

## Welches Licht soll es sein?

### Eine Studie zur subjektiven Lichtbewertung

*Josephine Stapel, Tobias Heimpold, Frank Reifegerste*

*Technische Universität Dresden, Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design*

*josephine.stapel@ifte.de, tobias.heimpold@ifte.de, frank.reifegerste@ifte.de*

## 1 Einführung

LEDs haben sich durch ihre Effizienz und Lebensdauer inzwischen als Leuchtmittel in der Allgemeinbeleuchtung etabliert. Bislang war durch das Leuchtmittel die spektrale Verteilung festgelegt. Teilweise ließ sich die Intensität und Farbtemperatur durch Dimmen anpassen. LEDs bieten die Möglichkeit, gezielt die spektrale Verteilung des Lichtes zu beeinflussen. Dafür fehlen momentan Dimensionierungsregeln.

Aktuell werden zahlreiche Untersuchungen zur visuellen Wahrnehmung sowie der biologischen und emotionalen Beeinflussung des Menschen durch LED-Licht durchgeführt. Dabei werden unterschiedliche Ziele verfolgt, u. a.:

- Steigerung der Produktivität von Menschen durch dynamisches Licht [PH2013],
- altersgerechtes dynamisches Licht [DE2010],
- Beeinflussen des Kaufverhaltens des Menschen mit angepasstem Licht [OO2012].

Für die Bewertung und Optimierung der LED-Leuchten stehen verschiedene Kriterien und Gütemerkmale zur Verfügung, wie z. B. Farbwiedergabeindex, Beleuchtungsstärke, Wirkungsgrad, Abweichung vom Planckschen Kurvenzug ( $\Delta uv$ ), Spektrum ähnlich dem thermischen Strahler, spektrale Gleichmäßigkeit, Kontrast, Farbdifferenzierung, circadiane bzw. melanopische Wirkung oder Behaglichkeit.

Das Erfüllen der genannten Bewertungskriterien ist mit unterschiedlichen LED-Lösungen möglich. Beim Optimieren spektraler Verteilungen stellt sich zwangsläufig die Frage: Welches Licht will der Anwender überhaupt? Gefällt ihm das LED-Licht, welches hinsichtlich der Farbwiedergabe optimiert wurde? Ist eine Beleuchtungsstärke nach Norm für ihn ausreichend? Muss das LED-Mischspektrum gleichmäßig und ähnlich einem thermischen Strahler sein, damit der Nutzer es als visuell angenehm empfindet?

Aktuelle Studien greifen dieses Thema auf und untersuchen, welches Licht Nutzer bevorzugen. In [LR2013] werden von Testpersonen Objekte in einer Testkammer auf ihre Natürlichkeit unter verschiedenen vorgegebenen LED- und Fluoreszenz-Spektren bewertet. Dabei zeigte sich, dass die Farbwiedergabe (*CRI*) als alleiniges Bewertungskriterium für die Natürlichkeit nicht geeignet ist. [BI2007] untersuchte u. a. den Zusammenhang von Beleuchtungsniveau und präferierter Lichtfarbe unter dimmbaren RGB-Leuchtstofflampen.

Problematisch an Studien zur Präferenz spektraler Verteilungen ist, dass bereits durch das Studiendesign Einfluss auf die zu optimierenden Lichtparameter genommen wird. Werden messtechnisch gut erfassbare Parameter untersucht, korrelieren diese oft ungenügend mit der Gesamtbewertung der Nutzer. Umgekehrt ist ein guter Gesamteindruck schlecht in Kennzahlen auszudrücken. Aus diesem Grund wurde eine Studie entworfen, die sich in mehreren Schritten der Fragestellung nähern soll, welche spektralen Verteilungen durch

Anwender als positiv eingeschätzt werden. Nachfolgend wird der aktuelle Stand des ersten Teils der Untersuchung vorgestellt, in der Versuchspersonen möglichst unbeeinflusst ein für sie wünschenswertes Licht einstellen sollten.

