

## **Rate the Rating: Stufe 2 - Erweiterung der Farbwiedergabeuntersuchungen vom Lichtsimulator zum Testraum**

**Jungnitsch, K., Schierz, Ch.**

Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik, Ilmenau, Deutschland,  
katharina.jungnitsch@tu-ilmenau.de

### **ABSTRACT**

In diesem Beitrag wird eine kurze Zusammenfassung der Forschungsarbeit an der TU Ilmenau zur Diskrepanz der Wahrnehmung der Farbwiedergabe und ihrer objektiven Berechnung dargestellt. Es wird gezeigt, dass Untersuchungen, die mit Hilfe von Farbpatches durchgeführt wurden, sowohl im Bereich der Farbwiedergabebewertung, aber insbesondere auch bei der Bewertung von Präferenz oder Natürlichkeit an Grenzen stößt. Auch der Einfluß der Raumwirkung, der bei der subjektiven Bewertung einer beleuchteten Szenerie nicht zu vernachlässigen ist, kann durch einen Lichtsimulator nur unzureichend demonstriert werden. Daher wurde hier der nächste Schritt in Form von der Entwicklung eines Testraums gegangen, um neben der Raumwirkung auch solche Elemente wie Präferenz, Natürlichkeit oder Harmonie besser bewerten zu können.

Schlagwörter: Farbwiedergabe, Farbqualität, Farbwahrnehmung

### **1 EINLEITUNG**

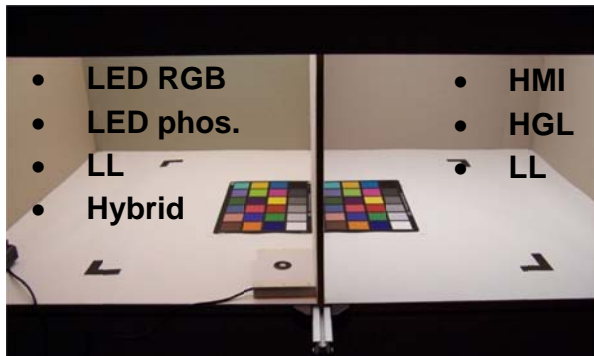
In Anlehnung an die weltweite Diskussion über eine Überarbeitung des aktuell gültigen CIE-Farbwiedergabeindex  $R_a$  [CIE 13.3, 1995] wurden in den letzten Jahren an der TU Ilmenau zahlreiche Untersuchungen von Farbqualitätsmerkmalen von Lichtquellen - mit dem Schwerpunkt der Farbwiedergabebewertung – durchgeführt {[JUNGNITSCH et al., 2005], [LIEDTKE et al., 2007] , [RING et al., 2007], [HOFMANN et al., 2010], [HUPE et al., 2013] und [SÖLLNER et al., 2009]}. Dabei war es das Ziel herauszufinden, in wie weit das objektive Farbqualitätsmerkmal der Farbwiedergabe den subjektiven Beobachtungen entspricht, und wo Diskrepanzen auftreten.

Da neben der Farbwiedergabe andere Farbqualitätsmerkmale wie Harmonie der beleuchteten Farben, Farbunterscheidbarkeit oder Präferenz zur Beurteilung einer Beleuchtungsquelle eine wichtige Rolle spielen, wurden diese Faktoren in die Untersuchung mit aufgenommen. Durch die Untersuchung mehrerer Qualitätsmerkmale sollten eventuell vorhandene Zusammenhänge zwischen den einzelnen Merkmalen herausgearbeitet werden. Da nicht alle Qualitätsmerkmale in einem einzelnen Versuch mit der klassischen Methode der Farbprobenbewertung gleichermaßen gut eingeschätzt werden konnten, wurde eine zweite Versuchsreihe in einem Versuchsraum an realen Objekten konzipiert [KÄSTNER et al., 2013] und bereits teilweise durchgeführt (z.Zt. laufende Masterarbeit Hr. Fiebig).

