Untersuchung der Farbwiedergabe weißer LEDs nach TM-30-15 und CIE-Ra

Horst, C., Wilm, A.; OSRAM Opto Semiconductors GmbH;
Hartwig, U.; Bieske, K.; Schierz, Ch., Technische Universität Ilmenau (Deutschland)

Zusammenfassung

Es wurde eine Untersuchung zu den Farbwiedergabeeigenschaften von LED-Lichtquellen mit weißen leuchtstoffkonvertierten LEDs durchgeführt. Auf Basis des Vorschlags IES TM-30-15 wurden 21 Spektralverteilungen mit einem Fidelity-Index R_f (Farbtreue-Index) zwischen 66 und 97 und einem Gamut-Index R_g zwischen 92 und 114 untersucht. 34 Testpersonen bewerteten neben den LED-Lichtquellen auch eine Leuchtstofflampe und eine Halogenglühlampe mit gleicher ähnlichster Farbtemperatur von 3800 K bei gleichem Beleuchtungsniveau. Eine identische Auswahl farbiger Objekte wurde in einer Versuchskabine mit zwei nebeneinanderliegenden Kammern in gleicher Weise dargeboten und bezüglich Farbqualität, Farbunterschieden, Gefallen und Natürlichkeit für jede Lichtquelle im Vergleich zu einer Referenz (Halogenglühlampe) mit einem Fragebogen bewertet. Die Beurteilung der Farbqualität wird sowohl durch den Fidelity-Index als auch durch den Gamut-Index bestimmt. Während der Fidelity-Index stark mit dem Farbunterschied und der beobachteten Farbverschiebung im Vergleich zur Referenz korreliert, bildet der Gamut-Index die Sättigung gut ab. Die beste Übereinstimmung in den Bewertungen mit der Leuchtstofflampe (R_f = 80 & R_g = 100) wurde mit den LED-Typen R_f = 80 & R_g = 105 und R_f = 75 & R_g = 105 erzielt.

1 Einleitung und Forschungsgegenstand

Heute kommen immer mehr LEDs in der Innenraumbeleuchtung zum Einsatz. Während in den ersten Jahren weißes Licht mit Kombinationen farbiger LEDs (RGB-LEDs) erzeugt wurde, werden heute verstärkt leuchtstoffkonvertierte LEDs (pc LEDs) genutzt. Die Emission blauer LEDs wird mit Leuchtstoffen in langwellige Spektralbereiche konvertiert und mit einem Strahlungsanteil der blauen LEDs zu weißem Licht gemischt. Die Leuchtstoffe sind typischerweise eine Mischung unterschiedlicher Leuchtstofftypen. Dadurch ist eine Anpassung der Spektralverteilung der LEDs möglich und es können deren Farbwiedergabeeigenschaften optimiert werden. Die korrekte Beschreibung der Farbwiedergabeeigenschaften ist Voraussetzung dafür, dass Ziele für die Weiterentwicklung korrekt

definiert werden können. Standard für die Berechnung des Farbwiedergabeindex CIE R_a ist die CIE Empfehlung CIE 13.3 aus dem Jahr 1995 [1]. Bei der Berechnung des Farbwiedergabeindex wurden in der Vergangenheit immer wieder Diskrepanzen zur visuellen Bewertung beobachtet, die vor allem im Zusammenhang mit LED-Beleuchtung auftraten [2]. Seit Jahren wird nach Verbesserungsmöglichkeiten gesucht. Zum einen wird die Berechnungsmethode auf Basis neuer Erkenntnisse in der Farbmetrik verbessert, zum anderen wird die spektrale Verteilung der Lichtquellen, z.B. über die Leuchtstofftypenwahl, optimiert, da sie die Farbqualität maßgeblich bestimmt. Mit der Veröffentlichung des TM30-15 seitens der IES (Illuminating Engineering Society of North Amerika) wurde eine neue Berechnungsmethode für die Farbwiedergabebewertung weißer Lichtquellen vorgeschlagen [3]. Sie kombiniert die Bewertung der Farbtreue mit dem R_f-Index mit einem Gamut-Index R_g als Maß für die Größe der aufgespannten Fläche von Testfarben in der Farbtafel. THORNTON geht davon aus, dass ein größerer Farbgamut eine bessere Farbunterscheidung ermöglicht, da die zu unterscheidenden Farbörter im Farbraum weiter auseinanderliegen [4]. Zum anderen wird angenommen, dass Lichtquellen mit einem größeren Gamut Farben gesättigter, brillanter und natürlicher erscheinen lassen [5]. XU geht davon aus, dass die Größe der eingeschlossenen Fläche proportionale zur maximal möglichen Anzahl der darstellbaren Farben ist. [6]. Da schmalbandige Spektralverteilungen, wie z.B. RGB-LEDs, durchaus einen großen Farbgamut haben können, jedoch die Farbwiedergabe nicht aller Farben gut ist, ist die Kombination des Gamut-Index mit einem Index, der die Farbtreue eines Spektrums bewertet, sinnvoll [7].