## 2 Versuchsbeschreibung

### 2.1 Aufbau

Im Gegensatz zu bisherigen Studien zum LED-Licht wird bei dieser Untersuchung unter Laborbedingungen den Testpersonen kein Licht mit einem definierten Spektrum zur Bewertung vorgegeben. In einer Lichtkammer mit der Grundfläche 60 cm x 60 cm werden verschiedene Objekte des täglichen Lebens ausgestellt. Der Abstand der einstellbaren Lichtquelle zur Beleuchtungsfläche beträgt 50 cm. Mit geeigneten Verdunklungsmaßnahmen an der Testkammer wird eine Beeinflussung des Probanden durch Umgebungslicht ausgeschlossen.

### 2.2 Beleuchtung

Als Lichtquelle dient eine speziell entwickelte LED-Leuchte mit Doppelreflektoroptyk (blendfrei, gleichmäßige Ausleuchtung der Grundfläche) mit sechs unabhängig steuerbaren LED-Kanälen und einer „angereicherten“ Mischung aus kaltweißen, warmweißen, roten, blauen, cyan- und amberfarbenen LEDs. Der typische Gamut der Lichtquelle ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Speisung der LEDs erfolgt durch Konstantstromquellen, um einen möglichen Einfluss durch pulswellenmoduliertes Licht auf den Eindruck des Probanden zu vermeiden.

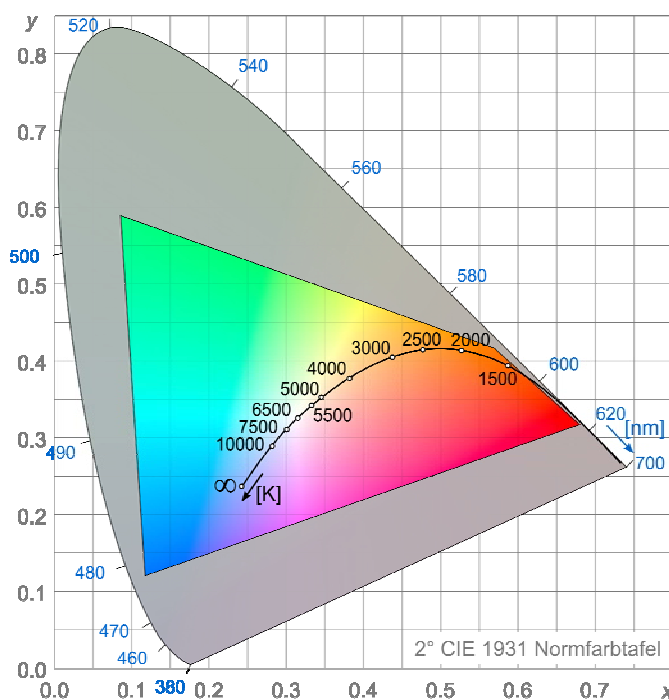


Abbildung 1: Gamut der Versuchsleuchte im CIE 1931 2° Normfarbraum, gemessen bei  $\vartheta_{LED\_TP} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $I_{LED} = 350\text{ mA}$

## 2.3 Steuerung und Messdatenerfassung

Die LED-Kanäle können durch den Nutzer über eine grafische Bedienoberfläche (Abbildung 2) einzeln und unabhängig voneinander in ihrer Helligkeit gesteuert werden. Sowohl die eingestellten Speiseströme der Einzelkanäle, als auch die Temperatur der LED-Platine werden erfasst und gespeichert.