In diesem Beitrag soll ein Eindruck davon vermittelt werden, wie komplex die Bewertungen von Lichtquellen hinsichtlich ihrer Farbbeleuchtungsqualität sind und wie wichtig die Festlegung der Anforderungen an eine Beleuchtung vor der Lichtplanung ist.

## 2 UNTERSUCHUNGEN VON FARBPATCHES IM LICHTSIMULATOR

### 2.1 VERSUCHSAUFBAU



**Abbildung 1 - Lichtsimulator mit verwendeten Lichtquellen und mit MBCC (GretagMacBeth ColorChecker Chart)<sup>®</sup> in Bewertungsregionen**

Da der Farbwiedergabeindex ein referenz-basierter Index ist, wurde der Versuchsaufbau ebenfalls als Vergleich einer Testlichtquelle mit einer Referenzlichtquelle konzipiert. Die Grundlage für den Aufbau bildeten die Richtlinien zum Testen von Farberscheinungsmodellen nach Fairchild ([FAIRCHILD, 2005]). Die zu vergleichenden Lichtquellen wurden in einem Lichtsimulator installiert, der aus zwei identischen Lichtkammern bestand (siehe Abbildung 1).

In der rechten Lichtkammer wurde die Referenzbeleuchtung gezeigt. Dies waren überwiegend Lichtquellen mit kontinuierlichem

Spektrum (wie auch beim Farbwiedergabeindex). Die linke Lichtkammer wurde durch die Testlichtquellen beleuchtet. Hier wurden einerseits traditionelle Lichtquellen wie Leuchtstofflampen und andererseits neuere Lichtquellen wie LED bewertet. In Analogie zum Farbwiedergabeindex hatten die verglichenen Lichtquellen einen sehr geringen Farbabstand zueinander ( $\Delta u'v' < 0,0054$ ).

Der Proband wurde so vor dem Lichtsimulator positioniert, dass ein Auge die Referenz- und ein Auge die Testkammer gesehen hat. So konnten die unterschiedlichen Beleuchtungssituationen haploskopisch im Simultanvergleich bewertet werden.

Die Versuche wurden für unterschiedliche Farbtemperaturbereiche durchgeführt. Einerseits wurden Lichtspektren mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von circa 3000K bewertet und mit einer Halogenglühlampe verglichen. Diese hat, wie vom CIE-Farbwiedergabeindex für diese Farbtemperaturbereiche gefordert, annähernd die Eigenschaften eines Planckschen Strahlers. Andererseits wurden Spektren mit einer ähnlichsten Farbtemperatur im Bereich zwischen 6000K und 6500K bewertet. Hierfür soll laut CIE-Farbwiedergabeindex ein tageslichtähnliches Spektrum mit der gleichen Farbtemperatur wie das Testspektrum als Referenz herangezogen werden. In den subjektiven Untersuchungen wurde dies zum einen mit einer HMI-Lampe und zum anderen mittels einer Halogenglühlampe mit Tageslichtfilter simuliert (siehe Abbildung 2). Auf der Bewertungsfläche wurde eine mittlere Beleuchtungsstärke von 500 lx realisiert, da dies laut DIN 5035 die vorgeschriebene Beleuchtungsstärke am Büroarbeitsplatz ist.

