

WELCHES LICHT DARF ES SEIN?

Stapel, J., Heimpold, T., Reifegerste, F., Drechsel, S., Lienig, J.

Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design (IFTE), Technische Universität Dresden, Deutschland
josephine.stapel@tu-dresden.de

ABSTRACT

Es gibt zahlreiche technische Parameter, nach denen LED-Mischspektren optimiert werden können. Doch bisher gibt es, außer durch umfangreiche Nutzerbefragungen zu vorgegebenen Lichtverteilungen, kaum Informationen dazu, ob und warum Nutzern ein Licht gefällt.

Der Forschungsbereich des lichttechnischen Entwurfs am IFTE möchte sich den visuellen Nutzerwünschen auf anderem Weg nähern. Dafür wird eine Studie zur subjektiven Bewertung von LED-Mischlicht mit dem Thema: „Was ist schönes Licht?“ durchgeführt. Hierbei stellen die Probanden das Mischlicht selbst ein und beschreiben dieses im Anschluss. Anhand der gewonnenen Messdaten sowie der Aussagen der Probanden werden Zusammenhänge zwischen verschiedenen Güte Merkmalen für weißes Licht und der subjektiven Lichtbewertung untersucht. Daraus sollen Gestaltungsrichtlinien für LED-Mischspektren abgeleitet werden, die Nutzer als angenehm empfinden.

Schlagwörter: LED, Licht, Spektrum, Studie, Wahrnehmung, Präferenz, Kriterien, schön, weiß

1 EINLEITUNG – HINTERGRUND DER STUDIE

LEDs gestatten das weitgehend freie Bestimmen von spektralen Verteilungen. Ein gewinnbringender Einsatz dieser Möglichkeiten setzt jedoch voraus, dass Ziele für die Gestaltung der Spektren formuliert werden können. Bisher sind hierfür nur wenige Richtlinien formuliert worden. Klassisch verwendete Größen wie der Farbwiedergabeindex CRI/R_a sind als alleiniges Kriterium nicht zur Beurteilung der Lichtqualität von LED-Spektren geeignet.

Es gibt verschiedene Strategien, sich neuen Gestaltungsrichtlinien zu nähern. Eine häufiger verwendete Herangehensweise besteht im Durchführen von Studien zur Bewertung vorgelegter spektraler Verteilungen durch Probanden. Der hier verfolgte Ansatz zielt



dagegen darauf ab, dass die Nutzer selbst ihr *schönes Licht* einstellen und subjektiv mit eigenen Worten beschreiben. Dies ist insofern schwierig, als sich die Nutzer während der Einstellung auf das Licht adaptieren und damit in Abhängigkeit von Ihrem Lösungsweg und weiteren äußeren Bedingungen zu unterschiedlichen Ergebnissen gelangen. Auf der anderen Seite erhält man Aussagen darüber, in welchen Grenzen Menschen Spektren als schön bezeichnen. Der wissenschaftlich schlecht definierte Begriff *schönes Licht* wurde bewusst gewählt, um möglichst wenig Einfluss auf die Entscheidungen der Probanden zu nehmen. Durch diese Herangehensweise wird die Gefahr vermieden, durch zu viel Information in der Fragestellung die Ergebnisse zu beeinflussen.

2 STUDIENDESIGN

Im Folgenden werden die wichtigsten Merkmale des Aufbaus und Studiendesigns vorgestellt. Die detailliertere Beschreibung kann [4] entnommen werden.

2.1 Versuchsaufbau, Testobjekte

In der verwendeten Lichtkammer mit einer Grundfläche von 60 cm x 60 cm werden unterschiedliche Objekte ausgestellt: Blumen verschiedener Farben, Grünpflanzen, Obst, Gemüse, diverse Stoffstücke und Text auf weißem Papier. Diese sind den Probanden aus ihrem Alltag bekannt und dienen ihnen zusammen mit der eigenen Hand zur Bewertung des eingestellten Lichtes.