Der TM-30-15 ist wie der CIE R_a eine referenzbasierte Methode, bei der eine Testlichtquelle mit einer Referenzlichtquelle mit gleicher ähnlichster Farbtemperatur verglichen wird. Der Farbtreueindex R_f beschreibt die mittlere Farbverschiebung von 99 Testfarben (CES) und ist ein Maß für die Farbgleichheit in Bezug auf die Referenz. Sein Wertebereich liegt zwischen 0 und 100. Der Gamutindex R_g vergleicht die Flächen zwischen Test- und Referenzbeleuchtung, die von den Farbkoordinaten von 16 Bunttongruppen, abgeleitet von den 99 Testfarben, aufgespannt wird und beschreibt die mittlere Sättigung der Testfarben. Eine neutrale Bewertung hat den Wert 100, Werte > 100 zeigen eine Erhöhung der Sättigung an, während Werte < 100 eine Abnahme der Sättigung bedeuten. Der Wertebereich des Gamutindex R_g vergrößert sich, wenn die Farbtreueindex R_f kleiner wird [3].

In einer ersten Studie untersucht ROYER in einem Testraum mit farbigen Objekten LED-Beleuchtung, die aus farbigen Spektren weißes Licht mit unterschiedlichen R_f- und R_g-Werten erzeugt. Er kommt zu dem Schluss, dass Probanden LED-Lichtquellen mit R_f > 75 und

einem Gamutindex $R_g \geq 100$ bevorzugen [8]. Dies ist in einer Untersuchung für leuchtstoffkonvertierte LEDs zu überprüfen.

2 Forschungshypothese

Für weiße pc LEDs lassen sich die Forderungen von ROYER erfüllen. Die R_f- und R_g-Werte des TM-30-15 zeigen eine hohe Korrelation zur subjektiven Bewertung der Farbwiedergabeeigenschaften durch Probanden. Es ist zu prüfen, ob mit pc LEDs bei identischen CIE R_a-Werten eine bessere subjektive Bewertung als für Leuchtstofflampen erzielt werden kann.

3 Versuchsaufbau und Methodik

Für die Untersuchung wurde eine Lichtbox mit zwei benachbarten Kammern verwendet (Abbildung 1).

Abbildung 1: Versuchsaufbau mit Beleuchtungseinheiten und Testobjekten

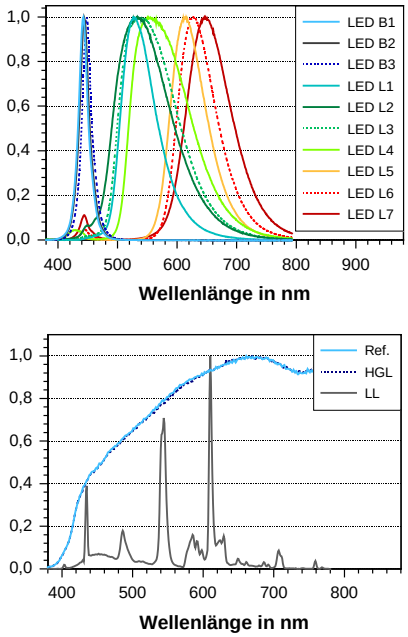

Abbildung 2: Relative Spektralverteilungen der Lampentypen

In einer Kammer wurden als Lichtquellen Halogenglühlampen (HGL: SoLux), Leuchtstofflampen (LL: OSRAM Sylvania, mit CIE $R_a = R_f = 80$ und $R_g = 100$), drei Typen blaue LEDs (LED B) und 7 Typen vollkonvertierter LEDs mit verschiedenen grünen und roten Leuchtstoffen (LED L) hinter einer Streuscheibe verbaut. Die Kombination verschiedener LEDs ermöglichte die Erzeugung von unterschiedlichen Spektralverteilungen, identisch zu denen weißer pc LEDs mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von CCT = 3800 K. 21 LED-Kombinationen mit R_f-Werten zwischen 66 bis 94 und R_g-Werten von 92 bis 114 wurden neben der Leuchtstofflampe und der Halogenglühlampe im Vergleich zu einer Referenz unter-