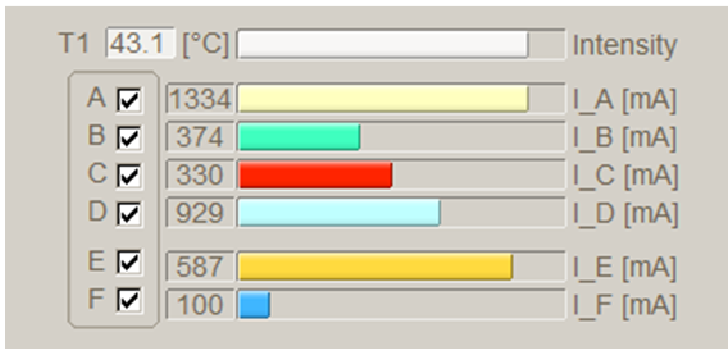


Abbildung 2: Bedienoberfläche für Probanden

Zum Messen des eingestellten Beleuchtungsniveaus sowie Lichtspektrums dient ein in der Lichtkammer platziertes Spektroradiometer mit Beleuchtungsstärke-Aufsatz. Das erfasste Spektrum liegt im Bereich von 380 nm bis 750 nm. Als Beispiel ist ein erfasstes Spektrum in Abbildung 3 mit dem zugehörigen x-y-Farbart im CIE 1931 2° Normfarbraum dargestellt.

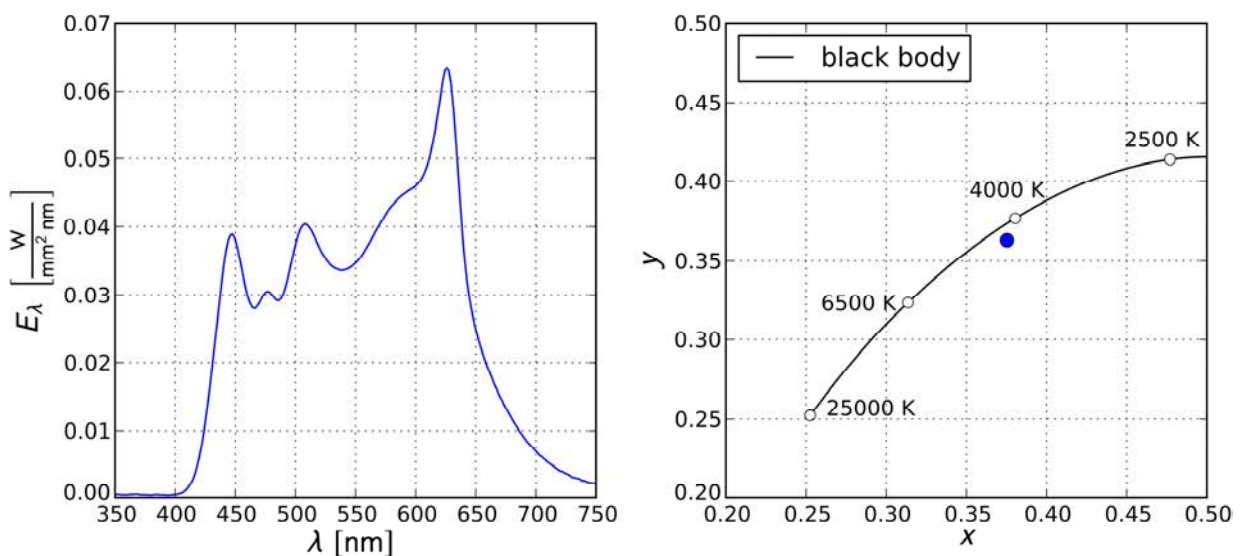


Abbildung 3: Beispiel des erfassten Spektrums Nr. 6 mit zugehörigem Farbart

## 2.4 Probanden

Bisher nahmen insgesamt 50 Probanden mit normaler Farbsichtigkeit sowie drei Probanden mit leichter und zwei Probanden mit ausgeprägter Dyschromatopsie an den Testreihen teil. Es gab 40 männliche und 15 weibliche Probanden im Alter von 19 Jahren bis 57 Jahren. Die männlichen Probanden waren im Mittel 32,8 Jahre alt, die weiblichen 33,4 Jahre. 51 Probanden waren Europäer, zwei Asiaten und zwei Südamerikaner. Alle Personen waren entweder Studenten, Auszubildende oder Mitarbeiter der TU Dresden bzw. Bekannte derselben. Vier Probanden hatten einen Hintergrund im Bereich der Beleuchtungstechnik.