2.2 Beleuchtung und Steuerung

Die Versuchsleuchte Nr. 1 wurde mit einem Abstand von 50 cm zur Versuchsfläche angeordnet und gewährleistet eine blendfreie und gleichmäßige Ausleuchtung der Lichtkammer. Enthalten sind sechs LED-Kanäle der Lichtfarben Kaltweiß, Warmweiß, Rot, Amber, Cyan und Blau, die konstantstromgespeist sowie unabhängig steuerbar sind. Der realisierbare Farbgamut der Versuchsleuchte Nr. 1 ist in Abbildung 1 dargestellt.

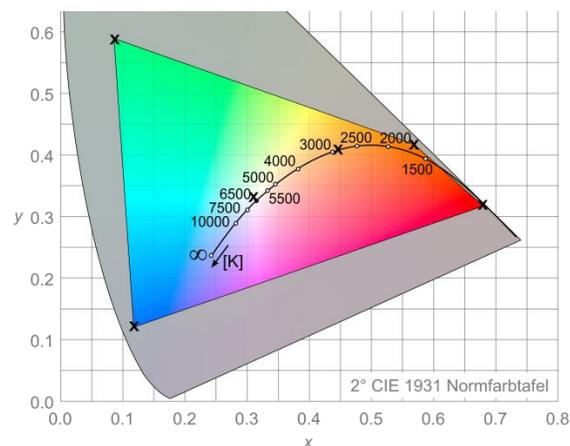


Abbildung 1 Farbgamut der Versuchsleuchte Nr. 1 im CIE 1931 2° Normfarbraum



Die Farborte der eingesetzten LEDs bei Referenzbedingungen ($\vartheta_{LED_TP} = 25\text{ °C}$, $I_{LED} = 350\text{ mA}$) sind mit Kreuzen gekennzeichnet. Mit dieser Leuchte ist ein R_a von 97 erreichbar.

2.3 Nutzerbefragung, Datenerfassung

An dieser Studie nahmen 50 Probanden mit normaler Farbsichtigkeit, drei Probanden mit leichter und zwei Probanden mit starker Dyschromatopsie teil. Die 40 männlichen und 15 weiblichen Probanden waren zwischen 19 Jahren und 57 Jahren alt.

Folgende Fragen wurden den Probanden zum eingestellten Wunschlicht gestellt:

1. Wie würden Sie Ihr eingestelltes Licht beschreiben?
2. Warum haben Sie es so eingestellt?
3. Wo könnten Sie sich das Licht vorstellen?
4. Was stört/stimmt nicht/fehlt?

Für die Beantwortung der Fragen erhielten die Probanden weder vorgegebene Antworten zur Auswahl, noch Parameter mit Skalen zur Bewertung von verschiedenen Attributen des Lichtes. Hintergrund ist, dass die Probanden das Licht mit ihren eigenen Worten und anhand der eigenen „Attribute“ beschreiben und bewerten sollen. Durch Vordefinition werden die Probanden bereits in Ihrer Beschreibung beeinflusst.

3 ERGEBNISSE DER STUDIE

Durch Wiederholung des Versuches an verschiedenen Tagen und Uhrzeiten wurden bisher insgesamt 120 Datensätze zu *schönem Licht* erfasst. Die hier dargestellten Ergebnisse umfassen nur die Datensätze und Antworten der normalfarbsichtigen Versuchsteilnehmer. Es erfolgt keine Unterscheidung zwischen den Datensätzen männlicher oder weiblicher Probanden, da bisherige Datenanalysen keine Hinweise auf geschlechtsspezifische Präferenzen zeigten [4].

Anhand der Antworten der Probanden auf die Frage: „Wo könnten Sie sich das Licht vorstellen?“, wurden alle gesammelten Datensätze entweder dem *Wohnbereich* (36 Datensätze) bzw. *Arbeitsbereich* (71 Datensätze) zugeordnet.