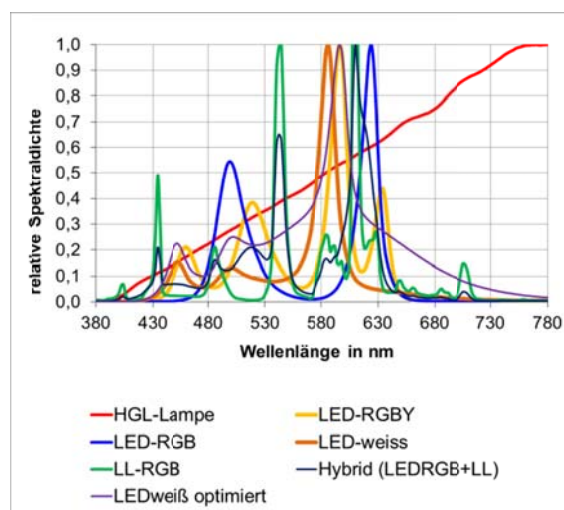
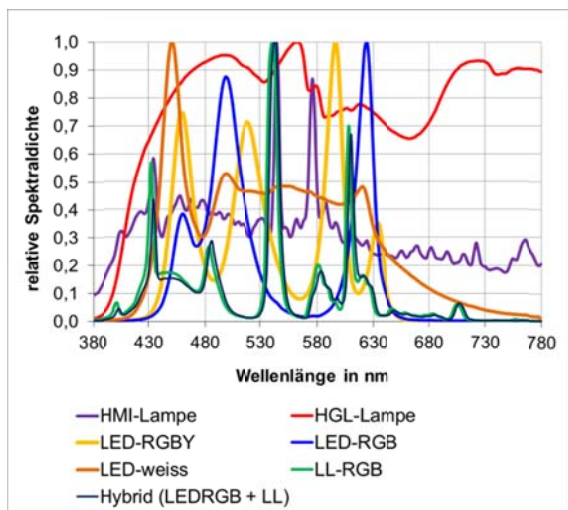
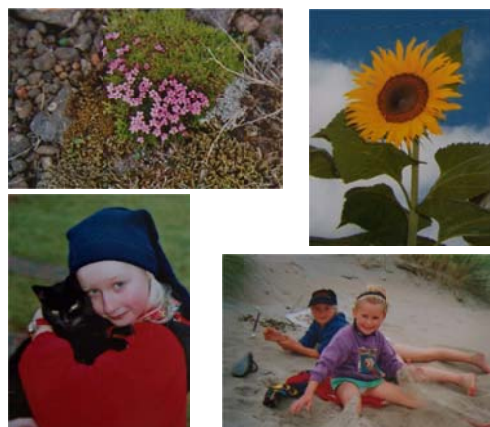


Abbildung 2 - untersuchte Spektren: Links: 6000 K / Rechts: 3000 K

## 2.2 SUBJEKTIVE BEWERTUNG – TESTFARBEN UND FRAGENKATALOG

Für die Bewertung wurden den Probanden 24 verschiedene Farbpatches in 4 verschiedene Farbgruppen (Rot, Gelb, Grün und Blau) gezeigt. In diesen Farbgruppen waren zum einen die CIE-Farben 1-8, 13 und 14 und zum anderen Farben des GretagMacBeth ColorCheckers® vertreten. Um kontextbezogene Bewertungen wie beispielsweise Natürlichkeit oder Präferenz vorzunehmen, wurden den Probanden zusätzlich 4 Farbfotografien gezeigt (siehe Abbildung 3). Diese Bewertungsobjekte wurden zeitgleich sowohl in der Referenz- als auch in der Testsituation gezeigt. Bewertet wurden dann von den Probanden lediglich die Unterschiede zwischen Test und Referenz und keine Absolutwerte.

Zur Bewertung der Farbwiedergabe und zur Bewertung der angesprochenen Farbqualitätsmerkmale wurden die Probanden für jede Testfarbe zu folgenden Parametern befragt:



- Größe des empfundenen Unterschieds
- Objektivität
- Leuchtkraft
- empfundene Temperatur (wärmer / kälter)
- Reinheit
- Kräftigkeit
- Bunttonverschiebung (Größe und Richtung)
- Präferenz und
- Natürlichkeit

Abbildung 3 - Bewertete Farbfotografien

Allerdings ist bei den Befragungen häufig aufgefallen, dass, wie bereits vermutet, die Bewertung von Natürlichkeit und Präferenz anhand von Farbpatches vielen Probanden schwer fiel. Überraschender Weise

änderte sich dieser Umstand auch bei der Bewertung der Farbfotografien nur in geringe Maß, so dass an dieser Stelle deutlich wurde, dass solche Faktoren in der 2-dimensionalen Ebene mit Farbpatches und Fotos schlecht zu bewerten sind.