## 2.5 Untersuchungsobjekte

Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, kommt eine Vielzahl von Objekten zur Bewertung des eingestellten Lichtes zum Einsatz, die den Probanden aus ihrem Alltag bekannt sind: Blumen (gelb, orange, blau-violett), Grünpflanzen (verschiedene Blätter, junge Kalanchoe), Obst (Orange, Zitrone, Apfel), Gemüse (Gurke, Tomate), Brötchen, Wurst, div. Stoffstücke, Text auf weißem Papier, Leiterplatte sowie die Hand des Probanden.



*Abbildung 4:  
Versuchsaufbau mit  
Untersuchungsobjekten  
(ohne Probandenhand)*

## 2.6 Untersuchungsgegenstand

Die Probanden haben in dieser Studie die Aufgabe, über die Regler eine Lichtverteilung einzustellen, die sie als „schön“, „angenehm“ bzw. „wünschenswert“ empfinden. Durch die Wahl der wissenschaftlich weichen Fragestellung soll möglichst wenig Einfluss auf die Probanden genommen werden. Indem den Probanden bei Ihren Beweggründen für ihre Lichteinstellung freie Hand gelassen wird, spannt sich ein breites Feld des Vorzugslichtes auf. Auf Grundlage dieser ersten Annäherung an das Thema sollen sich zukünftig weitere an spezielle Lichtszenarien angepasste Teilstudien anschließen.

Durch Wiederholung des Vorzugslicht-Versuches an verschiedenen Tagen und Uhrzeiten mit alters-, geschlechts- und berufsgemischten Probanden wurden insgesamt 120 Datensätze erfasst.

## 3 Auswertung

Bereits die unscharfe Fragestellung des Versuches bietet viele Freiheitsgrade. Neben den technischen Kenngrößen werden zusätzlich verbale Beschreibungen der Probanden zu ihrem eingestellten Licht aufgezeichnet. Die drei gestellten Grundfragen lauten: Warum haben Sie dieses Licht eingestellt? Wie würden Sie Ihr Licht beschreiben? Wo könnten Sie sich dieses Licht vorstellen? Für die Antworten gab es weder Vorgaben zur Auswahl noch Bewertungsmaßstäbe zu verschiedenen Kriterien. Vielmehr sollten die Probanden ihre eigenen Bewertungen und Beschreibungen vornehmen.

Die erste Frage wurde häufig beantwortet mit:

- die Farben wirken natürlich,
- das Licht ist sehr angenehm,
- es ist nicht anstrengend für die Augen,
- die Farben sind kräftig,
- es ergibt sich ein guter Kontrast.

Bereits diese Antworten zeigen, dass für die Lichtbewertung sehr unterschiedliche Ansätze vorliegen. Bei den Antworten zur zweiten Frage zeigt sich deutlich, dass das Farbempfinden auch bei Weiß sehr stark variiert. So wurde beispielsweise ein Licht mit ca. 7800 K, 510 lx und  $R_a = 75$  als „angenehm, wärmeres Weiß, hell“ beschrieben (Datensatz Nr. 92).

Bei der dritten Frage definierten sich die Probanden teilweise eine konkrete Zielanwendung bereits vor Versuchsbeginn selbst, z. B. Licht zum Arbeiten am Schreibtisch, Licht in der Küche, Licht zum Entspannen.

Sowohl die weiche Frage als auch die bewusst nicht vorgegebenen Bewertungskriterien des Lichtes durch die Probanden erschweren die Auswertung der Daten. Die ersten Analysen der Daten erfolgten mit Excel und Python.

Da es bei dem Versuch nicht das Ziel war Tageslicht nachzubilden (z. B. D65), wird als Bezugslicht der theoretische Weißpunkt E mit ideal gleichmäßiger Spektralverteilung gewählt. Die Berechnungen der Kennwerte der aufgenommenen Vorzugslichtspektren erfolgen im CIE1931-Farbraum sowie im  $L^*a^*b^*$ -Farbraum mit  $L = 100$ . Die Tabelle 1 zeigt die Minima und Maxima der Kennwerte für die bisher erfassten Einstellungen.

