägt. Das Objekt ist als Prototyp zu entwickeln und als Serienprodukt zu konzipieren.

Kommunikationsstrategien werden erarbeitet und der Öffentlichkeit vorgestellt. Papier wird als Material verwendet, um die Verarbeitung ohne Werkstätten zu ermöglichen und um

konzentriert die Vor- und Nachteile dieses Werkstoffes auszutesten. Der Einsatz effizienter Leuchtmittel soll ausgelotet werden.

Berufsfeld

Architektur, Design, Objekt- und Produktgestaltung, Stadtgestaltung, Kommunikation, PR, Identität

Forschungsfeld

Sustainable design umfasst die Bereiche ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeit und erforscht Wege, diese Inhalte adäquat zu kommunizieren.

Kernfächer

VO 1,0h I Identität und visuelle Kommunikation - Erwin Bauer
VO 1,0h I Marketing und PR - Beatrix Roidinger
VU 2,0h I Praxis und Theorie des Sustainable Designs - Harald Gründl
VU 2,0h I Objekt und Raum - Anton Kottbauer
VU 2,0h I Objekte im Raumkontext - Claudia Walther

Ergänzungsfächer

UE 3,0h I Angewandte Laborpraxis - Mark Wallerberger
UE 1,0h I Identität und visuelle Kommunikation - Erwin Bauer
UE 1,0h I Marketing und PR - Beatrix Roidinger

Partner

Department of Spatial and Sustainable Design
Institut für Architektur und Entwerfen, Technische Universität Wien
Universität für angewandte Kunst Wien
Institute of Design Research Vienna

Abb.1: Ausstellung der Studenten Arbeiten Ecolucy

Beleuchtung für Museen – Tageslichtsteuerungsysteme und state-of-the-art Lichttechnologien für hochwertige Museumsarchitektur

Prof. Dipl.-Ing. Andreas Schulz
Dipl.-Ing. Laura Sudbrock
Licht Kunst Licht AG
Jagdweg 16 | 53115 Bonn
Tel. +49 (0) 228 914 220
bonn@lichtkunstlicht.com
www.lichtkunstlicht.com

1 Problemstellung

Eine exzellente Farbwiedergabe und die kostenfreie Verfügbarkeit zeichnen das Tageslicht für eine Verwendung im Museum aus. Die Dynamik des Tageslichts ermöglicht ein lebhaftes Erleben der Kunst, stellt hinsichtlich der konservatorischen Anforderungen und hinsichtlich der Vermeidung sommerlicher Überwärmung jedoch eine Herausforderung dar. Insbesondere die konservatorischen Anforderungen an die Beleuchtung haben in vielen Museen dazu geführt, das Tageslicht auszuschließen und ganz auf künstliche Beleuchtung zu setzen. Dieses ist unbefriedigend, da eine Beleuchtung mit Tageslicht einer künstlichen Beleuchtung qualitativ überlegen sein kann. Die hohen Qualitätsanforderungen an die Beleuchtung in Museen haben zudem bei der künstlichen Beleuchtung eine im Verhältnis zu anderen Nutzungen höhere spezifische Leistungsaufnahme der elektrischen Beleuchtungsanlage zur Folge. Die Beleuchtung kann bis zu zwei Drittel des Primärenergieverbrauchs eines Museums ausmachen.

2 Zielsetzung

Die hohen Kosten des Energieverbrauchs der Beleuchtung in Museen legen die Nutzung des kostenfrei zur Verfügung stehenden Tageslichts nahe. Damit das Tageslicht im Museum genutzt werden kann, muss die Dynamik des Tageslichts hinsichtlich der konservatorischen Anforderungen und der solaren Wärmequellen beherrscht werden. Hier stehen für die Ober- und Seitenlichtbeleuchtung verschiedene Strategien zur Verfügung.

3 Was ist innovativ / “best practice an der Lösung?

In den von Licht Kunst Licht gemeinsam mit den Architekten dieser Projekte entwickelten Beleuchtungskonzepten, werden verschiedene Strategien verfolgt, um dieses Ziel zu erreichen:

3.1 Emil Schumacher Museum, Hagen

Neubau eines Museumsgebäudes, Tageslichtsteuerungssystem mit beweglichen Lichtminderungsbehängen, Kunstlichtdecken, Entwicklung eines Lichtkanals zur Aufnahme von Strahlern.

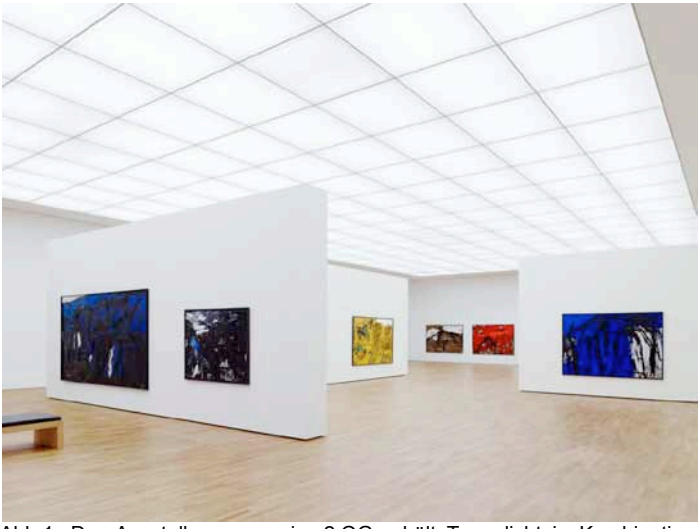


Abb.1: Der Ausstellungsraum im 2.OG erhält Tageslicht in Kombination mit einem Kunstlicht-System in der Spannlichtdecke. Die Lichtdecken schaffen Ruhe und eine blendfreie, homogene Ausleuchtung der Bilder. Bild: Lukas Roth.

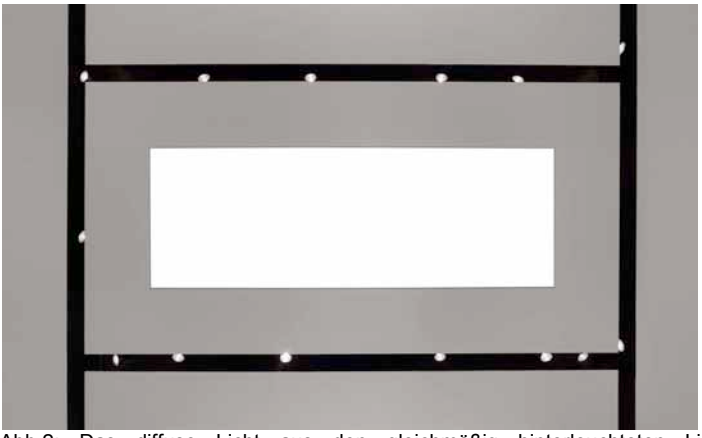


Abb.2: Das diffuse Licht aus den gleichmäßig hinterleuchteten Lichtdecken dient zur Grundbeleuchtung. Flexible Strahler an Stromschienen in einem Lichtkanal ermöglichen eine akzentuierende Beleuchtung der Kunstwerke, ohne die Strahler in den Vordergrund zu setzen.
Bild: Lukas Roth.

3.2 Villa Vauban, Luxemburg

Neubau eines Ausstellungsgebäudes, Sanierung einer Villa, Beleuchten von Ausstellungssälen über Dachoberlichter und kombinierte Tageslicht- Kunstlichtdecken, feststehender Sonnenschutz in der primären Dachebene.

Abb.3/4: Bedarfsgerecht durch Kunstlicht ergänzt, kommt das natürliche Licht in den Ausstellungssälen im Obergeschoss des Neubaus zum Einsatz. Sie werden von großflächigen Lichtdecken überspannt. Bilder: Lukas Roth.

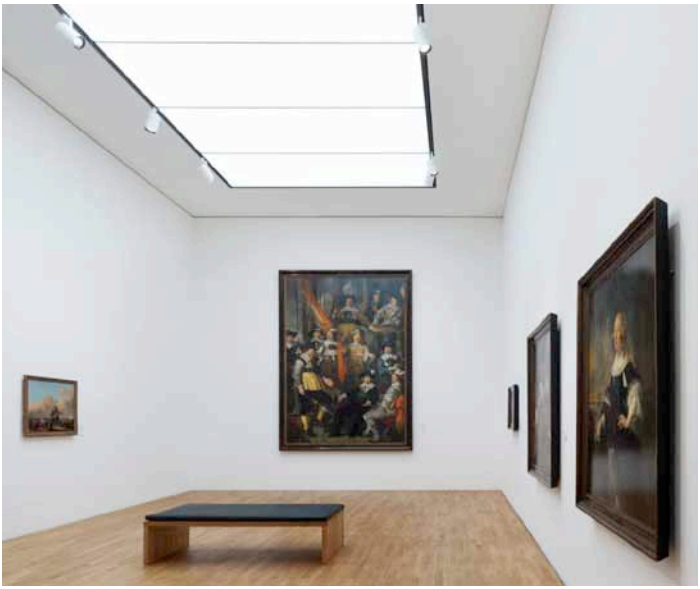


Abb.5: Kunstlichtdecken in den Ausstellungsräumen des Untergeschosses. Eine die Lichtfläche umlaufende, zurückgesetzte Fuge nimmt Lüftungsschlitze und eine Stromschiene auf. In Letzterer können flexibel, dem jeweiligen Ausstellungskonzept entsprechend Strahler platziert werden.
Bild: Lukas Roth.