In einer Faktorenanalyse konnten die Parameter "Leuchtkraft", "Reinheit" und "Kräftigkeit" zu einem neuen Faktor "Sättigung" zusammengefasst werden. Trotz der Bewertungsschwierigkeiten konnte auch zwischen den Parametern "Präferenz" und "Natürlichkeit" eine gute Korrelation ( $r = 0,696$ ) nachgewiesen werden.

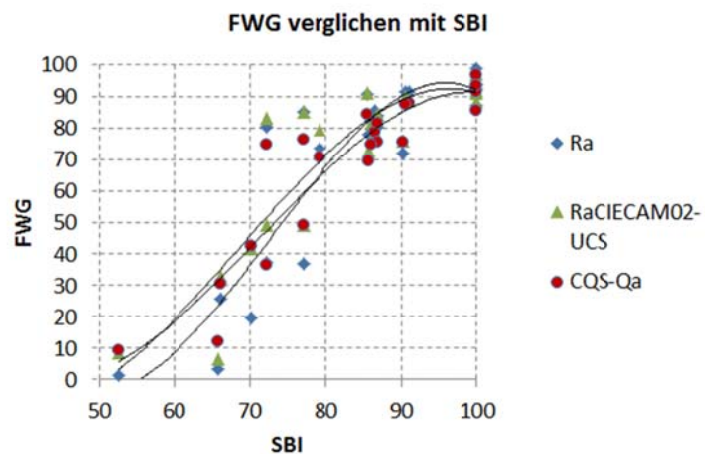
Diese Probandenbewertungen wurden in einem subjektiven Bewertungsindex SBI [JUNGNITSCH et al., 2008] für jede bewertete Lichtsituation zusammengefasst. Der Maximalwert, den der SBI annehmen kann, beträgt 100. Dieser Wert ist gleichbedeutend mit der Aussage, dass zwischen Test- und Referenzspektrum keine wahrnehmbaren Unterschiede bestehen. Je geringer der SBI-Wert wird, umso größer sind die wahrgenommenen Unterschiede.

## 2.3 ERGEBNISSE

Zur Auswertung wurde der SBI mit zahlreichen verschiedenen Indizes verglichen. In diesen Vergleich wurde unter anderem<sup>1</sup> der CIE-Farbwiedergabeindex  $R_a$ , der Vorschlag  $R_{CIECAM02-ucs}$  der in der CIE im TC1-91 als Verbesserung des aktuell gültigen CIE- $R_a$  momentan diskutiert wird und der Präferenzindex  $CQS-Q_a$  nach Korrelationen mit den subjektiven Urteilen für jeden einzelnen Parameter, aber auch des Gesamteindrucks über den SBI überprüft.

**Tabelle 1 - Ergebnisse der Rangfolgenkorrelation zwischen unterschiedlichen Farbwiedergabeindizes und SBI (\*\*höchst signifikantes Ergebnis)**

FWG - Korrelation Spearman	SBI
<i>CIE-CRI</i>	0,772**
<i>CRI<sub>CAM02-UCS</sub></i>	0,715**
<i>CQS-Q<sub>a</sub></i>	0,849**