*Tabelle 1: Parameter der eingestellten Vorzugslichtspektren*

	Beleuchtungs- stärke $E$ [lx]	Correlated Color Temperature CCT [K]	Color Rendering Index $R_a$	Gamut Area Index $GAI$
Minimum	131	1900	16,92	44,9
Maximum	3721	9400	93,31	105,51

Abbildung 5 zeigt die berechneten Farborte aller Datensätze im CIE1931 2° Normfarbraum. Die roten Punkte sind alle eingestellten Vorzugslichter weiblicher Probanden, die blauen Punkte die der männlichen Probanden. Es ist kein geschlechterspezifischer Unterschied bei den eingestellten Farborten offensichtlich.

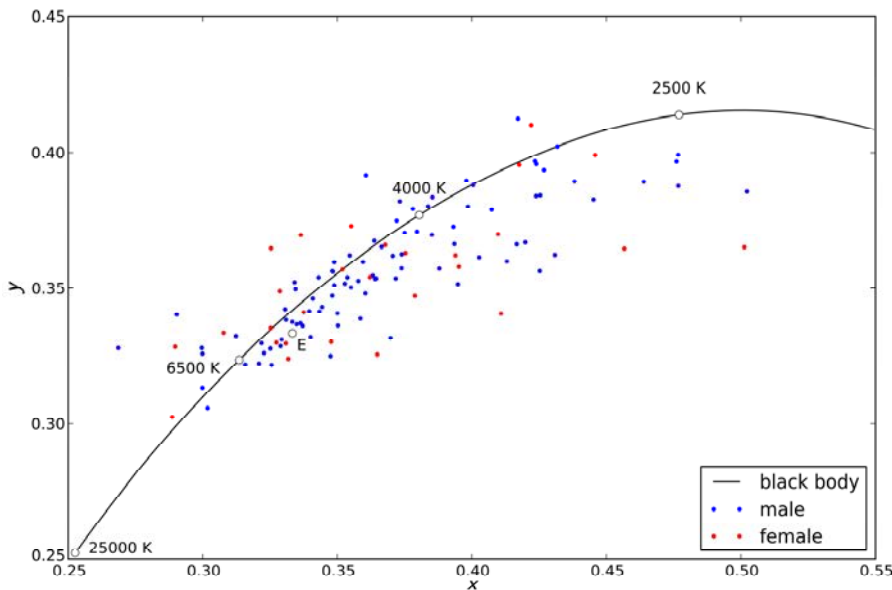


Abbildung 5: Eingestellte Farborte des Vorzugslichtes im CIE1931 2° Normfarbraum

Um die Lage der Farborte bei verschiedenen korrelierten Farbtemperaturen besser zu überblicken, wurden in Abbildung 6 Quantile von 250 K gebildet. Es zeigt sich bei hohen Farbtemperaturen ( $CCT > 6000$  K) im Mittel eine Lage der eingestellten Farborte oberhalb der Planck-Kurve, bei niedrigeren Farbtemperaturen ( $CCT \leq 6000$  K) eine Lage der Farborte nahe an bzw. unterhalb der Planck-Kurve. Eine ähnliche Tendenz der Farborte bei der Akzeptanz des eingestellten Weißlichtes verschiedener Farbtemperaturen wurde auch in [AS2013] berichtet.