3.1 Betrachtete Parameter

Für jedes eingestellte *schöne Licht* wurden folgende Parameter gemessen oder berechnet: Spektrale Verteilung $S(\lambda)$, Beleuchtungsstärke E , ähnlichste Farbtemperatur CCT , spezielle Farbwiedergabeindizes $CRI R_i$, allgemeiner Farbwiedergabeindex R_a , Farbort $[x, y]$ im CIE1931 Farbraum, Abstand des Farbortes zur Planck-Kurve $\Delta u'v'$, Gamut Area Index GAI , Feeling of Contrast Index FCI sowie circadianer Wirkfaktor a_{cv} . Alle Betrachtungen wurden auf den sichtbaren Spektralbereich zwischen 380 nm und 780 nm beschränkt. Im Folgenden werden ausgewählte Parameter vorgestellt.



3.2 Beleuchtungsstärke und ähnlichste Farbtemperatur

Bereits 1941 hatte Kruithof einen sog. Behaglichkeitsbereich in Abhängigkeit von Beleuchtungsstärke und Farbtemperatur definiert [1]. Demnach sollte bei einer Lichtfarbe mit niedriger ähnlichster Farbtemperatur CCT die Beleuchtungsstärke E niedrig und bei hoher CCT die Beleuchtungsstärke hoch sein. Der „behagliche Bereich“ ist in Abbildung 2 weiß, der unbehagliche Bereich grau markiert. Die gestrichelte Linie markiert die minimale Beleuchtungsstärke, die nach DIN EN 12464-1 für einen Standard-Büroarbeitsplatz gefordert wird.

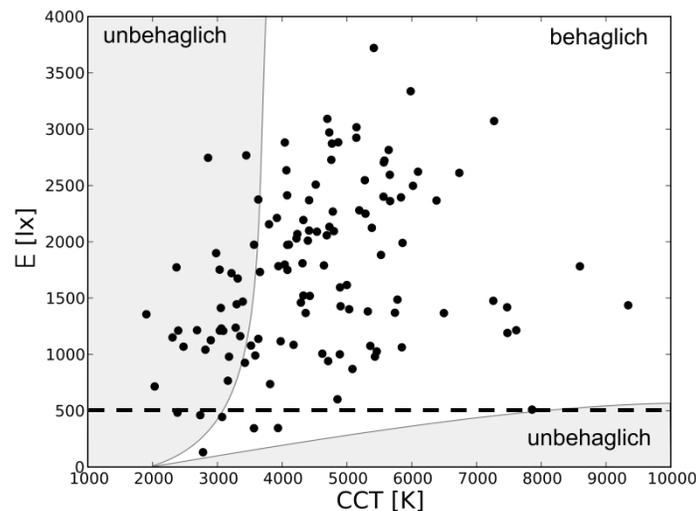


Abbildung 2 Beleuchtungsstärke E sowie ähnlichste Farbtemperatur CCT im Vergleich zum Behaglichkeitsbereich (grau) nach [1]

3.3 Farbwiedergabe

Für die Farbqualität wird häufig nur der Farbwiedergabeindex CRI angegeben. Für eine gute Farbwiedergabe für die Innenraumbeleuchtung wird ein Farbwiedergabeindex $R_a > 80$ und ein $R_9 > 0$ empfohlen. Dieses Kriterium erfüllen 46 % aller eingestellten Lichtspektren. Bodrogi und Khanh empfehlen hingegen, dass für eine qualitativ hochwertige Farbwiedergabe statt des R_a der Mittelwert $\{R_1 \dots R_{14}\}$ mindestens 80 und der R_9 (dunkles Rot) mindestens 40 sein sollte [3]. Dieses Kriterium erfüllen 30 % der eingestellten Lichtspektren.