3.3 Kunstsammlung NRW K20, Düsseldorf

Sanierung und Revitalisierung der bestehenden Lichtdeckensegel, Entwicklung eines Kunstlicht- und Tageslichtsystems unter Berücksichtigung der vorhandenen Struktur, Belüftung und Brandschutz

Abb.6: Für rund 920 Deckensegel im Bestandsbau des Museums wurde ein neues PETG-Material gefunden, welches sowohl vom Tages- als auch vom Kunstlicht hinterleuchtet wird. Fast 1.700 Leuchten mit neuer Lichttechnik hinterleuchten im Kunstfall die Deckensegel. Bild: Thomas Mayer.

Abb.7: Die Vitalität und Dynamik des Tageslichts ist in den Ausstellungsräumen spürbar, während im Innenraum eine blend- und schattenfreie Beleuchtung der Gemälde gewährleistet ist. Bild: Thomas Mayer.

3.4 Museum der Bayerischen Könige, Hohenschwangau

Sanierung und Erweiterung eines historischen Gebäudeensembles, Integration von state-of-the-art Lichttechnologien und LED-Sonderlösungen zur Hinterleuchtung von Deckengewölbe und Displays.

Abb.8: Das gesamte Gewölbe des Ausstellungssaals ist als Lichtdecke ausgeführt. In jedes der Kassettenfelder ist eine gebogene Plexiglasplatte mit LED-Hinterleuchtung eingepasst. In ausgewählten Deckenfeldern wurden zusätzlich LED-Strahler hinter der Abdeckung platziert, um besondere Exponate mit druckvollem Akzentlicht zu betonen. Bild: Marcus Ebener.

Abb.9: Die LED setzt in jeder Raute zwischen den Stahlrippen einen brillanten Lichtpunkt und verbreitet in der Plexiglasabdeckung eine sanfte Korona. Bild: Marcus Ebener.

3.5 Neue Galerie, Kassel
Sanierung eines klassischen Museums-Oberlichtes bestehend aus einer primären Dachverglasung, einem Oberlichtraum und einer Staubdecke. Feststehender prismatischer Sonnenschutz im Zwischenraum der Verglasung. Tages- und Kunstlichtdecke.

Abb.10: In den Oberlichtsälen des Obergeschosses wurden in den Zwischenebenen die Tageslichtsteuerungselemente integriert, so dass den konservatorischen Anforderungen entsprechend der Tageslichteinfall gesteuert werden kann. Durch das transluzente Lichtdeckenmaterial bleibt die Wahrnehmung für das Außenambiente erhalten. Bild: Werner Huthmacher.

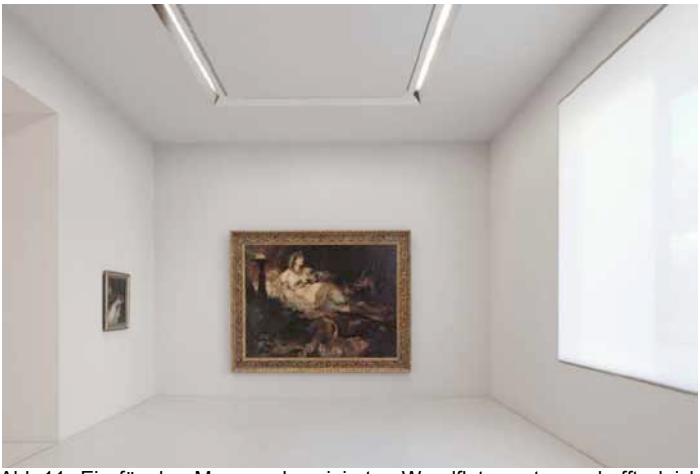


Abb.11: Ein für das Museum konzipiertes Wandflutersystem schafft gleichmäßige Leuchtdichten bei minimalem Energieeinsatz. In einigen Räumen wurde die Filterung des einfallenden Tageslichts in Kombination mit dem Kunstlichtsystem auf die konservatorischen Anforderungen für die ausgestellten Gemälde abgestimmt. Bild: Werner Huthmacher.

3.6 Städelsches Kunstinstitut, Frankfurt am Main

Neubau eines unterirdischen Ausstellungssaals, begehbare horizontale Dachoberlichter, komplexe bewegliche Tageslichtsysteme, Integration der künstlichen Beleuchtung in das Oberlicht mit farbveränderlichen LED (umlaufender Ring, Lichtfarbe in Anpassung an das Tageslicht).

Abb.12: 195 kreisrunde Oberlichter mit Durchmessern von 1,50m bis 2,70m durchbrechen die frei gespannte und sich leicht nach außen geschwungene Decke des unterirdischen Saals. Bild: Norbert Miguletz.

Abb.13/14: Der Tageslichteintrag wird permanent kontrolliert und ggf. begrenzt, in die Oberlichter integrierte Leuchten werden bedarfsgerecht dazu geregelt. Das Zusammenspiel von Verschattungselementen, integrierten Komponenten für die Allgemeinbeleuchtung und flexibel applizierbaren Strahlern für die Akzentbeleuchtung übernimmt ein intelligentes Lichtsteuersystem anhand von Sensordaten. Bilder: Norbert Miguletz.

4 Realisierungsgrad

Emil Schumacher Museum, Hagen
Architekt: Lindemann Architekten, Mannheim
Fertiggestellt 2009

Villa Vauban, Luxemburg
Architekt: Diane Heirend & Philippe Schmit architects, Luxemburg
Fertiggestellt 2010

Kunstsammlung NRW K20, Düsseldorf
Architekt: Dissing + Weitling architecture, Kopenhagen
Fertiggestellt 2010

Museum der Bayerischen Könige, Hohenschwangau
Architekt: Staab Architekten GmbH, Berlin
Fertiggestellt 2011

Neue Galerie, Kassel
Architekt: Staab Architekten GmbH, Berlin
Fertiggestellt 2011

Städelsches Kunstinstitut und Städtische Galerie, Frankfurt/Main
Architekt: schneider + schumacher Architekturgesellschaft mbH, Frankfurt/Main
Fertiggestellt 2012

5 Bewertung der eigenen Lösung im Vergleich zu anderen Lösungen

- Entwicklung von zusammenhängenden Beleuchtungskonzepten für die unterschiedlichen Nutzungen und konservatorischen Anforderungen innerhalb der Ausstellungsarchitektur

- Integration von state-of-the-art Lichttechnologien, Entwicklung von Sonderkonstruktionen, Integration von hochinnovativen Lichtdeckensystemen

- Hohe Energieeffizienz der eingesetzten Leuchtensysteme, Berücksichtigung von Wartungsaspekten

Le Domaine Abadia Retuerta, Valladolid – Licht für ein 5-Sterne-Hotel in einer Klosterarchitektur aus dem 12. Jahrhundert

Prof. Dipl.-Ing. Andreas Schulz
Dipl.-Ing. Martina Weiß
Dipl.-Ing. Isabel Ehm
Dipl.-Ing. Laura Sudbrock
Licht Kunst Licht AG
Jagdweg 16 | 53115 Bonn
Tel. +49 (0) 228 914 220
bonn@lichtkunstlicht.com
www.lichtkunstlicht.com

1 Problemstellung

„Beleuchtung in der Architektur“ kann als Überschrift für Vieles dienen und so fällt die Auslegung, was gutes Licht in der Architektur ausmacht, sicherlich von Individuum zu Individuum anders aus. Für das Büro Licht Kunst Licht bedeutet gelungene Beleuchtungsplanung zunächst in Harmonie mit der Gestaltungsabsicht des Architekten zu arbeiten und so zu einem schlüssigen Ganzen zu verschmelzen. Meistens bedarf es dazu, sich der Architektur unterzuordnen und sich auf das zu beschränken, was den Entwurf zur Selbstverständlichkeit werden lässt. Die Beleuchtung von Gebäuden mit historischer Signifikanz stellt unter Berücksichtigung des Denkmalschutzes, architektonischen Restriktionen und ästhetischer Angemessenheit besondere Herausforderungen an den Lichtplaner. Ein Schweizer Pharmakonzern hat in der spanischen Weinregion Ribera de Duero eine Klosteranlage aus dem 12. Jahrhundert in einem dreijährigen Umbauprozess zu einem konzerneigenen Hotel transformiert. Der Komplex umfasst eine Kirche als Veranstaltungsort, Konferenzräume, ein Restaurant, zwei Bars, einen Weinkeller sowie 25 Hotelzimmer und- Suiten. Die Lichtplanung sollte das repräsentative Gebäude in seiner architektonischen Komplexität stimmungsvoll und in seinem historischen Kontext angemessen mit der Beleuchtung unterstützen.