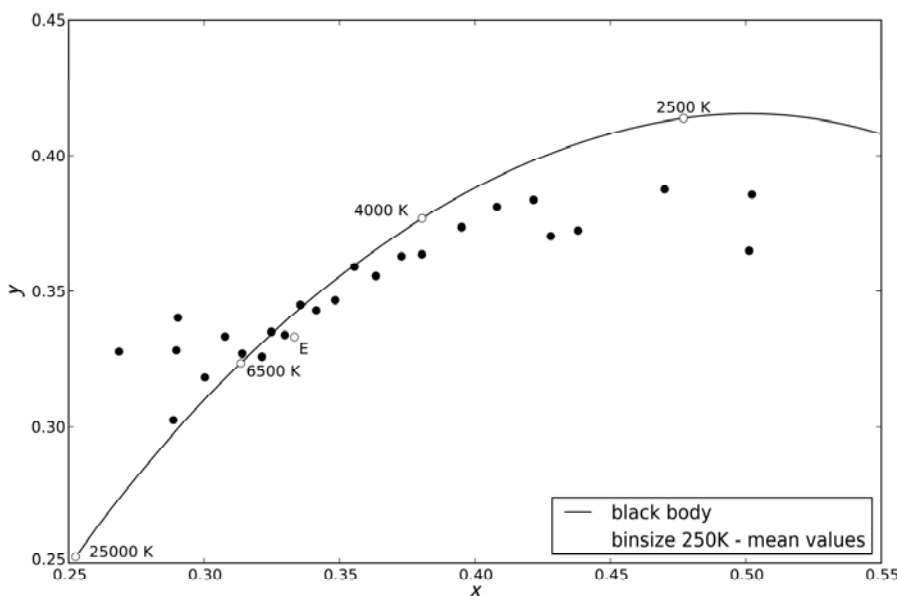


Abbildung 6: Lage der Farborte in Abhängigkeit der CCT im CIE1931 2° Normfarbraum; Breite der Quantile: 250 K

Weiterhin wurden die von den Probanden selbst gewählten Zielszenarien den Klassen Arbeitsbereich und Wohnbereich zugeordnet. Es ergeben sich die Verteilungen in Abbildung 7. Bei Licht für den Wohnbereich liegt der Schwerpunkt der Farbtemperatur bei 3894 K, für den Arbeitsbereich bei 4869 K – jeweils mit breiter Streuung.



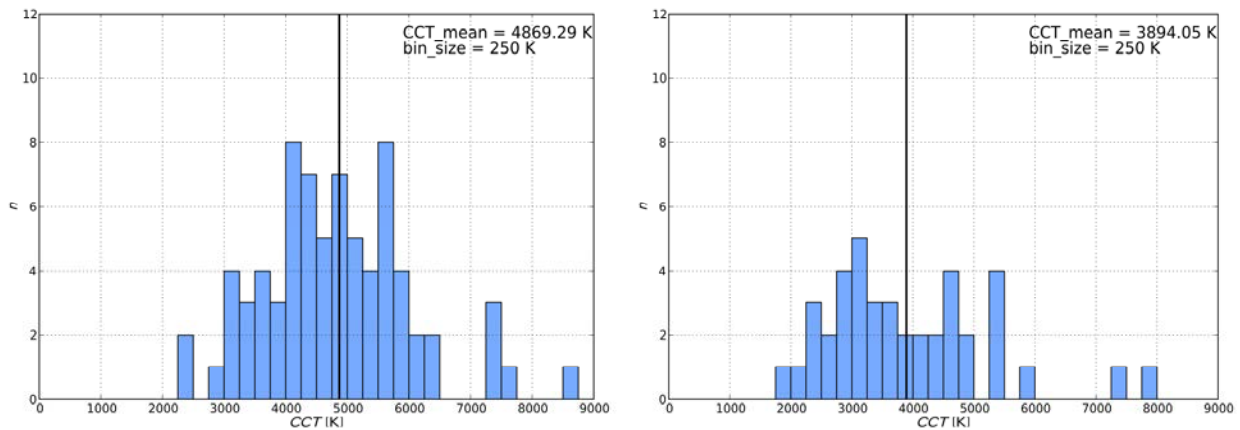


Abbildung 7: Histogramme der eingestellten Farbtemperaturen (CCT), links: Angabe Wohnbereich, rechts: Angabe Arbeitsbereich, Breite der Quantile: 250 K