3.4 Gamut-Area-Index kombiniert mit Farbwiedergabe

Freyssinier und Rea empfehlen eine Kombination des Kennwertes des Gamut-Area-Index GAI mit dem CRI R_a [2]. Je größer der GAI ist, desto gesättigter erscheinen die Farben. Für eine bessere subjektive Bewertung hinsichtlich Natürlichkeit und Lebhaftigkeit des Lichtes empfehlen die Autoren einen GAI mit $80 \leq GAI \leq 100$ sowie einen CRI $R_a \geq 80$. Abbildung 3 zeigt alle ermittelten Koordinaten $[CRI, GAI]$ der Probanden unterteilt nach Arbeitsbereich (links) sowie Wohnbereich (rechts). Der empfohlene Bereich ist schwarz eingerahmt.

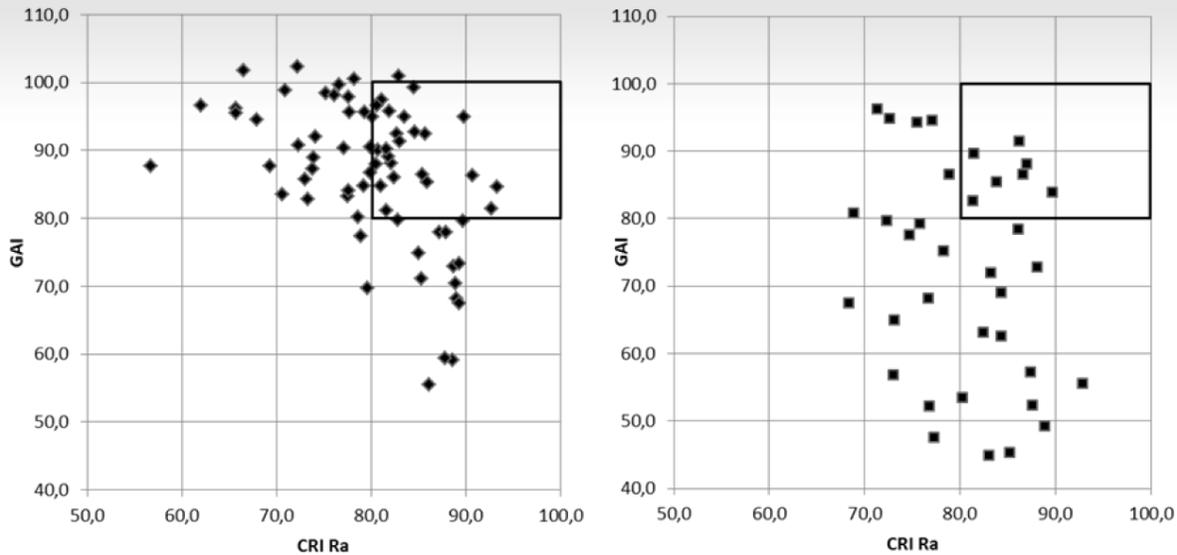


Abbildung 3 Koordinaten [CRI, GAI] der Spektren, links: Arbeitsbereich, rechts: Wohnbereich

3.5 Spektrale Abweichung

Viele Probanden bezeichneten im Rahmen dieser Studie ihr Licht gerade dann als *schön*, wenn es ihrer Beschreibung nach ähnlich dem Glühlampenlicht war. Daher erscheint es sinnvoll, die eingestellten Lichtspektren $S_s(\lambda)$ mit einem Referenzspektrum $S_p(\lambda)$, z. B. einem thermischen Strahler, zu vergleichen. Dieses Referenzspektrum sollte dabei gleichmäßig, d. h. ohne Lücken und Spitzen sein. Als Bezugslicht wurde der Planck'sche Strahler mit der Temperatur T_s als Parameter gewählt.