sucht. Als Referenz diente eine Halogenglühlampe (Ref.: Solux, $R_f = R_g = 100$) mit gleicher ähnlichster Farbtemperatur und gleichem Beleuchtungsniveau (E = 400 lx) in der zweiten Kammer, damit wird dem referenzbasierten Ansatz des Farbwiedergabeindex gefolgt. Die relativen Spektralverteilungen sind in Abbildung 2 gezeigt. Die Farbwiedergabewerte der untersuchten LED-Spektren CIE R_a sind annähernd identisch zu den R_f - Werten und unterscheiden sich im Mittel um 1 bis maximal 4 Bewertungseinheiten (Abbildung 3, links). Eine Auswahl identischer farbiger Objekte wurde in gleicher Weise in beide Kammern angeordnet. Die Auswahl wurde so vorgenommen, dass jeweils ein großer Bereich an Bunttönen, Buntheit und Helligkeit abgedeckt wurde. Die Farbkoordinaten für die Testobjekte sind in Abbildung 3, rechts gezeigt. Es wurden Objekte des täglichen Lebens gewählt: unter anderem Pflanzen, Nahrungsmittel, Verbrauchsgüter, Büro- und Druckartikel sowie eine Farbtafel (ColorChecker).

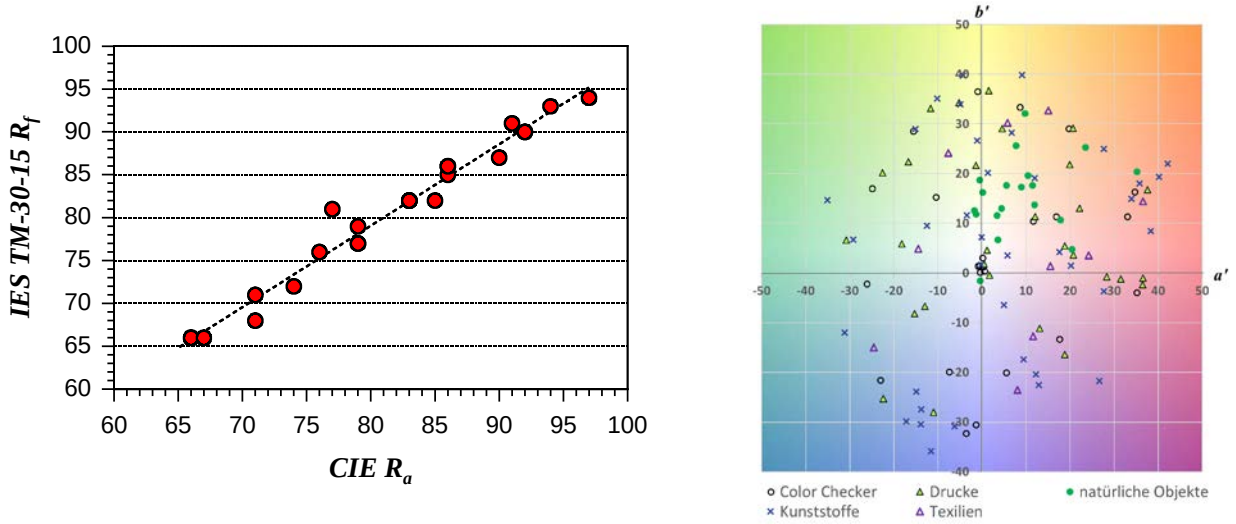

Abbildung 3: Korrelation zwischen den R_a- und R_f-Werten, R^2 = 0,98 (links), Farbkoordinaten der Testobjekte im CIECAM02-UCS bei Beleuchtung mit einem Planckschen Strahler bei 3800 K (rechts)

Spektralverteilungen ausgewählter LED-Kombinationen und die R_f - R_g - Paare der Versuchsszenen sind in Abbildung 4 dargestellt.