**Abbildung 4 – unterschiedliche Farbwiedergabeindizes in Abhängigkeit zum SBI**

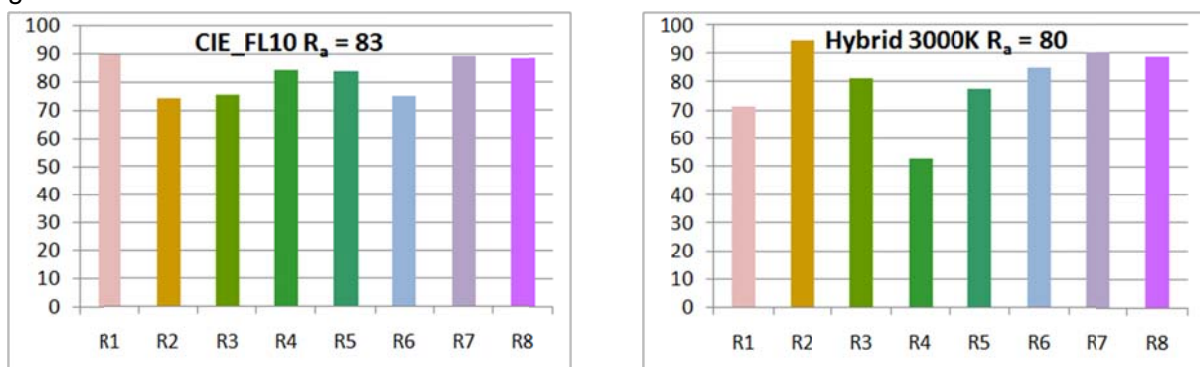
In Tabelle 1 wird deutlich, dass der SBI gut mit den allgemeinen Farbwiedergabeindizes ( $R_a$  und  $R_{CIECAM02-ucs}$ ) und sogar noch etwas besser mit dem Präferenzindex  $Q_a$  korreliert. Im Diagramm der Abbildung 4 wird der Zusammenhang zwischen der subjektiven Bewertung und den objektiven Größen gut veranschaulicht. Hier wird auch deutlich, dass diese gute Korrelation vor allem den Bewertungen von Lichtquellen mit einer Farbwiedergabe schlechter als 70 geschuldet ist.

Bei Farbwiedergabewerten größer 70 liegen die Probandenbewertungen für teilweise sehr unterschiedliche Farbwiedergabewerte sehr dicht zusammen.

<sup>1</sup> Für die Ergebnisse der Korrelationstests mit weiteren Indizes sei auf die laufende Arbeit von Frau Jungnitsch am Fachgebiet für Lichttechnik der TU Ilmenau verwiesen.

Dieser Effekt resultiert zum einen aus der Tatsache, dass bei Lichtquellen mit guter bis sehr guter Farbwiedergabe die bewertbaren Unterschiede für die Probanden sehr gering und kaum mehr wahrnehmbar werden. In empirischen Untersuchungen, bei welchen durch die Probanden nur sehr geringe Unterschiede zu bewerten sind, ist die Gefahr groß, dass eventuell vorhandene Effekte geringer sind, als die Antwortstreuung, und so diese Effekte bei der Mittelwertbildung nicht zum tragen kommen, und dadurch auch keine Unterschiede nachweisbar sind.

Zum anderen erklärt sich dieses Ergebnis aus der Mittelwertbildung, die den objektiven Indizes zugrunde liegen. So kann es vorkommen, dass einzelne Farben mit sehr hohen speziellen Indizes bewertet werden, andere mit sehr viel geringeren – Einzeleffekte können sich herausmitteln. Ein gutes Beispiel ist in Abbildung 5 dargestellt, in welcher zwei Lichtquellen mit annähernd gleichem allgemeinen Farbwiedergabeindex aber mit sehr unterschiedlichen speziellen Indizes gezeigt sind. Dieses Wissen ist in der Lichtplanung von großer Bedeutung. Es ist für das Lichtkonzept wichtig, in wie weit alle Farben gut dargestellt werden sollen, oder ob es wie beispielsweise in der Medizin wichtig ist, einzelne Farben z.B. Rottöne gut wieder zu geben.