Das Spektrum des Referenzstrahlers $S_p(\lambda)$ gleicher Farbtemperatur ist definiert mit

$$S_p(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\left(\frac{hc}{k\lambda T_s}\right)} - 1} \Bigg|_{T_s=CCT(S_s(\lambda))}, \quad (1)$$

wobei k die Stefan-Boltzmann-Konstante, h das Planck'sche Wirkungsquantum, c die Lichtgeschwindigkeit, λ die Wellenlänge und T_s die ähnlichste Farbtemperatur $CCT(S_s(\lambda))$ sind. Damit das zu bewertende Lichtspektrum und der Referenzstrahler dieselbe Beleuchtungsstärke E_v aufweisen, ist ein Korrekturfaktor

$$k_1 = \frac{E_{v,s}}{E_{v,p}} = \frac{\int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} S_s(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} S_p(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

zu bestimmen. Das Ergebnis der Anpassung ist in Abbildung 4 für ein Beispielspektrum dargestellt.

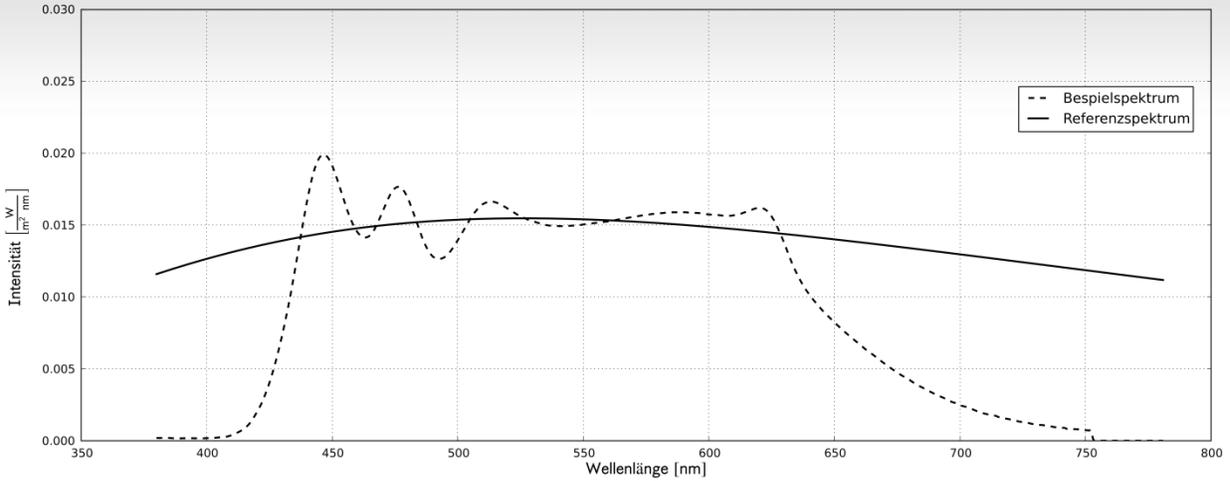


Abbildung 4 Beispiel- und Referenzspektrum selber Farbtemperatur und Beleuchtungsstärke

Die spektrale Abweichung Δ_{SD} (engl. spectral deviation) wird durch Aufsummieren der Differenzen zwischen den Kurven bestimmt:

$$\Delta_{SD} = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} |S_s(\lambda) - k_1 S_p(\lambda)| d\lambda. \quad (3)$$

Dabei werden jedoch die in Abbildung 5 dargestellten starken Abweichungen zwischen den Spektren auch in Bereichen erfasst, in denen das menschliche Auge nur geringe Empfindlichkeit besitzt.