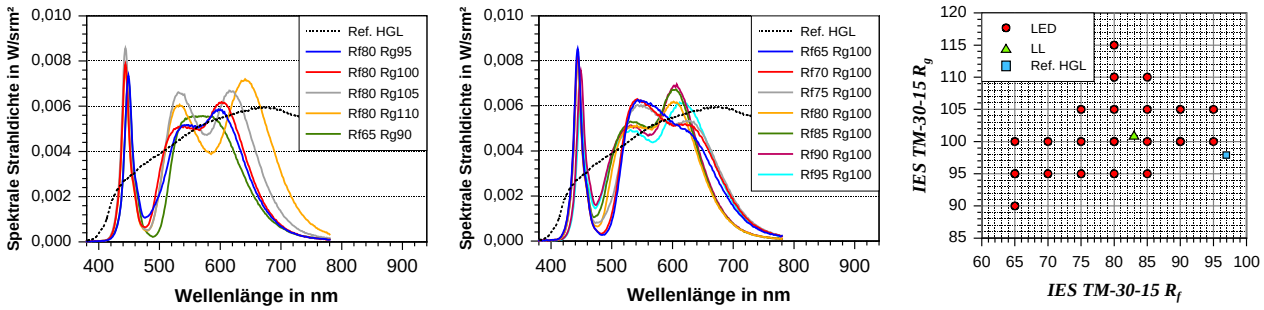

Abbildung 4: Spektren für ausgewählte Versuchsszenen (links und Mitte), für die Untersuchungen ausgewählte R_f - R_g - Paarungen der LED-Kombinationen (rechts)

34 Probanden im Alter zwischen 23 und 48 Jahren (∅ 35 ± 7 Jahre), darunter 10 Frauen, nahmen an der Untersuchung teil. Sie bewerteten die Farbwiedergabeeigenschaften gleichzeitig in beiden Versuchskammern mit Hilfe eines Fragebogens. Bewertet wurden die Unterschiede der Objektfarben im Vergleich zu denen unter der Referenzbeleuchtung nach den Kriterien: Farbunterschied, Sättigung, Helligkeit, Temperatur, Farbunterschied, Gefallen und Natürlichkeit. Zusätzlich wurden erfragt, welche Objektfarben der Vorstellung solcher Objekte entsprechen und wie die allgemeine Farbqualität der Objekte bewertet wird. Der Fragebogen ist in Abbildung 5 gezeigt. Die Darbietung der Versuchsszenen erfolgte randomisiert. Vier Versuchsszenen wurden wiederholt getestet. Für die Auswertung wurden Mittelwerte und Konfidenzintervalle (KI 95%) für die Antworten der Testpersonen berechnet und für die Versuchsparameter R_a, R_f und R_g ausgewertet. Ermittelt wurden Bestimmtheitsmaße R^2 für die lineare Regression über den Probandenurteilen. Für einen Vergleich zwischen LED-Lichtquellen und der Leuchtstofflampe wurden eine Varianzanalyse und Post-Hoc-Tests durchgeführt.

Nehmen Sie einen Farbunterschied zwischen den rechten und den linken Objekten wahr, wenn ja wie stark?					
Farbunterschied (*FU*)	1 = nein	2 = wenig	3 = mittelmäßig	4 = ziemlich	5 = sehr
Wie wirken die Farben der linken Objekte, im Vergleich zur rechten Seite?					
Sättigung (*S*)	1 = sehr gesättigt	2 = etwas gesättigt	3 = kein Unterschied	4 = etwas ungesättigt	5 = sehr ungesättigt
Helligkeit (*H*)	1 = sehr hell	2 = etwas heller	3 = kein Unterschied	4 = etwas dunkler	5 = sehr dunkel
Temperatur (*T*)	1 = sehr warm	2 = etwas wärmer	3 = kein Unterschied	4 = etwas kälter	5 = sehr kalt
Nehmen Sie einen Farbstich/ eine Farbverschiebung in den Farben der linken Objekte im Vergleich zur rechten Seite wahr, wenn ja wie stark?					
Farbverschiebung (*FV*)	1 = nein	2 = wenig	3 = kein Unterschied	4 = ziemlich	5 = sehr
Wie empfinden Sie die Farben der linken Objekte im Vergleich zur rechten Seite?					
Gefallen (*G*)	1 = gefällt sehr gut	2 = gefällt vetwas besser	3 = kein Unterschied	4 = gefällt etwas weniger	5 = gefällt sehr schlecht
Natürlichkeit (*NK*)	1 = wirkt sehr natürlich	2 = wirkt etwas natürlich	3 = kein Unterschied	4 = wirkt etwas unnatürlicher	5 = wirkt sehr unnatürlich
Welche Seite entspricht mehr Ihren Vorstellungen von der Farben der Objekte?					
Vorstellung (*V*)	1 = links	2 = rechts	3 = beide	4 = keine	
Unabhängig von der rechten Seite, wie empfinden Sie die Farbqualität der Objekte in der linken Box?					
Farbqualität (*FQ*)	1 = außerordentlich gut	2 = gut	3 = mittelmäßig	4 = schlecht	5 = außerordentlich schlecht