Abb.1: Das ehemalige Kloster ist idyllisch inmitten der Weinreben gelegen. Bild: Adrian Tyler.

2 Zielsetzung

Die Anforderungen im Zusammenhang mit dem Denkmalschutz scheinen die Gestaltungsfreiheit in der Beleuchtungsplanung zunächst auf funktionales Dienen zu beschränken; dennoch ist es möglich, eigene ästhetische Ideen einfließen zu lassen und mit einem durchgängigen Entwurfsgedanken angemessen auf die historische und komplexe Architektur zu reagieren.

Abb.2: Blaue Stunde im Klostergarten: Die Bronze-Wandleuchten lassen mit nachlassendem Tageslicht das Gemäuer mehr und mehr in der Silhouette erscheinen.

3 Was ist innovativ / “best practice an der Lösung?

- Entwicklung von Sonderkonstruktionen mit moderner Lichttechnologie: Entwicklung einer Sonderleuchtenfamilie aus Bronze
- Betonung der architektonischen Besonderheiten und der Materialität des Bestands
- Besondere Berücksichtigung des Denkmalschutzes, minimale Eingriffe in die historische Bausubstanz
- Erzeugen von stimmungsvollen und angemessenen Raumatmosphären.

Abb.3 links: Im Kreuzgang wirken die Bronze-Wandleuchten direkt und indirekt: Sie beleuchten den hellen Sandsteinboden und blenden gleichermaßen die Kreuzgewölbe ein. Abb.4 rechts: Bronzestehleuchten übernehmen an manchen Stellen die Funktion der Wandleuchten und markieren damit Eingänge, die vom Kreuzgang abgehen. Bild: Adrian Tyler.

Abb.5: Das Restaurant ist im ehemaligen Refektorium eingerichtet. Das Abendmahl an der Stirnseite wird mit einem Halogenstrahler inszeniert. Die Bronze-Stehleuchten beleuchten hier mit einem zusätzlichen Indirektanteil das Kreuzgewölbe. Bild: François Halard.

Abb.6: Die Rippendecke gibt die Struktur für die Bronze-Downlights vor. Das druckvolle Halogenlicht erfüllt die notwendigen Beleuchtungsstärken auf der Arbeitsfläche. Bild: François Halard.

Abb.7: Zur Bronzeserie gehören auch kardanisch schwenkbare Richtstrahler, die im Weinladen eine Wand mit Weinflaschen inszenieren. Die Rückwand besteht aus Bronzeblechen. Hier wurde das Material der Leuchten in die Innenarchitektur übernommen.

Abb.8: Die dimmbaren Bronze-Downlights werden oberhalb des Bartresens abgependelt. Bild: François Halard.

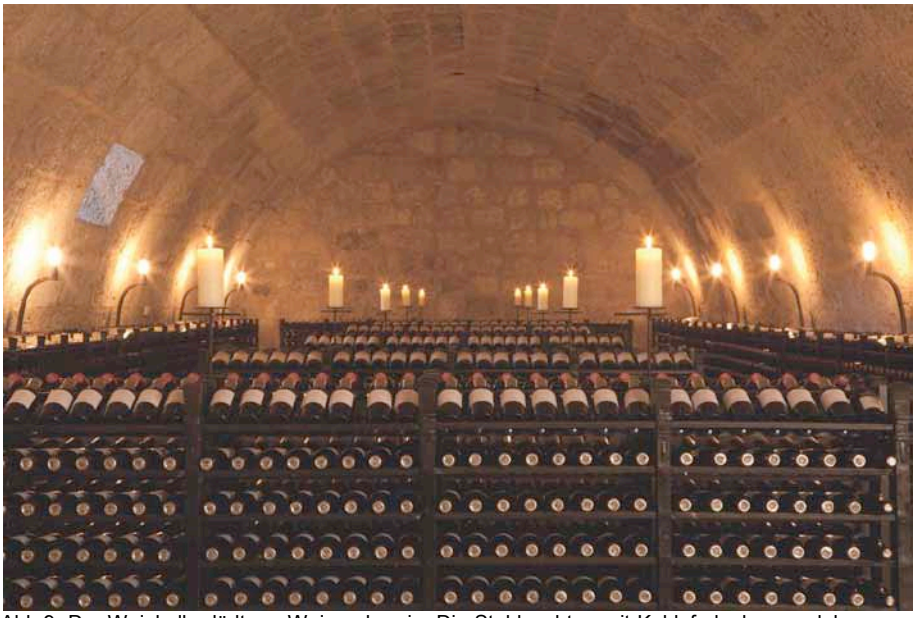


Abb.9: Der Weinkeller lädt zur Weinprobe ein. Die Stableuchten mit Kohlefadenlampen lehnen an Wand-Kerzenleuchter an. Bild: François Halard.

Abb.10 links und Abb.11 rechts: Blick in die farblich unterschiedlich eingerichteten Zimmer. Die kleinere Variante der Wandleuchte sowie schwenkbare Leseleuchten aus Bronze liefern neben Tisch- und Stehleuchten die Grundbeleuchtung. Bild: Architekt.

Abb.12 links und 13 rechts: Mit wenigen Aufbaustrahlern wurden in der Kirche die Gewölbe und Apsiden indirekt und einzelne Objekte direkt von den Kapitellen aus beleuchtet.

Abb.14 links: Die Pollerleuchten säumen die Einfahrt entlang der Weinreben.
Abb.15 rechts: Der Kopf der Bronze-Mastleuchten gleicht dem der Wandleuchten an der Fassade.

Abb.16: Die Bronze-Wandleuchten mit facettierten Glasscheiben markieren die Eingänge an der Fassade.

4 Realisierungsgrad

Fertiggestellt im September 2011
Architekt: Marco Serra

5 Bewertung der eigenen Lösung im Vergleich zu anderen Lösungen

Eine eingehende und sensible Beschäftigung mit der Historie des Ortes und eine Recherche von geeigneten Materialien für die einzusetzenden Leuchten hat für das Hotel Le Domaine Abadia Retuerta ein stimmiges und zusammenhängendes Beleuchtungskonzept hervorgebracht. Die komplexen Anforderungen der architektonischen Vorgaben werden voll erfüllt.

Als Ergebnis entstand eine Leuchtenfamilie, die neben Varianten von Wandleuchten, auch Downlights, Pendelleuchten, Bettleseleuchten, Richtstrahler sowie Außenleuchten umfasst. Bronze ist ein hochwertiges, langlebiges Material, welches sich Ideal in die alten Klostermauern fügt. Das zeitlose Design und das umfassende Repertoire ermöglichen den Einsatz auch an anderen Orten. So wurden die Leuchten mittlerweile in einem weiteren Hotelprojekt von Licht Kunst Licht eingesetzt, dem Hotel/Restaurant Alpenrose in Hohenschwangau.

Licht für das ThyssenKrupp Quartier – Entwicklung eines Corporate Lighting Konzeptes für das neue Headquarter in Essen

Prof. Dipl.-Ing. Andreas Schulz
Dipl.-Ing. Laura Sudbrock
Licht Kunst Licht AG
Jagdweg 16 | 53115 Bonn
Tel. +49 (0) 228 914 220
bonn@lichtkunstlicht.com
www.lichtkunstlicht.com

1 Problemstellung

Für die komplexe und transparente Architektur des von JSWD-Architekten und Chaix & Morel entworfene ThyssenKrupp Quartiers sollte unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeits- und Wartungsaspekten ein kohärentes Lichtkonzept entwickelt werden, das die Unternehmenskultur nach Außen transportiert.

An historischem Standort im Essener Krupp-Gürtel hat der ThyssenKrupp Konzern seine neue Unternehmenszentrale gebaut. Nahezu die Hälfte der für den Bau eingesetzten Werkstoffe und Produkte stammt vom Bauherrn selbst. Die Leichtigkeit der in einer Parklandschaft gruppierten Gebäude basiert zu einem großen Teil auf ihrem Fassadenkonzept. Ideenreich spielt die Architektur mit Glas, Metallflächen und Lamellen. Das Beleuchtungskonzept von Licht Kunst Licht stützt diesen vitalen und vielschichtigen Materialmix.

Abb.1: Der gemeinsame Entwurf der ARGE Architekten TKQ, JSWD Architekten und Chaix & Morel et Associés folgt der Idee eines Campus. Um eine zentrale Wasserachse gruppieren sich das Hauptgebäude Q1, das Q2 genannte Forum, die Verwaltungsgebäude Q5 und Q7 und ein Parkhaus.