Eine Analyse der Datensätze anhand des von Rea und Freyssinier [AS2013] vorgestellten Gamut-Area-Index (*GAI*) erfolgt ebenfalls unter der Trennung von Arbeitsbereich und Wohnbereich (Abbildung 8). Gemäß [AS2013] wird der schwarz markierte Bereich in den Diagrammen bei einem hohen *GAI* ( $80 \leq \text{GAI} \leq 100$ ) und einem hohen *CRI* ( $80 \leq \text{CRI}$ ) besser hinsichtlich Natürlichkeit und Lebhaftigkeit bewertet. Bei den gemessenen Datensätzen des Vorzugslichtes zeigen aber die Beschreibungen der Probanden, dass häufig das eingestellte Licht und die betrachteten Objekte als „natürlich“, „klar“ und „lebhaft“ beschrieben werden, obwohl das Licht deutlich entfernt vom markierten Bereich liegt.

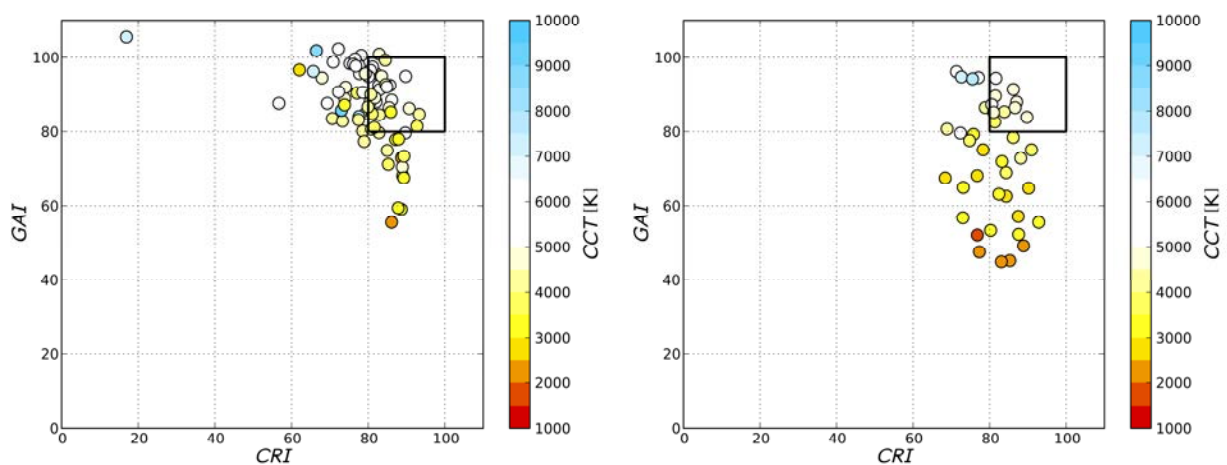


Abbildung 8: *GAI* und *CRI* des Vorzugslichtes, links: Arbeitsbereich, rechts: Wohnbereich

Beim Licht für den Arbeitsbereich werden tendenziell hohe *GAI*-Werte ( $> 80$ ) bevorzugt. Im Wohnbereich liegt eine breitere Streuung beim *GAI* vor. Die Abbildungen zeigen deutlich, dass auch Licht mit *CRI*-Werten unter 80 als angenehm gewertet wird.

## 4 Zusammenfassung

Die gezeigten Ergebnisse stellen den aktuellen Arbeitsstand zur Vorzugslichtstudie dar. Im Rahmen dieser bisher nicht repräsentativen Studie wurde von Probanden aus verschiedenen LED-Lichtquellen ihr Vorzugslicht über Einstellregler zusammengestellt und anhand von realen Objekten in einer Lichtkammer bewertet. Ziel war und ist das Sammeln von Da-

ten, nach denen Licht vom Anwender bewertet wird. Die Fragestellung wurde bewusst offen gewählt, um die Probanden bei ihrer Einstellung des Lichtes nicht zu beeinflussen.

Basierend auf den bisherigen Analysen können folgende Aussagen abgeleitet werden:

- Der *CRI* als einzelner Parameter lässt keine Rückschlüsse auf die Lichtbewertung durch den Nutzer zu. Auch Lichteinstellungen mit *Ra*-Werten unter 80 werden als angenehm empfunden. Der Farbwiedergabeindex ist demnach nicht als alleiniges Bewertungsmerkmal geeignet.
- Die Beschreibung des eingestellten Lichtes durch den Probanden zeigt eine geringe Übereinstimmung mit dem kombinierten Bewertungsparameter *GAI-CRI*.
- Der Variationsbereich für die Farbtemperatur *CCT* bei Licht für den Arbeitsbereich liegt im Mittel zwischen 3000 K und 6000 K. Bei Licht für den Wohnbereich liegen die Werte im Mittel zwischen 2000 K und 5000 K. LED-Leuchten sollten demnach über einen großen Farbtemperaturbereich einstellbar sein.
- Eine Einstellung des Lichtes über sechs Einzelkanäle überfordert einige Nutzer durch die vielen Freiheitsgrade. Das Spektrum komplett frei zusammenstellen und variieren zu können, ist für den normalen Anwender nicht sinnvoll. Farbtemperatur und Beleuchtungsstärke sollten in jedem Fall variierbar sein.

Die Analyse der Daten anhand bisher bekannter Bewertungsparameter ist noch nicht abgeschlossen. Unter Anderem sollen die Kontrastwahrnehmung (*FCI*), die spektrale Gleichmäßigkeit sowie die Ähnlichkeit zu einem thermischen Strahler berechnet und nach einer Korrelation mit den Aussagen der Probanden untersucht werden.

## 5 Weiterführende Arbeiten

Durch weitere Tests mit wissenschaftlich weicher Fragestellung muss die Datenmenge zum Vorzugslicht erhöht werden. Mithilfe einer Clusteranalyse sollen die Messdaten und Probandenaussagen auf Klassifizierungsmerkmale untersucht werden, um mögliche neue Ansätze für die Lichtbewertung und damit die Lichtdimensionierung zu finden. Darauf aufbauend sollen anhand der bestimmten Klassifizierungsmerkmale Lichtarten für verschiedene Anwendungsbereiche vorgeschlagen und durch Probanden bewertet werden.

### Literaturquellen

- [AS2013] Lighting Research Center: Class A Color for White Lighting; The Class A Color Designation for Light Sources; abrufbar unter [www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/colorResearch.asp](http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/colorResearch.asp) (28.5.2013).
- [BI2007] Bieske, K.: "Wahrnehmung von Farbunterschieden von Licht- und Körperfarben", Licht und Lebensqualität 2007, Lüneburg.
- [DE2010] DeSS orientiert 1/10 - Licht und Demenz, Demenz Support Stuttgart, Ausgabe 1/10, ISSN 1863-6136, 2010.



- [LR2013] Islam, M.S.; Dangol, R.; Hyvärinen, M.; Bhusal, P.; Puolakka, M.; Halonen, L.: Investigation of user preferences for LED lighting in terms of light spectrum; Lighting Research and Technology, online, 2013-02-20 DOI: 10.1177/1477153513475913.
- [OO2012] Alexander Wilm, A.: „Innovative Beleuchtung mit LED – Lichtqualitätsmerkmale für hochqualitative LED-Shopbeleuchtung – Akzeptanzstudien“, OSRAM Opto Semiconductors, VDI Wissensforum, 10. VDI-Fachtagung Innovative Beleuchtung mit LED 2012.
- [PH2013] [www.lighting.philips.de/pwc\\_li/de\\_de/connect/tools\\_literature/Broschueren\\_Datenblaetter\\_Leporellos/Assets/Leuchten\\_Broschueren/Anwendungen/licht\\_macht\\_schule\\_0609.pdf](http://www.lighting.philips.de/pwc_li/de_de/connect/tools_literature/Broschueren_Datenblaetter_Leporellos/Assets/Leuchten_Broschueren/Anwendungen/licht_macht_schule_0609.pdf) (28.6.2013).