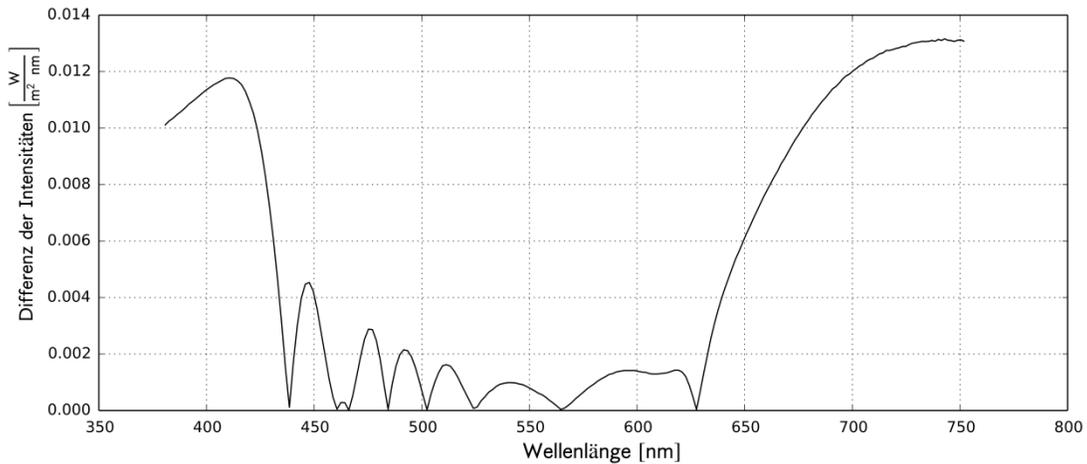


Abbildung 5 Differenzen zwischen Beispiel und Referenzspektrum



Um dies zu berücksichtigen besteht ein weiterer Ansatz darin, die beiden Spektralverteilungen gleicher Farbtemperatur und Beleuchtungsstärke anschließend anhand der Normspektralwertkurven $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ und $\bar{z}(\lambda)$ des farbnormalsichtigen Auges zu wichten. Dieser Kennwert der gewichteten spektralen Abweichung (engl. weighted spectral deviation) Δ_{SDw} wird gemäß

$$\Delta_{SDw} = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} (|\bar{x}(\lambda) \cdot S_s(\lambda) - \bar{x}(\lambda) \cdot k_1 S_p(\lambda)| + |\bar{y}(\lambda) \cdot S_s(\lambda) - \bar{y}(\lambda) \cdot k_1 S_p(\lambda)| + |\bar{z}(\lambda) \cdot S_s(\lambda) - \bar{z}(\lambda) \cdot k_1 S_p(\lambda)|) d\lambda \quad (4)$$

bestimmt. Je kleiner der Wert für Δ_{SDw} ist, desto ähnlicher sind die Spektren. Die Ergebnisse der Bewertung der Studiendatensätze anhand der spektralen Abweichung werden im Vortrag näher dargestellt.

4 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Der Vergleich der Einstellungen im Rahmen dieser Studie mit dem Behaglichkeitskriterium nach Kruithof [1] in Abbildung 2 zeigt deutlich, dass die Probanden auch bei niedrigen Farbtemperaturen hohe Beleuchtungsstärken als angenehm und schön bewerten (überschrittener grauer Bereich im Warm- bis Neutralweißen). Nach Kruithof sollte besonders in diesem Bereich das Licht eher als kalt und die Umgebung als fahl wahrgenommen werden. Dies konnte nicht bestätigt werden. Bemerkenswert ist auch, dass 94 % aller Probanden sich eine Beleuchtungsstärke von über 500 lx (gestrichelte Linie in Abbildung 2) eingestellt haben – unabhängig davon, ob es ein Licht für den Wohn- oder Arbeitsbereich sein sollte. Eine mögliche Ursache für die generell hohen Beleuchtungsstärken könnte bei dieser ersten Versuchsreihe die matt schwarze Hintergrundfarbe der Testkammer (Raumbezugsfläche) sein. In einer Folgestudie wird die Farbe daher zu einem matten Lichtgrau geändert.