2 Zielsetzung

Das architektonische Ensemble bietet mehr als 2.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern einen neuen Arbeitsplatz und führt die bislang auf mehrere Standorte aufgeteilten Verwaltungen zusammen. Das Quartier steht für Internationalität und Modernität, für Offenheit und Miteinander, für Innovationsfähigkeit und Nachhaltigkeit. Ziel war es, diese Unternehmenskultur im neuen Ensemble baulich umzusetzen.

Abb.2: Die Außenwirkung der Gebäude der Unternehmenszentrale des ThyssenKrupp-Konzerns in Essen basiert auf dem Prinzip der Überlagerung verschiedener Materialien. Ein fein abgestimmtes Lichtkonzept sorgt durch eine von innen nach außen wirkende Beleuchtung, dass dieses auch in den Dunkelstunden funktioniert. Bild: Lukas Roth.

3 Was ist innovativ / “best practice an der Lösung?

Mit insgesamt 7 Gebäuden und dem zentralen Headquarter vor einem großen Reflecting Pool auf dem parkähnlichen Grundstück ist die Innenraumbeleuchtung zur wichtigsten Komponente der Gesamt- und Nachtwirkung des Ensembles geworden. Ein zusammenhängender konzeptioneller Gedanke zum Licht für alle Gebäude und deren sehr unterschiedliche Nutzung unterstützt den Architekturgedanken des Entwurfs.

Die Innovationsfreude des Unternehmens ThyssenKrupp und dessen Wunsch, unter dem Gesichtspunkt beispielhafter Nachhaltigkeit zu planen, hat hochmoderne, eigens dafür von uns entwickelte LED-Leuchtensysteme entstehen lassen, die mit einem 50%-igen Energieeinsatz und langen Wartungszyklen eine neue Dimension des Umgangs mit dem Thema Licht eröffnen.

Abb.3: Die Innenraumbeleuchtung für das Q2-Forum bestimmt auch die attraktive Außenwirkung des Gebäudes. Bild: Lukas Roth.

Abb.4/5: Diese 26 Meter breiten und 28 Meter hohen Glasflächen an Nord- und Südseite des Q1 öffnen das Gebäudeinnere hin zur umgebenden Landschaft und versorgen das Atrium und die angrenzenden Räume mit Tageslicht. Spektakulär zeichnen sich die quer durch den Raum gespannten Brücken ab, in deren Handläufe LED-Linien integriert wurden. Bilder: Lukas Roth.

Abb.6: In der Kantine inszeniert Streiflicht die titanfarbene Wandverkleidung. Über jedem Tisch befindet sich eine zylindrische Sonderleuchte. Bild: Lukas Roth.

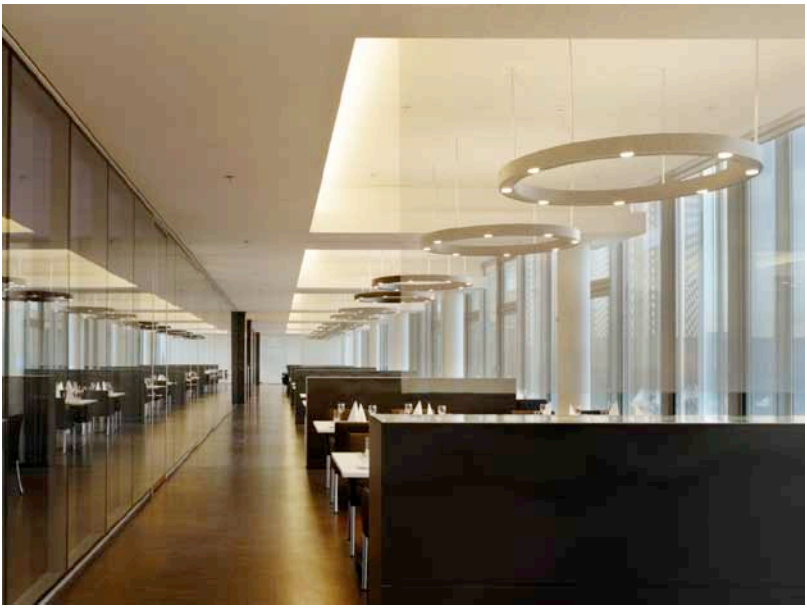


Abb.7: Im Gästecasino sind über den Tischen große ringförmige Leuchter mit direkter und indirekter Lichtkomponente abgependelt. In die brusthohen Raumteiler ist eine RGB-Leuchte integriert, die auf Wunsch farbdynamisches Licht auf die glänzenden Vorhänge gibt. Bild: Lukas Roth.

Abb.8: Durch Oberlichter und Glasfronten fällt viel Tageslicht in das Foyer des Forums.
Bild: Lukas Roth.

Abb.9: Der Große Saal im Forumsgebäude fasst bis zu 1.000 Gäste. Durch getrennt steuerbare Halogenlampen- und Leuchtstofflampen-Komponenten kann verschiedenen Nutzungen gedient werden. Bild: Lukas Roth.

Abb.10: Der Kubus im Raum der Stille verfügt über eine mit LED ausgestattete Lichtdecke. Die einzeln ansteuerbaren RGB LED bilden eine Pixelmatrix, die mit vielfältigen statischen und dynamischen Lichtszenen bespielt werden kann. Der Wand- und Bodenbelag PANDOMO stammt von der Firma Ardex. Bild: Ardex.

Abb.11: Eine innovative, eigens für das Projekt entwickelte LED-Lichtdecke wurde im Sitzungssaal des Aufsichtsrates installiert. Neben einer diffusen räumlichen Komponente integriert sie auch ein optisches System, das für direktes, druckvolles Licht am Konferenztisch sorgt. Bild: Christian Richters.

4 Realisierungsgrad

Fertiggestellt im Juni 2010
ARGE ThyssenKrupp Quartier
JSWD Architekten, Köln & Atelier d'architecture Chaix & Morel et associés, Paris

5 Bewertung der eigenen Lösung im Vergleich zu anderen Lösungen

- Entwicklung eines zusammenhängenden Konzeptes für die unterschiedlichen Nutzungen der Architektur
- Integration von state-of-the-art Technologien, Entwicklung von Sonderkonstruktionen
- Entwicklung eines hochinnovativen LED-Leuchtensystems (Lichtdeckensystem)
- Erfolgreiche Umsetzung der Unternehmenskultur und Unterstützung des architektonischen Entwurfs
- Hohe Energieeffizienz der eingesetzten Leuchtensysteme, Berücksichtigung von Wartungsaspekten

Normung und Standardisierung zur Umsetzung von Innovationen und Forschungsergebnissen

1. Einführung

Das DIN ist auf Grundlage eines Vertrags mit der Bundesrepublik Deutschland die zuständige Institution für die nationale, europäische und internationale Normungsarbeit in Deutschland. Es versteht sich als Dienstleister, der die Erarbeitung von Normen und Spezifikationen im Auftrag der interessierten Kreise in seinen zuständigen Gremien plant, organisiert, fachlich begleitet und dabei eine neutrale Position einnimmt. Das DIN ist eine weltweit führende Organisation mit rund 380 national, europäisch und international operierenden Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Ziel der europäischen und internationalen Normung ist der Abbau technischer Handelshemmnisse und die Förderung der Exportfähigkeit der deutschen Wirtschaft. Dabei vertritt das DIN die nationalen Interessen in Europa und weltweit.

Das DIN organisiert den gesamten Prozess zur Erstellung von Normen und Spezifikationen auf nationaler Ebene sowie die deutsche Beteiligung auf europäischer und internationaler Ebene. Zudem berät es fachlich und kanalisiert Informationen zum gesamten Normungs- und Spezifikationsprozess und stellt den interessierten Kreisen eine abgestimmte und vernetzte Kommunikationsplattform zur Verfügung. Somit bietet sich das DIN als Forum an, in dem sich alle interessierten Kreise treffen, um den Stand der Wissenschaft, Forschung und Technik zu ermitteln und in Normen niederzuschreiben.

2. Normung und Standardisierung in Forschungs- und Innovationsprozessen

In Forschungs- und Innovationsprozessen entwickeln sich Normung und Standardisierung zunehmend zu einem integralen Bestandteil, da sie frühzeitig eingeleitet den Transfer von Forschungsergebnissen in marktfähige Produkte und Dienstleistungen und den schnellen Marktzugang von Innovationen fördern. Im Bereich "Innovation" bietet das DIN deshalb unter anderem die Erarbeitung von Spezifikationen (DIN SPEC) sowie die Realisierung von INS (Innovationen mit Normen und Standards)-Projekten an, sodass Ergebnisse aus Wissenschaft und Forschung effektiv verwertet werden können.

Abb. 1: Arten von Normen und Standards im Forschungs- und Innovationsprozess

2.1 DIN SPEC

Das DIN bietet neben den konsensbasierten DIN-Normen die DIN SPEC an. Aufgrund des nicht zwingend erforderlichen Konsenses können DIN SPEC schneller im Markt erprobt und angewandt werden und so die Effektivität des Wissenstransfers nachhaltig steigern (Abbildung 2). DIN SPEC werden unter Nutzung der infrastrukturellen Vorteile des DIN in bereits existierenden Normenausschüssen oder in projektbezogenen Gremien erstellt.