Abbildung 5: Items des Fragebogens

4 Ergebnisse

Die Auswertung des Fragebogens ist zusammengefasst in Diagrammen in Abbildung 6 gezeigt. Dargestellt sind Mittelwerte und Konfidenzinterwalle über alle Probanden (N = 34). Aus den Diagrammen und den Bestimmtheitsmaßen der linearen Regression R^2 in Abbildung 6 und Tabelle 1 wird deutlich, dass die Bewertung der subjektiven Farbqualität einer Beleuchtung ein mehrdimensionales Problem ist und beide Indizes R_f und R_g dabei wichtige Aspekte sind. Während der R_f - Wert gut Farbunterschiede, die Farbverschiebung und die Empfindung einer wärmeren oder kälteren Farbwirkung im Vergleich zur Referenz-

lichtquelle beschreibt, gibt der R_g-Wert die Bewertung der Sättigung explizit wieder. Ob eine Beleuchtungssituation gefällt, hängt stark davon ab, wie gesättigt Farben erscheinen. Für die Bewertung der Natürlichkeit einer Beleuchtungssituation sind beide Indizes wichtig. Bei pc LEDs gefallen die Farben bei konstantem R_f-Wert mit steigendem R_g-Wert besser und wirken gesättigter. Mit steigendem R_f-Wert steigt auch die subjektive Farbwiedergabebewertung. Der Fidelity-Index R_f korreliert sehr stark mit dem CIE R_a-Wert, sodass die Aussagen für beide Indizes in gleicher Weise gelten.

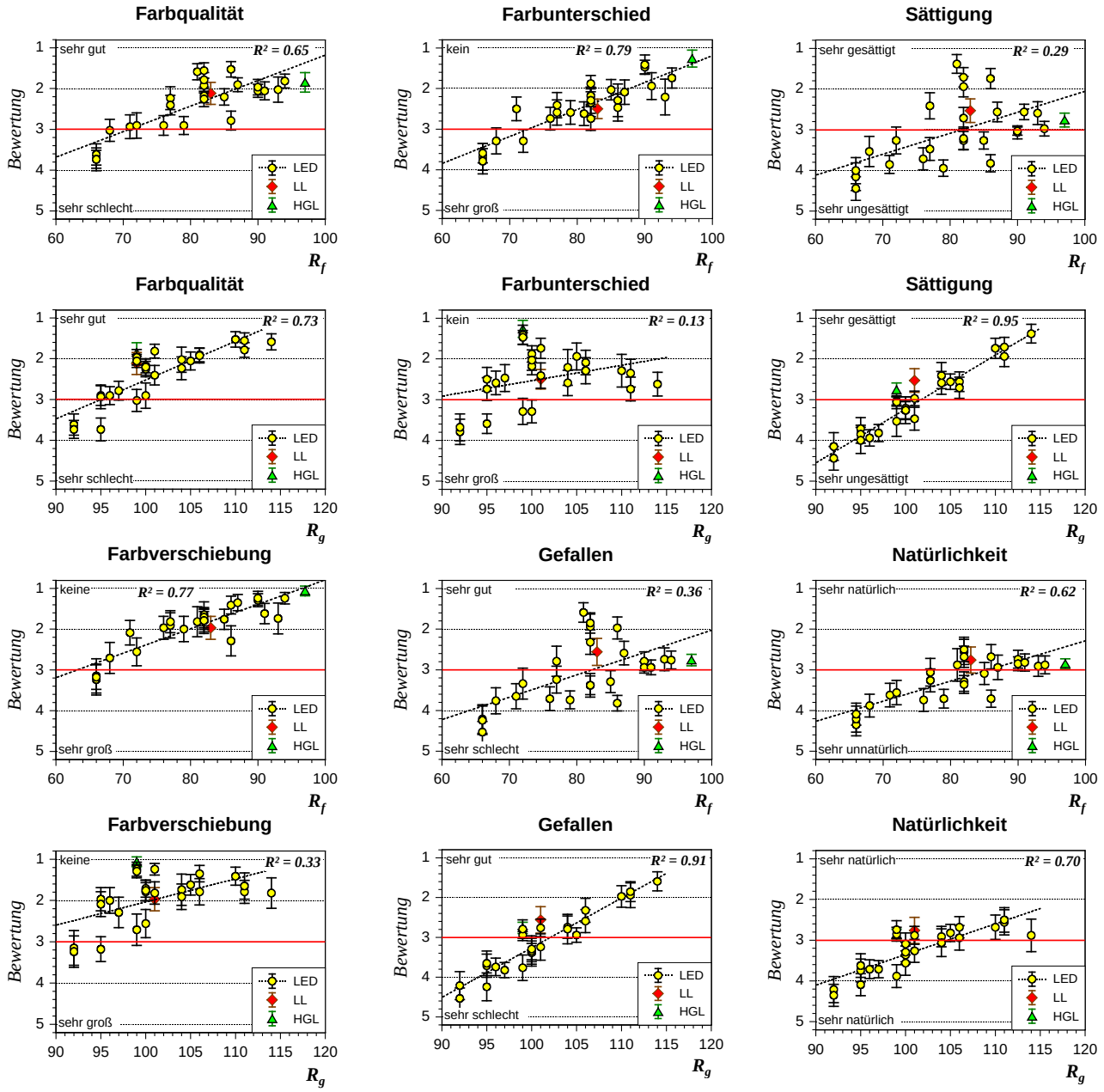

Abbildung 6: Subjektive Bewertungen (Mittelwert und Konfidenzintervalle (KI 95%) für $R_f = R_a$ und R_g. Für die Bewertungen der LED-Versuchsszenen wurde die lineare Regression bestimmt, das Bestimmtheitsmaß R^2 ist dafür angegeben.

Tabelle 1: Bestimmtheitsmaße der linearen Regression R^2

Item	R^2 zu R_a	R^2 zu R_f	R^2 zu R_g	R^2 zu Item FQ
Farbqualität FQ	0,62	0,65	0,73	1,00
Farbunterschied FU	0,80	0,79	0,13	0,58
Sättigung S	0,25	0,29	0,95	0,77
Farbverschiebung FV	0,77	0,77	0,33	0,79
Helligkeit H	0,01	0,01	0,41	0,17
Temperatur T	0,55	0,63	0,06	0,52
Gefallen G	0,32	0,36	0,91	0,85
Natürlichkeit NK	0,61	0,62	0,70	0,92

Die Ergebnisse zur Frage nach der Vorstellung der Farbe von Objekten in Bezug auf die gesehenen Objektfarben unter der Test- und Referenzbeleuchtung sind in Abbildung 7 dargestellt.