Abbildung 3 zeigt deutlich, dass die Probanden für den Arbeitsbereich tendenziell Lichtspektren mit höherem *GAI* bevorzugen, wohingegen im Wohnbereich der *GAI* sehr breit streut (bis hinab zu 40). Die Studie zeigt zudem, dass die Probanden Licht mit *CRI R_a*-Werten von weit unter 80 auch als angenehm werten. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über den eingestellten Bereich und den Mittelwert der zuvor genannten Parameter für den Arbeitsbereich (AB) sowie Wohnbereich (WB). Deutlich erkennbar ist eine Erwartungshaltung für niedrigere ähnlichste Farbtemperaturen *CCT* und niedrigere Beleuchtungsstärken *E* für den Wohnbereich.

Tabelle 1 Parameter der eingestellten Lichtspektren für Wohnbereich (WB), Arbeitsbereich (AB)

	<i>E</i> [lx]	<i>CCT</i> [K]	<i>CRI R_a</i>	<i>GAI</i>
WB _{Minimum}	131,0	1903,6	68,4	44,9
WB _{Maximum}	2882,9	7857,9	92,8	96,2
WB _{Mittelwert}	1341,8	3802,4	80,6	72,2
AB _{Minimum}	344,0	2368,8	56,7	55,5
AB _{Maximum}	3336,5	9341,5	93,3	102,3
AB _{Mittelwert}	1905,2	4796,2	80,0	80



5 ZUSAMMENFASSUNG

Die Untersuchung bestätigt, dass die Bewertung von künstlicher Beleuchtung durch Menschen sehr subjektiv und anhand unterschiedlichster Kriterien erfolgt. Es wurde von den Probanden eine große Vielfalt bei der ähnlichsten Farbtemperatur CCT eingestellt. Auch die gewünschten Beleuchtungsstärken E variierten sehr. Zur Zeit übliche Kriterien zur technischen Lichtbewertung, wie beispielsweise eine hohe Farbwiedergabe R_a oder der damit kombinierte Parameter des Gamut-Area-Index GAI , sind allein als Kriterium für die Lichtbewertung nicht ausreichend. Bisher zeigte keines der betrachteten Kriterien einen deutlichen Zusammenhang mit den verbalen Beschreibungen der Nutzer. Ein neuer Parameter zur Bestimmung der spektralen Abweichung des eingestellten Lichtes von einem Referenzspektrum wurde definiert und stellt einen erweiterten Ansatz zur spektralen Bewertung von LED-Mischspektralen dar.

Die Analyse der Daten anhand bisher bekannter Bewertungsparameter ist noch nicht abgeschlossen. Die Korrelation mit Aussagen der Probanden ist Stand der Bearbeitung. Anhand der Auswertung der Nutzeraussagen wurden weitere spektral anders bestückte LED-Leuchten entwickelt. Durch nachfolgende angepasste Studien soll die Datenbasis zu *schönem Licht* erweitert werden. Zusätzlich sollen die bereits eingestellten Lichtspektralen durch andere Probanden bewertet werden.

QUELLEN:

- [1] Kruithof, A. A. (1941). *Röhrenlampen mit Leuchtstoffen für allgemeine Beleuchtungszwecke*. Philips' Technische Rundschau, 6.
- [2] Freyssinier, J.P., Rea, M. (2010). *A two-metric proposal to specify the color-rendering properties of light sources for retail lighting*. Tenth International Conference on Solid State Lighting Proceedings of SPIE 7784:77840V.
- [3] Bodrogi, P., Khanh, T.Q. (2013). *Neue Methoden für die Bewertung der Farbwiedergabe von weißen LED-Lichtquellen (nCRI, CQS)*. LED 2.0 – Innovative Beleuchtung mit LED, 11. VDI-Tagung: S. 159-169.
- [4] Stapel, J., Heimpold, T., Reifegerste, F. (2013). *Welches Licht soll es sein? Eine Studie zur subjektiven Lichtbewertung*, Lux junior 2013, 11. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs.