

LICHTFARBENUNTERSCHIEDE AUF LEUCHTENDEN FLÄCHEN

Bieske, K., Homberg, S.

Technische Universität Ilmenau/ Fachgebiet Lichttechnik, Ilmenau, Deutschland

Karin.Bieske@tu-ilmenau.de

ABSTRACT

Ein einheitliches Erscheinungsbild für die Lichtfarbe innerhalb einer Leuchte und zwischen Leuchten ist mitentscheidend für die Nutzerakzeptanz von LED-Lichtlösungen. Dazu wird seitens der Hersteller eine Klasseneinteilung unter anderem für Lichtfarben weißer Lichtquellen vorgenommen. Dabei wird sich am ANSI-Standard C78-377 orientiert [1]. Da die Praxis gezeigt hat, dass diese Einteilung von annähernd 7-step-MacAdam-Ellipsen zu grob ist, ist eine Unterteilung in Subbin-Cluster üblich (z.B. nach [2],[3]). Zur Bewertung, ob die Vorauswahl anhand einer ANSI/16-Teilung ausreichend genau ist, wurden Untersuchungen zu Lichtfarbenunterschieden an LED-Leuchten durchgeführt, die mit LED der vier zentralen Bins bei einer Referenzlichtfarbe von $CCT = 4000$ K bestückt sind. 21 Probanden bewerteten die Lichtfarbenunterschiede innerhalb einer Leuchte und zwischen Leuchten. Es wurden Leuchtdichten von $L = 2100$ cd/m² und $L = 4200$ cd/m² betrachtet. Weitere Einflussgrößen waren der Beobachtungswinkel und der Leuchtenabstand.

Schlagwörter: Kombination von Lichtfarben, Lichtfarbenunterschiede bei Leuchten

1 FORSCHUNGSGEGENSTAND

Leuchtdioden sind Lichtquellen, die im Bereich der Innenbeleuchtung eine immer größere Anwendung finden. Um Leuchten mit ausreichendem Lichtstrom zu fertigen, werden typischerweise mehrere LED in einer Leuchte verbaut. Toleranzen bei der Fertigung, thermische Einflüsse und unterschiedliche Alterungsprozesse können dazu führen, dass Lichtfarbenunterschiede auf der Leuchtenoberfläche innerhalb einer Leuchte und zwischen Leuchten erkennbar sind und von Nutzern zum Teil bemängelt werden. Eine Studie des Light Research Center zeigt, dass bei zufällig ausgewählten weißen LED gleicher Lichtfarbe Farbunterschiede bis 12-step-MacAdam-Ellipsen auftreten können [4]. Diese Unterschiede sind für die meisten lichttechnischen Anwendungen in der Innenbeleuchtung zu groß. Das Binning von LED ist ein Verfahren zur Klasseneinteilung mit dem beim Hersteller gesichert werden soll, dass nur LED mit ähnlichen Lichtfarben innerhalb einer Leuchte verbaut werden und damit störende Farbinhomogenitäten

vermieden werden. Dabei wird sich am ANSI-Standard C78-377 orientiert [1]. Da die Praxis gezeigt hat, dass diese Einteilung von etwa 7-step-MacAdam-Ellipsen zu grob ist, ist eine Unterteilung in Subbin-Cluster üblich (z.B. nach [2],[3]). Die durchgeführte Untersuchung geht der Frage nach, ob die Vorauswahl anhand einer ANSI/16-Teilung ausreichend genau für die Auslegung von Leuchten ist.

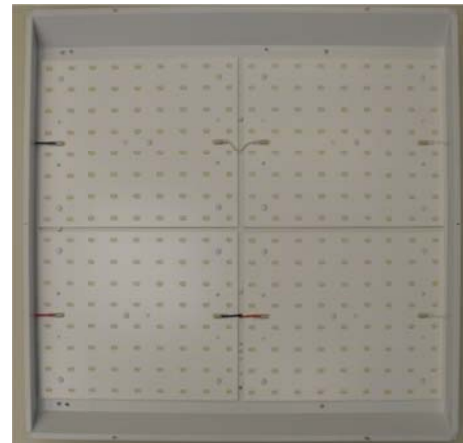
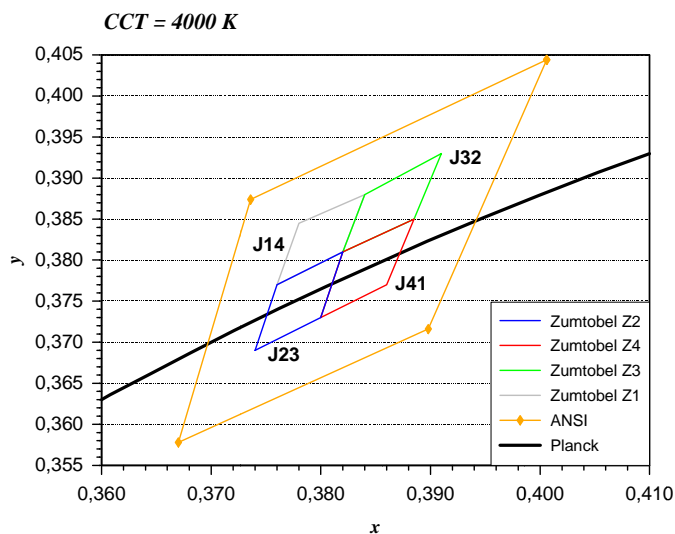
2 STAND DER WISSENSCHAFT

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

3 METHODE UND VERSUCHSDESIGN

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

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



Prototypenleuchten (600x600)

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

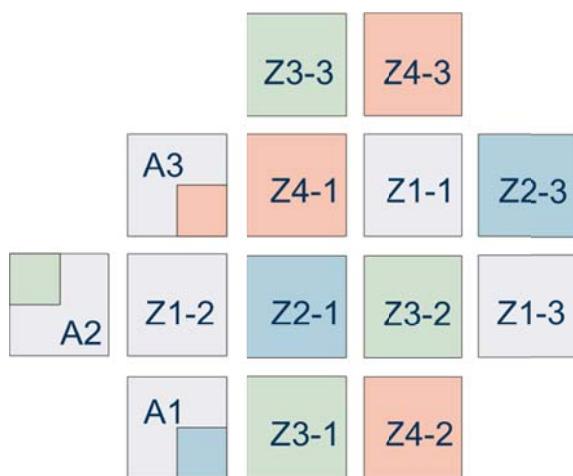


Abbildung 2: Bestückung und Anordnung der Leuchten im Testfeld (links) und Blick auf das Leuchtentestfeld (rechts, oben) und die Beobachterpositionen im Versuchsraum (rechts, unten)

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

In einem ersten Versuchsdurchgang wurden die Leuchten (A1 bis A3 und Z1-2) einzeln dargeboten, die aus Modulen bestehen, die mit LED unterschiedlicher Subbins bestückt sind. Getestet wurde, ob Lichtfarbenunterschiede innerhalb einer Leuchte erkannt werden können und eine korrekte Benennung der Lage der Platine, die nicht mit LED aus dem Subbin J14 (Z1) bestückt ist, angegeben werden kann. Im zweiten Versuchsdurchgang wurden jeweils nebeneinander liegende Leuchten paarweise in unterschiedlichen Kombinationen bewertet. Anschließend wurden paarweise Leuchtenkombinationen gezeigt, die zwischen den Leuchten einen Abstand von einem Rasterfeld (60 cm) hatten. Die Probanden bewerteten die Lichtfarbenunterschiede zwischen den Leuchten. Die Versuchssituationen wurden randomisiert dargeboten und einige zufällig ausgewählten Szenen wiederholt getestet. Am Ende der Versuche wurde das gesamte Leuchtenfeld zeitgleich eingeschaltet und untersucht, ob sich Leuchten auffällig von anderen unterscheiden. Dabei hatten die Probanden die Möglichkeit, sich frei im Raum zu bewegen und die Leuchten aus unterschiedlichen Blickpositionen zu betrachten.

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

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

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

Tabelle 1: Lichtfarbenunterschiede $\Delta u'v'$ für benachbarte Leuchten und innerhalb von Leuchten bei senkrechter Beobachtung (Bezeichnung nach Abbildung 2)

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

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

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

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

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

4 ERGEBNISSE

4.1 LICHTFARBENUNTERSCHIEDE INNERHALB DER LEUCHTE

Die Testpersonen bewerteten die Lichtfarbe einer Flächenleuchte danach, ob sie Lichtfarbenunterschiede erkennen. Werden Unterschiede erkannt, erfolgt eine Zuordnung zu einem Leuchtenbereich. Stimmt diese mit der Lage der anders bestückten Platine überein, wird dies als Treffer bewertet. Wird eine andere Region benannt, zählt dies als Fehler. Daraus ergeben sich die prozentuale Verteilung der Probandenantworten nach Tabelle 2.

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

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

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

4.2 LICHTFARBENUNTERSCHIEDE ZWISCHEN LEUCHTEN

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

Beim Test des gesamten Leuchtenfeldes wurden folgende am häufigsten benannt:

- Z3-2: 95,2 % (4200 cd/m² und 2100 cd/m²)
- Z3-1: 85,7 % (4200 cd/m²) / 90,5 % (2100 cd/m²)
- Z3-3: 57,1 % (4200 cd/m²) / 66,7 % (2100 cd/m²)

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

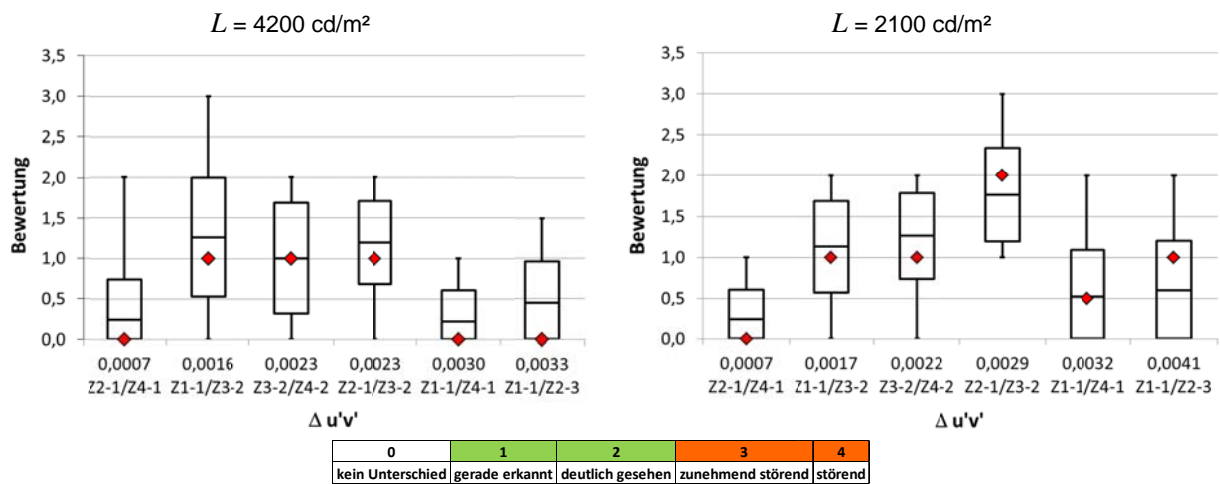


Abbildung 4: Bewertung von Lichtfarbenunterschieden zwischen benachbarten Leuchten bei senkrechter Beobachtung (Minimum, Mittelwert \pm Standardabweichung, Maximum sowie Median (Raute))