Abb. 2: Abgrenzung von Normen und Standards

Durch die Möglichkeit der Veröffentlichung miteinander konkurrierender DIN SPEC können alternative Lösungsansätze sogar parallel in der Wirtschaft erprobt werden. Somit stehen Interessenten mit den DIN SPEC Instrumente zur Verfügung, die innovative Ideen schnellstmöglich und unkompliziert in die Welt des Marktes und in die Normung tragen.

2.2 INS-Projekte

INS-Projekte sind eine vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie initiierte Maßnahme zur Innovationsförderung durch Normung und Standardisierung. Dabei werden Ergebnisse aus Forschungsarbeiten, die an der Schwelle zur Anwendung stehen, in die Normung überführt (Abbildung 3). Der Fokus liegt insbesondere auf bereits erarbeiteten wissenschaftlichen Erkenntnissen, die mit Hilfe der Normung verbreitet und implementiert werden. Anregungen zu möglichen INS-Themen kommen hierbei häufig aus den Normenausschüssen des DIN, die aus ihrer Gremienarbeit die Notwendigkeit einer Anschubfinanzierung für Normungsarbeiten identifiziert haben.

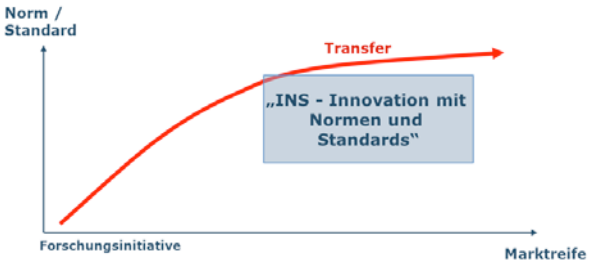


Abb. 3: Innovationsförderung durch Normen und Standards

3. Erfolge im Rahmen der Innovationsinitiative des DIN

Im Bereich Lichttechnik wurden bisher verschiedene Projekte im Rahmen der Innovationsinitiative des DIN gefördert. Dazu zählen folgende Projekte:

Innovative Lichttechnik

Biologischen Lichtwirkungen wird in der Lichtindustrie (Lampen-, Leuchten-, Komponenten-hersteller) aufgrund neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse ein hohes Innovationspotential zugeschrieben. Die Innovationskraft im Thema ist allerdings von der Schaffung von Leitlinien und Regeln zur Anwendung abhängig, denn sie beruht auf der Nutzung von Erkenntnissen aus verschiedenen technischen und biologisch-medizinischen Fachgebieten. Durch ein enges, interdisziplinäres Zusammenwirken der Lichtindustrie mit Wissenschaftlern der Lichtinstitute, Lichtplanern und Architekten sowie mit fachübergreifenden Bereichen der Biologie, der Medizin, der Chronobiologie, der Arbeitswissenschaften und der Psychologie konnten die relevanten biologischen Wirkungen des Lichts auf den Menschen spezifiziert und deren gezielte Beeinflussung für den Menschen evaluiert werden. Methoden und Regeln für eine effiziente Umsetzung dieser neuen Erkenntnisse in Produkte und Anwendungen wurden erarbeitet. Durch eine konsequente Umsetzung dieser Erkenntnisse können die Interessierten Kreise innovative Produkte noch besser auf die Bedürfnisse der Nutzer umsetzen. Licht entsprechend spezieller Anforderungen für ältere Menschen und Schüler, im Büro und in der Industrie bis hin zum Einsatz im privaten Umfeld Zuhause wird dadurch möglich.

Der zuständige Arbeitsausschuss NA 058-00-27 AA (kurz: FNL 27) hat aufgrund seiner Arbeit die internationale Führerschaft bei der Normung auf dem Gebiet der biologischen Wirkung des Lichts auf den Menschen erreicht. Die seit 2007 jährlich durchgeführten Expertenforen haben sich zu einem wissenschaftlich anerkannten Symposium entwickelt, welches dem FNL 27 zur Ausrichtung seiner Normungsarbeit dient. Als eine erste Zusammenfassung der normungsrelevanten Erkenntnisse wird an der DIN SPEC 5031-100 „Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik — Teil 100: Über das Auge vermittelte, nichtvisuelle Wirkung des Lichts auf den Menschen — Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren“ gearbeitet.

Darüber hinaus ergriff der FNL 27 die Initiative zur Gründung der CEN/TC 169/WG 13, dessen Sekretariat im DIN liegt und dessen Convenor aus dem Kreis des FNL 27 gestellt wurde. Im Hinblick auf eine weltweite Standardisierung auf dem Gebiet der biologischen Wirkung des Lichts auf den Menschen wurden die Kontakte zu entsprechenden Arbeitsgruppen der CIE und zu internationalen Forschern auf diesem Gebiet ausgebaut.

Messtechnik LEDs und LED-Systeme

In der photometrischen Normung fand die LED bisher noch keine Berücksichtigung. Mit diesem Projekt sollte diese Lücke geschlossen werden, wobei insbesondere auch die Grundlage zur Anwendung anderer Normen z. B. zur Qualitätssicherung nach DIN 17025 oder spezieller, zur Bewertung von Messergebnissen durch die Messunsicherheit nach DIN 1319 geschaffen werden musste. Im Zuge der schnell weiter wachsenden Zahl von Anwendungen sind dafür verbindliche Regelungen z. B. zur Messung und Bewertung der lichttechnischen und farbmetrischen Eigenschaften von LEDs und LED-Systemen von entscheidender Bedeutung. Diese werden zunehmend mit neuen Messgeräten und Messverfahren, wie z. B. der Nahfeld- bzw. der Fernfeld-Goniophotometrie, bestimmt.

Ziel des Projektes war die:

- Beschreibung allgemeiner Begriffe und Verfahren zur Charakterisierung der neuen Lichtquellen auf LED-Basis, um zu verhindern, dass im Rahmen der allgemeinen Vorgaben zur Energieeinsparung nur auf Energieeffizienz Wert gelegt wird und die Qualität der Beleuchtung (Schlagwort "Visual Comfort") auf der Strecke bleibt (wichtige, die Gesetzgebung begleitende Aktivität)

- Erarbeitung notwendiger Ergänzung der Normreihe DIN 5032 und der EN 13032–1, um die nach heutigem Stand der Technik erforderlichen Regelungen zur photometrischen, kolorimetrischen und spektralradiometrischen Messtechnik von LEDs und LED–Systemen, einschließlich der heute immer häufiger angewandten, nahfeldgoniophotometrischen Messverfahren, d. h. Regelungen für Leuchtdichtemesskameras und Nahfeldgoniophotometer sowie verbindlichen Regelungen zur Angabe von Messunsicherheiten sicherzustellen

Im Rahmen des Projektes wurden 4 Vorlagen zu den Themen *"Messung der lichttechnischen Größen von inkohärent strahlenden Halbleiterlichtquellen"*, "*Messung von Leuchtdichten mit Leuchtdichtekameras, Bewertung von Leuchtdichtekameras"*, *"Nahfeldgoniophotometer, Messmethode und Geräteeigenschaften"*, *"Bewertung von Messergebnissen durch die Messunsicherheit"* erarbeitet, die als Basis für die nationale, europäische und internationale Normung herangezogen wurden und werden.

Untersuchung von LED Retrofit Produkten als Ersatz klassischer Glühlampen für das Einsatzgebiet städtischer Weihnachtsbeleuchtung

Daniel Werner, Dipl.-Ing. (FH); Kristin Gabel, B.Eng.; Prof. Dr. Eva Schwenzfeier-Hellkamp; Fachhochschule Biefeleld

1. Problemstellung / Ziel des Beitrages

Um zukünftig den Energieverbrauch bei saisonaler Beleuchtung zu senken und deren Effizienz zu steigern, werden häufig und vermehrt LED Retrofit Produkte bei der städtischen Weihnachtsbeleuchtung eingesetzt. Bei der Umstellung ist die Frage zu klären, ob und wenn ja welche Retrofit Produkte für diesen Einsatz geeignet sind. Wichtig ist zudem, die Akzeptanz von Anwohnern, Bürgern, Geschäftsleuten sowie der Verwaltung zu gewinnen. Ziel sollte es sein, eine harmonische Beleuchtung zu schaffen, die effizient ist und von den verschiedenen Zielgruppen (Bürgern, Geschäftsleuten, Verwaltung) akzeptiert wird.

Im Rahmen des BMBF-Forschungsprojektes „Lichtkonzept Historischer Stadtkern“ (LHS) wurden in Rietberg genau diese Aspekte untersucht. Ein erstes LED Retrofit Produkt aus dem Herstellungsjahr 2010 (installiert in der Weihnachtssaison 2011/12) konnte die verschiedenen Zielgruppen nicht überzeugen. Ziel ist es, ein geeignetes, akzeptables sowie effizientes Retrofit Leuchtmittel für den Einsatz in städtischer Weihnachtsbeleuchtung für die Stadt Rietberg zu finden.

2. Lichtkonzept Historischer Stadtkern Rietberg

Die Stadt Rietberg zählt zu den Gewinnern des BMBF-Wettbewerbs „Kommunen in neuem Licht“. Im April 2011 startete das Projekt „Lichtkonzept Historischer Stadtkern (LHS)“. Dieses Lichtkonzept bezieht sich auf den Historischen Stadtkern Rietberg. Es ist eine Herausforderung, den Konflikt zwischen technischem Fortschritt und dem Erhalt des typischen und historischen Altstadtcharakters zu lösen. Die Veränderungen sind harmonisch in das historische Stadtbild einzufügen. Hierbei gilt es, Straßen-, Fassaden- und Weihnachtsbeleuchtung auf LEDs umzustellen. Bei der Straßenbeleuchtung sollten die vorhandenen Maststandorte nach Möglichkeit erhalten bleiben, obwohl die Standorte nur schwer mit einer normkonformen Beleuchtung in Einklang zu bringen sind. In diesem Bereich sowie im Bereich der Gebäudeillumination kommen neue LED Leuchten (kein Retrofit) zum Einsatz.

Der erste Straßenzug sowie die ersten Gebäudeilluminationen wurden Anfang Oktober 2011 umgerüstet bzw. realisiert. Eine erste Umstellung der Weihnachtsbeleuchtung auf LED Retrofit Produkte erfolgte im Winter 2011/2012. Im Sommer/Herbst 2012 wird die Installation aller Straßenzüge (ca. 200 Lichtpunkte) und der Gebäudeilluminationen (ca. 50 illuminierte Gebäude) abgeschlossen.

3. Beitrag der Fachhochschule Bielefeld

Um eine umfassende Betrachtung zu ermöglichen, wird mit hohem Aufwand das komplette Lichtkonzept beurteilt. Zur Akzeptanzerfassung bei den Bürgern, Geschäftsleuten und der Verwaltung wurden Befragungsaktionen durchgeführt. Die Methode der Face-to-Face-Befragung wurde bei Bürgern, Geschäftsleuten und der Verwaltung angewandt. Die Meinungen weiterer Anwohner wurden postalisch per Fragebogenaktion aufgenommen. Neben den subjektiven Eindrücken der Bevölkerung, wurde bzw. wird die Beleuchtungssituation messtechnisch erfasst (Vermessung Alt- und Neubestand). Die Aufnahme der Beleuchtungsstärke im Altbestand erfolgte bei voller Beleuchtung und während der Nachtabsenkung. Zusätzlich wurden die Werte bei installierter Weihnachtsbeleuchtung erfasst, um die Situationen mit und ohne saisonale Beleuchtung vergleichen zu können. Um weitere Aussagen treffen zu können, erfolgte eine elektrische und lichttechnische Vermessung der konventionellen sowie der neuen LED-Beleuchtung im Labor anhand von ausgewählten Leuchten.

Im Winter 2011/12 startete eine weitere Befragungsaktion, die sich schwerpunktmäßig mit der Thematik Weihnachtsbeleuchtung befasst. Die subjektiven Eindrücke bei dem Vergleich alter und neuer Weihnachtsbeleuchtung, die mit LED Retrofit Produkten bestückt ist, konnten so ermittelt werden. Nach Umrüstung und Einstellung der neuen LED Beleuchtung (Sommer 2012) sind weitere umfassende Befragungsaktionen, die die Bereiche Straßenbeleuchtung und Gebäudeillumination abdecken, geplant.

4. Versuchsdurchführung

Die lichttechnischen Messungen haben gezeigt, dass durch die konventionelle Weihnachtsbeleuchtung, die über der Straße zwischen den Straßenleuchten positioniert ist, eine deutliche Erhöhung der S-Klassen von beispielsweise S5 auf S3 erfolgt. Dies steigert erheblich das Wohlbefinden der Anwohner und Besucher, wie eine Umfrage ergab. Nach der Umstellung von 25 W Glühlampen auf 1 W LED Retrofit Leuchtmittel, in der Saison 2011/12, wurden die Umfragen wiederholt und zeigten, dass die Anwohner deutlich unzufriedener waren. Als Reaktion auf diese Ergebnisse wurden gezielte Alterungsversuche mit wiederkehrenden Messungen durchgeführt, um herauszufinden, welche LED-Leuchtmittel besser geeignet sein könnten als die im Winter 2011/12 installierten Leuchtmittel (nachfolgend als LHS LED „Lichtkonzept Historischer Stadtkern LED“ bzw. als Leuchtgruppe 3 bezeichnet).

Nach einer ausführlichen Recherche wurden, durch die Autoren dieses Beitrages, 6 LED Retrofit sowie 4 Referenz Leuchtmitteltypen (Glühlampen) zu messtechnischen Untersuchungen angeschafft. Verfügbarkeit, Tauglichkeit für den Außenbereich, E27 Fassung und die Formähnlichkeit zu den herkömmlichen Glühlampen waren die entscheidenden Auswahlkriterien. Je Typ/Gruppe wurden 3 gleiche Leuchtmittel angeschafft, um diese einem normierten Alterungsprozess auszusetzen.

Insgesamt wurden so 10 Leuchtgruppen gebildet. Die Gruppen 1 bis 6 bestehen jeweils aus 3 LED Retrofit Leuchtmittel der gleichen Baugruppe, während jeweils 3 gleiche Glühlampen die Gruppe 7 bis 10 bilden. Hierbei ist die Gruppe LED 3 das LHS Leuchtmittel. Die Gruppe 9 bildet die ehemaligen Leuchtmittel (Neuzustand) der Rietberger Weihnachtsbeleuchtung ab. Die Durchführung der Messungen an drei Leuchtmitteln gleicher Art gilt dem Erhalt eines aussagekräftigen Mittelwertes. Eine erste Zielstellung war, die Fragestellung zu klären, wann lediglich 80% (Wunsch der Stadt Rietberg) der anfänglichen Leuchtkraft vorhanden sind und nach welcher Zeit die getesteten Leuchtmittel ihre Funktion gänzlich einstellen.

5. Auswertung der Ergebnisse

5.1 Allgemeine Übersicht

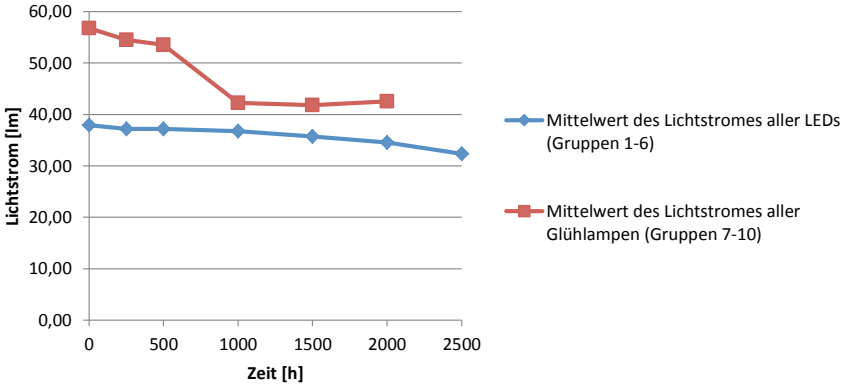


Abb. 1:Mittelwert des Lichtstroms aller Leuchtmittel über die Betriebszeit

Die Messungen (Alterung und Messung jeweils bei Raumtemperatur) für den Lichtstrom ergaben insgesamt ein wenig einheitliches Bild. Besonders bei den Glühlampen ist, durch den frühen Ausfall mehrerer Leuchtmittel, ein starker Sprung zwischen 500 und 1.000 Betriebsstunden zu sehen. Dieser ist darauf zurückzuführen, dass die leistungsstärksten Glühlampen in diesem Zeitintervall ausgefallen sind. Besser zu erkennen ist der Lichtstromrückgang, wenn er relativ betrachtet wird (siehe Abb. 2).

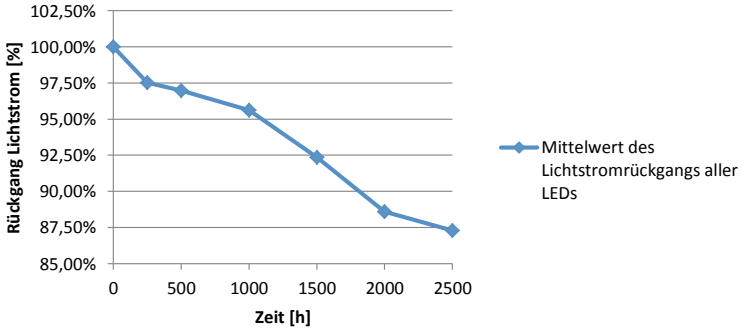


Abb. 2:Mittelwert des Lichtstromrückgangs aller LEDs über 2.500 Betriebsstunden

In Abb. 2 ist zu erkennen, dass nach 2.500 Betriebsstunden noch kein genereller Lichtstromrückgang auf unter 80% erreicht ist. Große Schwankungen zwischen den LED Leuchtmittelgruppen lagen zu diesem Zwischenstand noch nicht vor.

5.2 LED Retrofitleuchtmittel LHS

In Abb. 3 ist der Lichtstrom der LHS LEDs zu sehen. Besonders auffällig ist der geringe Lichtstrom. Im Neuzustand liegt dieser mit guten 5 lm deutlich unter dem Lichtstrom der zuvor installierten 25 W Glühlampen, welche einen Lichtstrom von durchschnittlich 100 lm abgaben.

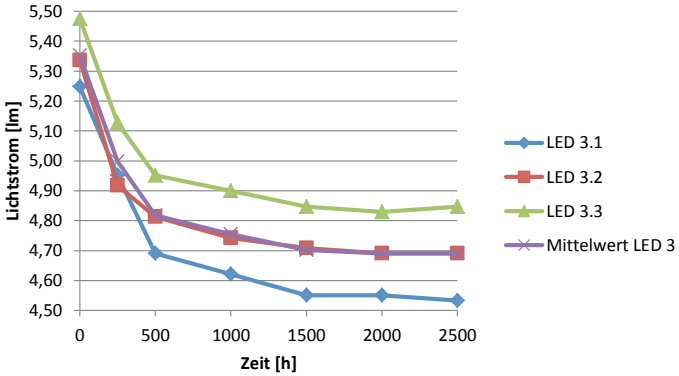


Abb. 3:Veränderung des Lichtstromes über die Betriebszeit am Beispiel der LHS (LED Gruppe 3)

Der prozentuale Lichtstromrückgang nach 2.500 Betriebsstunden (siehe Abb. 4) weist hier durchschnittlich 87,6% auf. Dies stellt einen guten Wert dar, jedoch fällt auf, dass der Betrag des Lichtstromes (s. Abb. 3) bei diesem Leuchtmittel äußerst gering ist, was sich direkt auf die ausgesandte Lichtmenge und somit den direkten Helligkeitseindruck auswirkt.

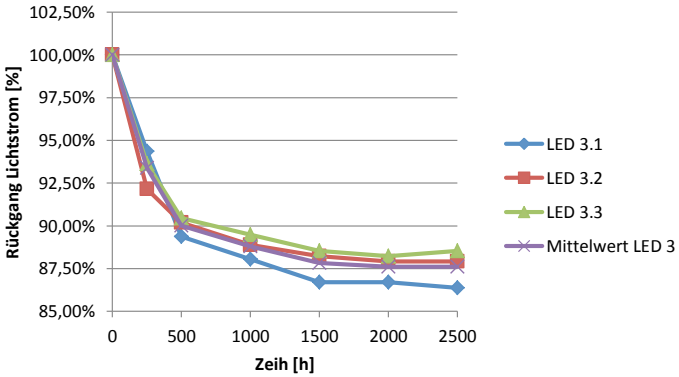


Abb. 4:Prozentualer Rückgang des Lichtstromes über die Betriebszeit am Beispiel der LHS LED Gruppe

5.3 Alternative LED Retrofit Produkte

Eindeutig die besten Messwerte wies in den bisherigen Messungen (bis 2.500 Betriebsstunden) die Leuchtgruppe 2 auf (siehe Abb. 5 und 6). Der Lichtstrom ist hier durchschnittlich um den Faktor 13,7 größer als bei Leuchtgruppe 3 (LHS Leuchtmittel).

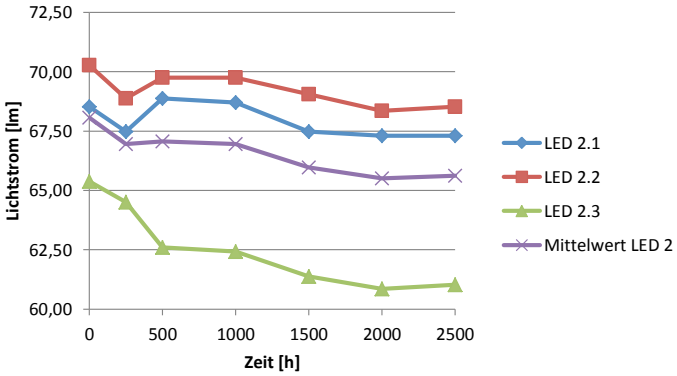


Abb. 5:Veränderung des Lichtstromes über die Betriebszeit am Beispiel der LED Gruppe 2

Auch der Rückgang des Lichtstromes war bei der Gruppe 2 am geringsten. Er fiel nach 2.500 Betriebsstunden auf 96,4% ab.

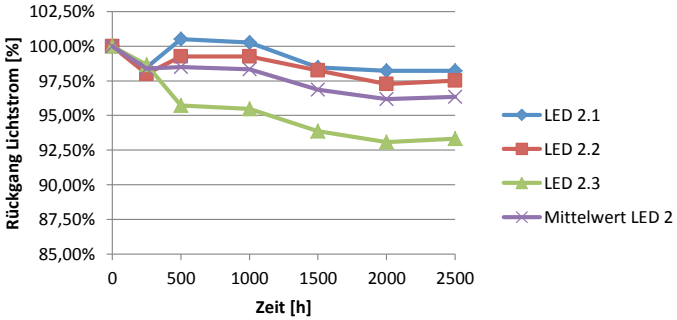


Abb. 6:Prozentualer Rückgang des Lichtstromes über die Betriebszeit am Beispiel der LED Gruppe 2

Während der Alterung (nach 2.500 Std.) fielen nur 2 von 18 LED Leuchtmittel unter den Wert von 80% des Anfangslichtstromes.

5.4 Farbmetrische Änderungen

Eine weitere Auffälligkeit findet sich in einem Anstieg der Farbtemperatur. Im Durchschnitt stieg die Farbtemperatur der Retrofit Leuchtmittel um 5,6% an. Besonders herausstechend war hier die LED Gruppe 5 (s. Abb. 7). Hier wurde nach 2.500 Betriebsstunden ein Anstieg der Farbtemperatur um 12,1% erfasst.

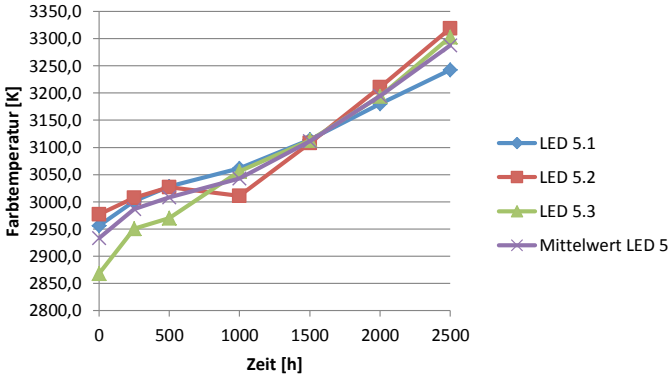


Abb. 7:Änderung der Farbtemperatur über die Betriebszeit am Beispiel der LED Gruppe 5

Bei der Farbwiedergabe liegen die LED Retrofit Lampen (Gruppe 1 - Gruppe 6) mit durchschnittlichen Werten von 61,9 bis 84,8 deutlich unter den Werten der Glühlampen (Gruppe 7 - Gruppe 10) (siehe Tab. 1). Für den Bereich der saisonalen Beleuchtung sind diese Werte aber akzeptabel, da die saisonale Weihnachtsbeleuchtung als Zusatzbeleuchtung zur herkömmlichen Straßen- und Gebäudeillumination zu sehen ist.

Gruppen	mittlerer R_a-Wert
Gruppe 1	84,8
Gruppe 2	61,9
Gruppe 3	78,9
Gruppe 4	65,0
Gruppe 5	63,6
Gruppe 6	83,1
Gruppe 7	99,3
Gruppe 8	98,9
Gruppe 9	99,5
Gruppe 10	99,2

Tab. 1: Mittlerer R_a-Wert aller getesteten Leuchtmittel

Von insgesamt 18 getesteten Retrofit LED Leuchtmitteln ist nur eine nach den 2.500 Betriebsstunden der Messreihe ausgefallen.

5.5 Ergebnisse der Glühlampen

Bei den Glühlampen ist der gleiche Alterungseffekt wie bei den LED Leuchtmitteln zu erkennen. Auch hier nimmt der Wert des Lichtstromes im Laufe der Betriebszeit konstant ab (siehe Abb. 8).

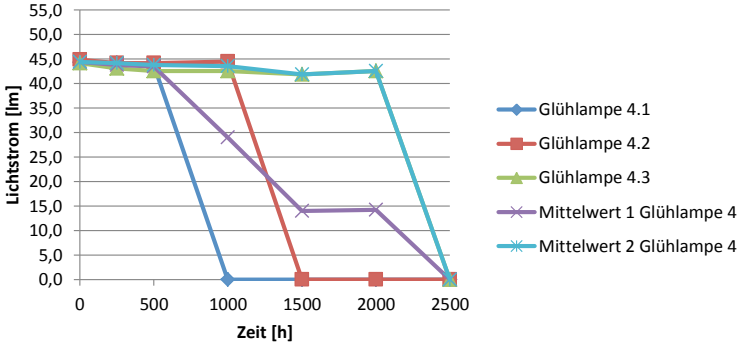


Abb. 8: Prozentualer Rückgang des Lichtstromes über die Betriebszeit am Beispiel der Gruppe Glühlampen 4[1]

Im Vergleich zu den LHS Leuchtmitteln wiesen die vorherigen Leuchtmittel zur Weihnachtsbeleuchtung (siehe Abb. 9) einen um fast 9-mal so hohen Lichtstrom auf.

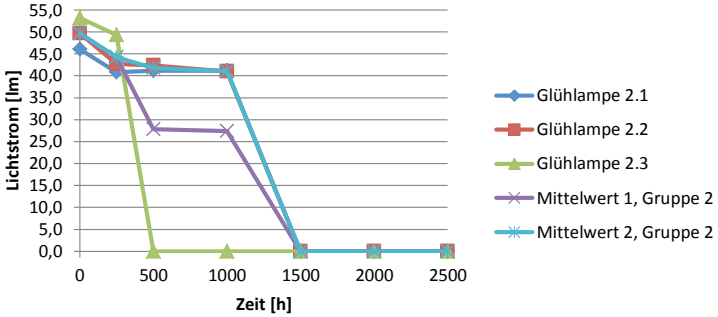


Abb. 9: Veränderung des Lichtstromes über die Betriebszeit am Beispiel der ehemaligen Rietberger Weihnachtsbeleuchtung

Auch wenn der Lichtstromrückgang aller Glühlampen im schlechtesten Fall auf 82,5% in einem guten Bereich liegt, so sind nach spätestens 1.500 Betriebsstunden alle getesteten Glühlampen (mit einer Ausnahme) ausgefallen.

[1] Abb. 8 und Abb. 9 beinhaltet zwei Mittelwerte. Mittelwert 1 berechnet den Mittelwert über allen 3 Glühlampen, während Mittelwert 2 unter Ausschluss der bereits ausgefallen Leuchtmittel berechnet wird.

6. Zusammenfassung / Fazit

Nach Auswertung der Ergebnisse zeigt sich, dass die LHS-Leuchtmittel für die Rietberger Weihnachtsbeleuchtung scheinbar ungeeignet sind. Sie emittieren nicht genügend Lichtstrom, was von den Befragten Zielgruppen als mangelnde Helligkeit beanstandet wurde. Ein Austausch der LHS Leuchtmittel durch die Leuchtmittel der LED Gruppe 2, stellt sich als Fazit der bislang erfassten Messergebnisse als beste Lösungsvariante dar.

Bei der Farbwiedergabe weisen die LED Lampen deutlich schlechtere, aber ausreichende Werte auf. Wie wichtig eine möglichst tageslichtgetreue Farbdarstellung bei einer saisonale Weihnachtsbeleuchtung ist, kann nur subjektiv bewertet werden.

Wird der Aspekt des Lichtstromrückgangs und Ausfalls von Leuchtmitteln betrachtet, so scheint es sinnvoll zu sein, Retrofit Leuchtmittel zu verwenden, um einen häufigen Austausch der Leuchtmittel zu verhindern.

›› INDEX

A

Amann, Christof ›› 38

B

Bellgardt, Klaus ›› 450
Belloni, Paola ›› 126, 548, 556
Bensel, Silvia ›› 222
Bieske, Karin ›› 530
Bodrogi, Peter ›› 71
Böll, Marvin ›› 144
Bois, Charlott ›› 270
Boulouednine, Mourad ›› 360
Bredemeier, Knut ›› 188
Buchholz, Carina ›› 115

D

Daoudi, Karim ›› 560
De Boer, Jan ›› 31
Dehoff, Peter ›› 67
Deixler, Peter ›› 335

F

Fassian, Matthias ›› 46, 61
Foltin, Johannes Ludwig ›› 158, 166

G

Gasser, Stefan ›› 139
Gläser, Dietmar ›› 210
Goldberg, Maria ›› 107
Groh, Andreas ›› 568

H

Hartmann, Thomas ›› 321
Heinze, Robert ›› 574
Hennig, Rüdiger ›› 580, 586
Herbold, Christian ›› 327
Hülsmann, Arne ›› 488

I

Imfeld, Jörg ›› 410, 590

J

Jakobiak, Roman ›› 538
Jordan, Werner ›› 241, 596

K

Kaiser, Elmar » 604
Kaup, Marc » 611
Kettwich, Carmen » 152
Khanh, Tran Quoc » 288
Klammt, Stephan » 514
Kling, Rainer » 282, 343
Koch, Bernd » 310
Köhler, Dennis » 418
Konjhodzic, Denan » 204
Kopp, Hartmut » 249
Krause, Nathalie » 469
Krüger, Udo » 217

L

Lang, Dieter » 458
Lange, Hans-Hasso » 54
Laschefski, Hans » 368
Lichtenberg, Stefan » 314
Lindner, Detlef » 226
Ludwig, Sebastian » 277

M

Marutzky, Michael » 180
Marx, Peter » 615
Michenfelder, Steffen » 172
Minnerup, Jörg » 20
Moghtader, Soheil » 28
Moormann, Leopold » 623
Moosmann, Cornelia » 522
Mühlstedt, Jens » 628

N

Niedling, Mathias » 484
Nimz,Thomas » 636

O

Ott, Hubert » 256

P

Pepler, Wjatscheslaw » 92
Polster, Saskia » 461
Porsch, Tobias » 196

R

Rathmann, Hans-Jürgen ›› 643
Reinhardt, Jan ›› 392, 644

S

Schach, Gudrun ›› 496, 647
Schäfer, Tristan ›› 442
Schiebler, Katja ›› 488
Schiel, Martin ›› 356
Schierz, Christoph ›› 498
Schmits, Paul ›› 99
Scholdt, Manfred ›› 262
Schulz, Andreas ›› 649, 657, 665
Schulze, Christoph ›› 384
Schuster, Michaela ›› 233
Seibicke, Volker ›› 673
Steinwandt, Claus ›› 351
Stockwald, Klaus ›› 303

T

Tralau, Birthe ›› 78, 119
Tüshaus, Martin ›› 295

U

Ueberschaer, Andreas ›› 376

V

Vandahl, Cornelia ›› 84
Völker, Stephan ›› 476

W

Walkling, Andreas ›› 400, 405
Wasserfurth, Norbert ›› 134, 426, 434
Werner, Daniel ›› 677
Wilm, Alexander ›› 130

Z

Zauner, Johannes ›› 506

Die Organisatoren und Veranstalter der LICHT 20|12 danken allen Sponsoren für ihre Unterstützung, die zum Gelingen der Tagung maßgeblich beigetragen hat.

›› Alliander Stadtlicht GmbH ›› belektro – Messe Berlin GmbH
›› EW Medien und Kongresse GmbH ›› Hauber & Graf GmbH ›› Hess AG
›› IAV GmbH ›› Instrument Systems GmbH ›› LICHT – Richard Pflaum Verlag GmbH & Co. KG ›› LMT Lichtmesstechnik GmbH Berlin
›› OSRAM AG ›› SWARCO ›› TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH
›› TRILUX GmbH & Co. KG ›› vosla GmbH
›› WE-EF Leuchten GmbH & Co. KG ›› Zumtobel Lighting GmbH

›› VERANSTALTER

Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. (LiTG)
Burggrafenstraße 6
D-10787 Berlin
Tel. +49 (0)30/2601-2439
info@litg.de
›› www.litg.de

Nederlandse Stichting voor Verlichtingskunde (NSVV)
Postbus 539
NL-6710 BM EDE
Tel. +31 (0)318/695394
info@nsvv.nl
›› www.nsvv.nl

Lichttechnische Gesellschaft Österreichs (LTG)
Josef-Schneider-Straße 20
A-3462 Absdorf
Tel. +43 (0)2278/20681
sonja.moerth@ltg.at
›› www.ltg.at

Schweizer Licht Gesellschaft (SLG)
Altenbergstraße 29, Postfach 686
CH-3000 Bern 8
Tel. +41 (0)31/3138811
info@slg.ch
›› www.slg.ch

›› unter Beteiligung der

Technischen Universität Berlin
Straße des 17. Juni 136
D-10623 Berlin
›› www.li.tu-berlin.de

www.licht2012.litg.de