**Abbildung 5 - Beispielhafte Darstellung der Bewertung untersuchter Lichtquellen mit ähnlichem CIE-R<sub>a</sub>, aber deutlich unterschiedlichen R<sub>i</sub>**

Zwei Merkmale kristallisierten sich bei der Auswertung als besonders kritisch heraus: die Bewertungsparameter "Natürlichkeit" und "Präferenz" sind für die Probanden in dieser Versuchsanordnung und an dieser Art von Testobjekten nur sehr schwer zu bewerten. Aus diesem Grund wurde eine weitere Versuchsanordnung mit realen Testobjekten entworfen.

### 3 KONZEPTION EINES TESTRAUMS

#### 3.1 AUFBAU UND VERMESSUNG

In diesem Laborraum wurden drei Versuchsszenarien konzipiert, in denen die Farbwiedergabegüte und andere Farbqualitätsmerkmale der eingesetzten Lichtquellen 3-Banden-Leuchtstofflampen (LL) und Phosphor-LED (siehe Abbildung 7) verglichen werden sollten.

Neben dem Einfluß der Raumwirkung auf die subjektive Bewertung der Farbwiedergabe sollten in diesen Versuchen Farbqualitätsmerkmale wie Präferenz, Natürlichkeit und Harmonie an realen Objekten bewertet werden. Der Hauptunterschied zu anderen Tabletop-Untersuchungen bestand darin, dass der Proband selbst Teil der Szenerie wurde – ähnlich wie im Alltag auch – und nicht als bloßer Beobachter einer separierten Szene auftrat.



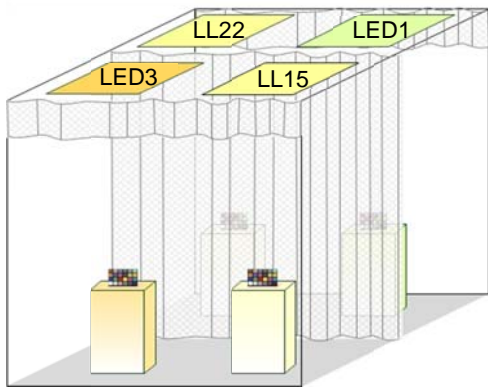


Abbildung 6 - Prinzipskizze des Testraums mit GretagMacBeth ColorChecker®

wie Stabilitätsverlust durch Temperaturschwankungen oder Einbrennzeiten einzelner Lichtquellen entgegen gewirkt werden.

In umfangreichen Messungen [KÄSTNER et al., 2013] wurden so drei Lichtsituationen herausgearbeitet, in welchen die jeweiligen Vergleichsbeleuchtungen sowohl in der räumlichen Lichtverteilung sehr ähnlich zueinander sind, minimale Farbabstände untereinander realisiert wurden und maximal mögliche Farbwiedergabedifferenzen eingestellt wurden (siehe Tabelle 2). Des Weiteren konnte auf den Bewertungsflächen durch die oben angesprochenen Maßnahmen eine sehr homogene Ausleuchtung erzeugt werden ( $\Delta L < 5\%$ ).

Eine besondere Herausforderung bei diesem Versuch war es, trotz eines komplexeren Umfeldes zwischen den Vergleichsszenen vergleichbare Bedingungen sicher zu stellen. Daher wurden alle Lichtquellen in mattweißen Plexiglasabdeckungen aufgehängt, so dass eine Unterscheidung durch den Probanden nicht möglich war. Außerdem wurde der Raum an den Wänden und an der Decke mit weißen Stoffbahnen verkleidet, um einen möglichst hohen diffusen Lichtanteil zu erhalten, und spektrale Änderungen einzelner Lichtquellen durch Einflüsse im Raum zu minimieren. Durch den Trennvorhang in der Mitte war es möglich, immer zwei Lichtquellen direkt miteinander zu vergleichen, ohne Lichtquellen an- oder ausschalten zu müssen. Damit konnten Nachteile