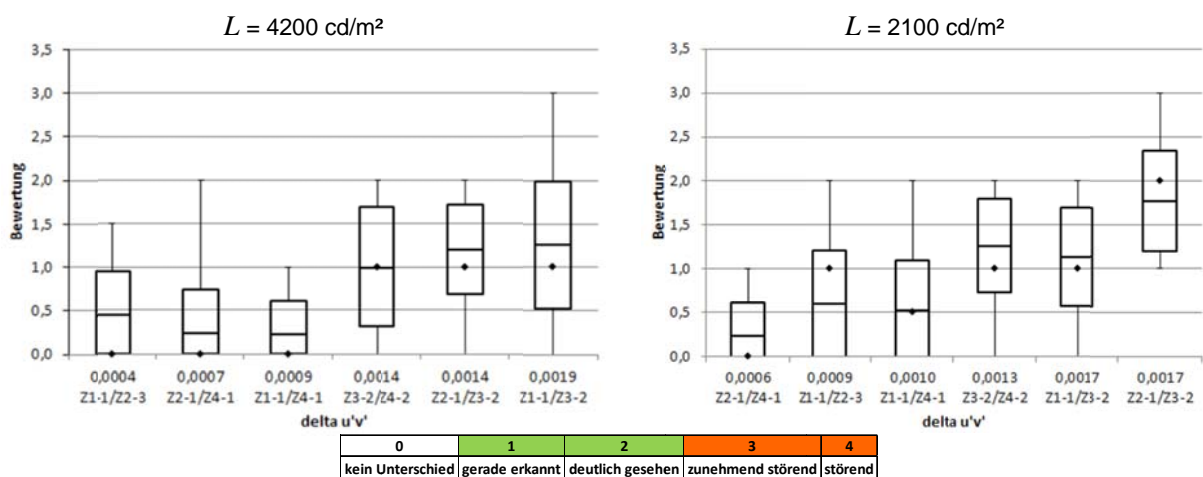


Abbildung 5: Bewertung von Lichtfarbenunterschieden zwischen benachbarten Leuchten bei senkrechter Beobachtung bei Verwendung der Spektralwertfunktionen nach Polster [Polster] (Minimum, Mittelwert \pm Standardabweichung, Maximum sowie Median (Raute))

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

Werden die von POLSTER [11] vorgeschlagenen Spektralwertfunktionen verwendet, gelingt die Abbildung der subjektiven Bewertungen in Bezug zu den Lichtfarbenunterschieden $\Delta u'v'_{TU110^\circ}$ (Abbildung 5).

5 ZUSAMMENFASSUNG

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

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

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

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

QUELLEN

- [1] American National Standard Lighting Group, (2008). C78-377: Specification for the chromaticity of Solid State Lighting Products
- [2] LG Innotek. 2013. Application Note Mid Power White LED PKG. 2013
- [3] Philips Color Kinetics, (2010) Optibin-Technology Overview - Color Consistency for Color and White-light LED, Burlington, Massachusetts, USA
- [4] Narendran, N., Deng, L., Pysar, R. M., Gu, Y., Yu, H., (2004) Performance characteristics of high-power light-emitting diodes, Third International Conference on Solid State Lighting, *Proceedings of SPIE 5187: 267-275*
- [5] MacAdam, D. L., (1942) Visual Sensitivities to Color Differences in Daylight, *Journal of the Optical Society of Amerika* 32(5), 247-273
- [6] Narendran, N., et al. (2004) Developing Color Tolerance Criteria for White LEDs, *Report Lighting Research Center Troy, NY*
- [7] Opstelten, J. J., Rinzema, G., (1987) New Insights in Chromaticity and Tolerance Areas of Fluorescent Lamps, *Journal of the Illuminating Engineering*, 16, 17-27
- [8] CS-2000 Datenblatt. abrufbar online unter <http://sensing.konicaminolta.asia/products/cs-2000-spectroradiometer/>, zuletzt aufgerufen Juni 2014
- [9] TechnoTeam, LMK color Produktinformationen, abrufbar online unter http://www.technoteam.de/produktuebersicht/lmk/produkte/index_ger.html zuletzt aufgerufen Juni 2014
- [10] Homberg, S., (2013) Untersuchung von Lichtfarbenunterschieden innerhalb und zwischen LED-Leuchten, Ilmenau: Masterarbeit TU Ilmenau
- [11] Polster, S., Bieske, K., (2013) Neue spektrale Empfindlichkeitsfunktionen zur Erfassung visueller Farbgleichheit bei LED-Spektren, Tagung Lux junior Dörfeld

DANKSAGUNG

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