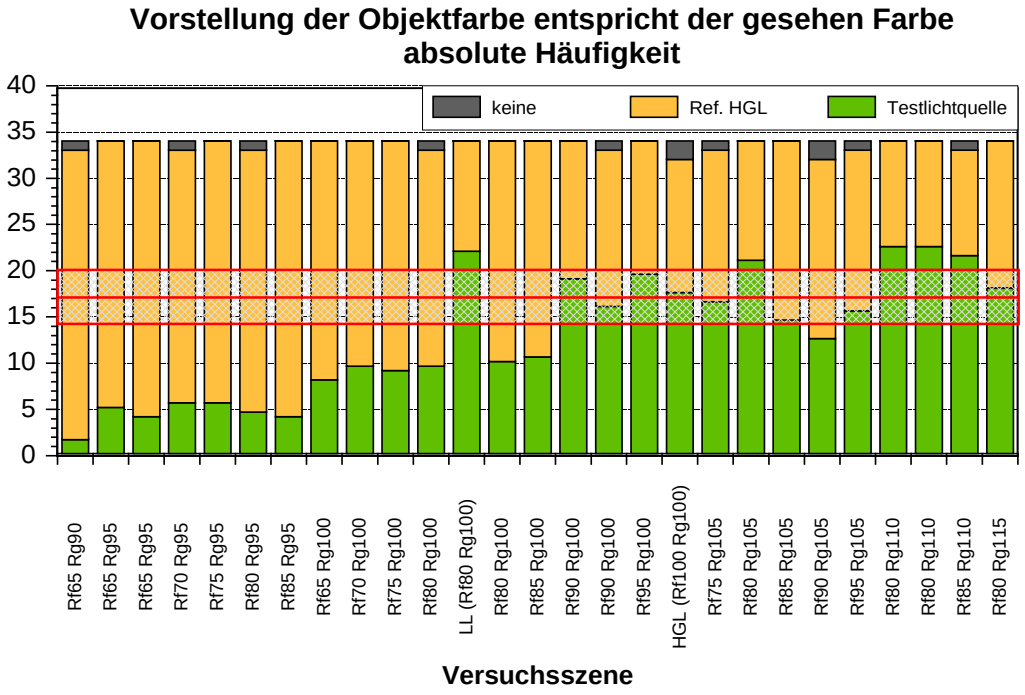

Abbildung 7: Absolute Häufigkeiten der Nennung, dass Objektfarben unter der Testlichtsituation der Vorstellung der Farben solcher Objekte entsprechen, für die einzelnen Versuchsszenen

Im Diagramm ist die absolute Häufigkeit der Nennungen, ob die Objektfarben der Vorstellung solcher Farben entsprechen, gezeigt. Diese wurden von den Probanden jeweils einer Beleuchtungssituation in einer der Versuchskammern (Test oder Referenz), beiden Beleuchtungssituationen oder keiner zugeschrieben. Für eine übersichtlichere Darstellung wurde die Nennung „beide“ je zur Hälfte der Nennung Test und Referenz dazu gefügt. Das Diagramm verdeutlicht, dass für die getesteten LED-Lichtquellen mit $R_f < 90$ und $R_g \leq 100$ die Objektfarben bei Referenzbeleuchtung besser den Vorstellungen der Probanden entsprechen. LED-Lichtquellen mit $R_f \geq 80$ und mit $R_g = 110$ werden besser als die

Referenzbeleuchtung bewertet. Im Vergleich zur Referenz wird die untersuchte Leuchtstofflampe (R_f = 80 & R_g = 100) deutlich bevorzugt und erreicht eine bessere Beurteilung als die LED-Beleuchtung mit gleichen R_f- und R_g-Werten (Abbildung 8).

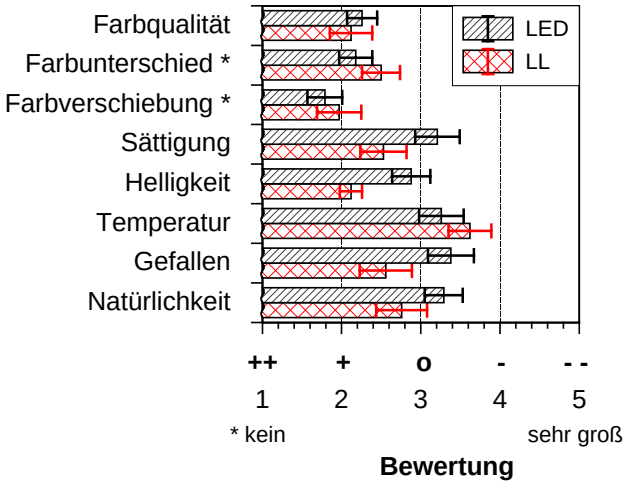

Abbildung 8: Vergleich der Befragungsergebnisse für LED (R_f = 80 & R_g = 100) und LL (R_f = 80 & R_g = 100), Mittelwert und Konfidenzintervall, N = 34

Der weitere Vergleich der Bewertungen zwischen LED-Typen und Leuchtstofflampe (R_f 80 & R_g 100) ist in Tabelle 2 zusammengefasst. Angegeben sind Irrtumswahrscheinlichkeiten p. Bei gleichen R_f- und R_g-Werten wurde die allgemeine Farbqualität identisch bewertet, jedoch erscheinen die Objektfarben unter LED-Beleuchtung weniger gesättigt und weniger natürlich und gefallen den Probanden weniger gut als bei Beleuchtung mit der Leuchtstofflampe. Kein signifikanter Unterschied in den Bewertungen zeigte sich für die LED-Typen R_f = 75 & R_g = 105 und R_f = 80 & R_g = 105 im Vergleich zur Leuchtstofflampe. Dies legt die Vermutung nahe, dass geringe Unterschiede im R_f-Wert durch eine leichten Anstieg in der Sättigung ausgeglichen werden können.