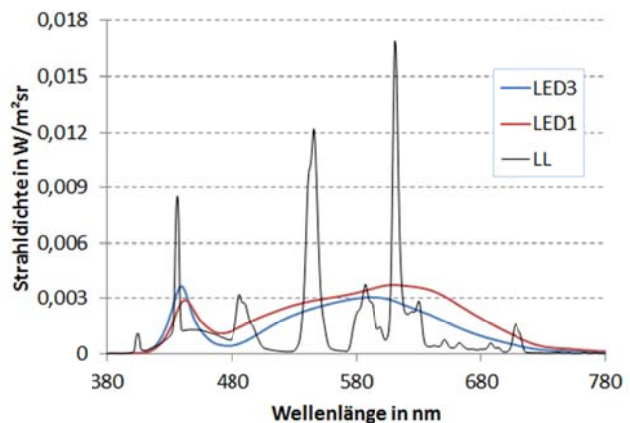


Abbildung 7 - Im Testraum verwendete Spektren

Tabelle 2 - Einstellwerte der untersuchten Lichtszenarien

	Szene 1		Szene 2		Szene 3	
	LED3	LL22	LED1	LL15	LED1	LED3
$u'$	0,2330	0,2341	0,2354	0,2363	0,2352	0,2364
$v'$	0,5017	0,5011	0,5073	0,5063	0,5085	0,5081
$\Delta u'v'$	0,0013		0,0013		0,0013	
$L_v$ in $cd/m^2$	173,5	175,0	214,6	208,2	156,4	154,6
$\Delta L_v$	1,6		6,5		1,9	
CCT in K	3708	3677	3552	3536	3546	3514
$R_a$	76	85	92	85	94	83
$\Delta R_a$	9		7		11	

### 3.2 ENTWICKLUNG EINES VERSUCHSKONZEPTS UND AUSBLICK



**Abbildung 8 - Bewertetes Versuchsszenario**

In einer laufenden Masterarbeit wurde zunächst aus einer Reihe unterschiedlicher möglicher Untersuchungsszenarien wie Büroumfeld, Lebensmittel – oder Textilgeschäft ein Aufbau aus dem Bereich der Lebensmittelpräsentation gewählt, da in diesem Bereich die Erwartungen und das Vorstellungsvermögen der Probanden, wie ein entsprechendes Objekt aussehen sollte, sehr ähnlich sind.

In Abbildung 8 sind die bewerteten Objekte dargestellt. Dieser Aufbau war in allen Beleuchtungsszenen identisch. In der Einzelbewertung wurden eine Coladose, Ketchup, ein Apfel, ein Pfirsich, eine Birne, eine Banane, ungekochte Nudeln, eine Gurke, Taschentücher und eine Salami

beurteilt. Zusätzlich sollte jeder Proband die Farberscheinung seiner Hand unter der jeweiligen Beleuchtung bewerten. Um zu gewährleisten, dass von allen Probanden die zum Teil sehr inhomogenen Objekte an einer ähnlichen Stelle bewertet werden, wurden die Bewertungsbereiche durch den Testleiter markiert. Die Objekte sollten ähnlich wie in der vorangegangenen Untersuchung hinsichtlich Änderungen in der "Helligkeit", "Sättigung", "Bunton", "Natürlichkeit" und "Präferenz" bewertet werden. Um zu überprüfen in wie weit Änderungen der Harmonie zu einer anderen Bewertung der Farbwiedergabe beitragen, kam als neues Element die Bewertung der Farbharmonie verschiedener Objekte untereinander hinzu. Hierfür wurden die Wirkung der in Abbildung 8 sichtbaren Farbproben grün und blau, die Schokoladentafeln und die Kombination des Apfels mit der Birne bewertet.

Zum Zeitpunkt dieser Veröffentlichung waren die Probandenversuche weitestgehend abgeschlossen. Eine umfangreiche Auswertung der gewonnenen Daten und deren Interpretation stehen allerdings noch aus.