Tabelle 2: Zusammenfassung Vergleich LED vs. Leuchtstofflampe, p-Werte, signifikante Unterschiede für ein Signifikanzniveau von α = 0,05 sind kursiv dargestellt.

R_g	95			100					105		
Item/ R_f	75	80	85	75	80	85	90	95	75	80	85
Farbqualität FQ	*0,000*	*0,000*	*0,000*	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Farbunterschied FU	1,000	1,000	1,000	1,000	0,082	0,277	*0,000*	*0,000*	1,000	1,000	0,622
Farbverschiebung FV	1,000	1,000	0,910	1,000	1,000	1,000	*0,000*	*0,002*	1,000	1,000	*0,030*
Sättigung S	*0,000*	*0,000*	*0,000*	*0,000*	*0,000*	*0,002*	*0,037*	0,303	1,000	1,000	1,000
Gefallen G	*0,000*	*0,000*	*0,000*	*0,026*	*0,000*	*0,009*	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Natürlichkeit NK	*0,000*	*0,000*	*0,000*	0,185	*0,036*	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Interpretation	*LL signifikant besser*			*LED signifikant besser*				kein signifikanter Unterschied			

5 Zusammenfassung

Nur allein auf der Basis des R_f - Wertes lässt sich das Gefallen von Objektfarben vergleichbar zur Referenz nicht beschreiben. Grundsätzlich wird mit diesem Index, genau wie mit dem CIE R_a, nur die Verschiedenheit der Farbe in Bezug zur Farberscheinung beim jeweiligen Referenzspektrum beschrieben. Das Optimierungskriterium ist in diesem Falle immer das Spektrum der Referenz. Eine Aussage darüber, ob Farben besser oder schlechter gefallen, wird nicht getroffen. Die Einbeziehung der Gamut-Index für die Bewertung ist sinnvoll.

Ein Farbtreue-Index von $R_f \geq 80$ und ein Gamut-Index von $R_g \geq 100$ erscheinen aufgrund der Untersuchungsergebnisse als sinnvolle Vorgabewerte. Die natürliche Wirkung von Objektfarben zeigen eine Korrelation sowohl zum R_f - als auch zum R_g -Wert. Vergleichbar oder besser wurden Beleuchtungssituationen mit $R_f \geq 80$ und $R_g \geq 100$ bewertet. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von ROYER [8]. Wegen der hohen Korrelation zwischen R_a- und R_f- Wert (vergleiche Abbildung 3, linkes Diagramm) gelten die Aussagen der Versuchsergebnisse für den Index R_f in gleicher Weise für den CIE R_a - Index.

Danksagung

Die Untersuchung erfolgte in Zusammenarbeit mit OSRAM Opto Semiconductors GmbH in Regensburg. Ohne diese Unterstützung wäre der Versuchsaufbau nicht realisierbar gewesen. Die Untersuchung selbst erfolgte im Rahmen der Masterarbeit von HARTWIG [9].

Literatur

[1] CIE Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources, CIE 13.3, 1995.

[2] N. Narendran, L. Deng, “Color Rendering Properties of LED Light Sources”, Proceedings of SPIE Vol. 4776, pp. 61-67, 2002.

[3] Illuminating Engineering Society of North Amerika, „IES Method for Evaluating Light Source Color Rendition“, IES TM-30-15, 2015.

[4] W. A. Thornton, “Color-discrimination index”, J Opt Soc Am., Vol. 62 No. 2, pp. 191-194, 1972

[5] M. S. Rea, L. Deng, R. Wolsey, "Light Sources and Color", NLPIP Lighting Answers (Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY), vol. 8, no. 1, October 2004.

[6] H. Xu, „Color-rendering capacity of illumination”, J Opt Soc Am. 1983 Dec; 73(12):1709-13.

[7] LiTG (Hrg.): P. Bodrogi, K. Jungnitsch, „Farbqualität: Definition und Anwendungen“, 2015

[8] M. P. Royer, A. Wilkerson, M. Wei, K. Houser, R. Davis, “Human perceptions of colour rendition vary with average fidelity, average gamut, and gamut shape”, Lighting Res. Technol. 2016; 0: 1-26

[9] U. Hartwig, „TM-30-15, Analyse und Probandenstudie“, Masterarbeit TU Ilmenau, 2017