Diese Untersuchung ist lediglich eine Art Vorversuch. Änderungen in der Auswahl der Objekte und in den Beleuchtungsspektren hinsichtlich ihrer Art, ihrer ähnlichsten Farbtemperatur und der Beleuchtungsstärke können weitere wichtige Erkenntnisse im Bereich der Farbwiedergabeuntersuchungen liefern. Auch die aktuell laufende Forschung zu Änderungen der Normspektralwertkurven (siehe [POLSTER et al., 2013]) sollte in zukünftigen Untersuchungen Eingang finden, da durch ihre Anwendung einige Unstimmigkeiten zwischen subjektivem Empfinden und objektiver Kennzahl in signifikantem Maß reduziert werden. Hierzu werden bereits einige theoretische Betrachtungen parallel zu den vorgestellten Untersuchungen vorgenommen.

#### QUELLEN

[CIE 13.3, 1995] CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) "*Method of measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources*", Vienna: CIE Central –Bureau, CIE Publ. 13.3, 1995

[FAIRCHILD, 2005] M.D. Fairchild, "*Color Appearance Models*", 2. Aufl., Chichester, West Sussex, John Wiley & Sons Ltd, 2005

[HOFMANN et al., 2010] F. Hofmann, K. Jungnitsch, K. Bieske, Ch. Schierz, "*Untersuchungen zur Bewertung der Farbwiedergabeeigenschaften von LED*", Projektarbeit, TU Ilmenau, 2010

- [HUPE et al., 2013] Ch. Hupe, K. Jungnitsch, K. Bieske, Ch. Schierz, "*Einfluss von Umgebungsbedingungen und Beobachtungsart auf die subjektive Bewertung von Farbwiedergabeeigenschaften*", Studienarbeit, TU Ilmenau, 2013
- [JUNGNITSCH et al., 2005] K. Jungnitsch, C. Vandahl, D. Gall, H. Krömker, "*Subjektive Bewertung der Farbwiedergabeeigenschaften von Lampen mit unterschiedlichen Spektren*", Diplomarbeit, TU Ilmenau, 2005
- [JUNGNITSCH et al., 2008] K. Jungnitsch, C. Vandahl, K. Bieske, "*Subjektive Untersuchungen zur Farbwiedergabe in Abhängigkeit vom Lampenspektrum*", LICHT 2008, Ilmenau, pp. 289-296, 2008
- [KÄSTNER et al., 2013] R. Kästner, A. Schelle, K. Jungnitsch, K. Bieske, Ch. Schierz, "*Konzeption und Aufbau eines Versuchsraums zur subjektiven Untersuchung von Farbwiedergabeeigenschaften unterschiedlicher Lichtquellen*", Projektarbeit, TU Ilmenau, 2013
- [LIEDTKE et al., 2007] C. Liedtke, M. Schuster, K. Bieske, C. Vandahl, "*Untersuchungen zur Farbwiedergabe in Abhängigkeit vom Farbwiedergabeindex und dem Beleuchtungsniveau*", Projektarbeit, TU Ilmenau, 2007
- [POLSTER et al., 2013] S. Polster, K. Bieske, "*Neue spektrale Empfindlichkeitsfunktionen zur Erfassung visueller Farbgleichheit bei LED-Spektren*", Lux junior 2013, Ilmenau, pp. 76-77, 2013
- [RING et al., 2007] S. Ring, C. Vandahl, D. Gall, "*Subjektive Bewertung der Farbwiedergabeeigenschaften von Lampen mit unterschiedlichen Spektren*", Diplomarbeit, TU Ilmenau, 2007
- [SÖLLNER et al., 2009] St. Söllner, K. Jungnitsch, K. Bieske, Ch. Schierz, H. Krömker, "*Untersuchungen zur spektralen Strahlungsverteilung für die Erzielung einer hohen Farbwiedergabegüte mit LEDs*", Diplomarbeit, TU Ilmenau, 2009

## Danksagung

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



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung