Dipl.-Ing. Katharina Jungnitsch; Dipl.-Ing. Karin Bieske; Dr.-Ing. Cornelia Vandahl
Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik
karin.bieske@tu-ilmenau.de

Subjektive Untersuchungen zur Farbwiedergabe in Abhängigkeit vom Lampenspektrum

1. Einführung

In modernen Wohn- und Arbeitsplatzgestaltungen gewinnt die dynamische Lichtfarbenregelung zunehmend an Bedeutung. Für diese Zwecke werden oft farbige LEDs eingestetzt. Untersuchungen von Schierz [1] haben jedoch gezeigt, dass bei einigen diskontinuierlich-spektralen Lampen durch die bisherige Kennzeichnung mittels CIE–Farbwiedergabeindex [2] die Qualität der wahrgenommenen Farbwiedergabe nur unzulänglich beschrieben werden kann. Erste Hinweise gab es mit den Arbeiten von Narendran [3], Tarczali [4] und Sandor [5], die Untersuchungen mit LEDs durchführten und Widersprüche zwischen Messzahl und subjektiver Bewertung beschrieben haben.

Mögliche Ursachen hierfür liegen darin, dass der allgemeine CIE-Farbwiedergabeindex R_a lediglich durch die Betrachtung des Lampenspektrums berechnet wurde, ohne subjektive Präferenzen bei der Objektbetrachtung zu berücksichtigen. So können Situationen entstehen, in denen sich die Bewertung der Farbwiedergabe einer Lichtquelle durch den CIE-Farbwiedergabeindex sehr verschieden zur subjektiven Bewertung des Betrachters erweist. Ein Beispiel aus der Literatur stellte die RGB-LED dar, die zwar subjektiv gut bewertet wurde, jedoch nur einen sehr niedrigen CIE-Index erhielt.

Ziel der folgenden Untersuchungen war es, den Einfluss des Lampenspektrums auf die subjektive Bewertung der Farbwiedergabe zu bestimmen. Dazu bewerteten Probanden in Form einer Befragung verschiedene Farbproben, die von unterschiedlichen Lichtquellen beleuchtet wurden.

2. Versuchsaufbau

Die subjektive Bewertung erfolgte durch den Simultanvergleich zweier Lichtquellen. Dabei war eine Lichtquelle in Anlehnung an den CIE-Farbwiedergabeindex die Referenzquelle und eine weiter Lichtquelle wurde im Vergleich zur Referenzquelle bewertet. Daraus resultierte ein Versuchsaufbau in Anlehnung an die Richtlinien zum Testen von Farberscheinungsmodellen nach Fairchild [6]. Es wurden zwei identisch aufgebaute, nebeneinander liegenden Versuchskammern mit einer Grundfläche von 80 x 65 cm² und einer Höhe von 80 cm eingerichtet. Um eine homogene Ausleuchtung der Lichtboxen zu gewährleisten, wurden die Wände mit grauer Kartonage und die Arbeitsfläche mit weißem Karton mit einem nahezu aselektiven Reflexionsverhalten ausgekleidet. In diesen Boxen wurden unterschiedliche Lichtquellen installiert, die verschiedene zu bewertende Körperfarben beleuchteten. Die Lichtquellen wurden dabei durch eine Blende so abgeschirmt, dass die Probanden nicht direkt in die Lampen sehen konnten. In Abbildung 1 wird der Versuchsaufbau und die Position der zu bewertenden Farbproben dargestellt.

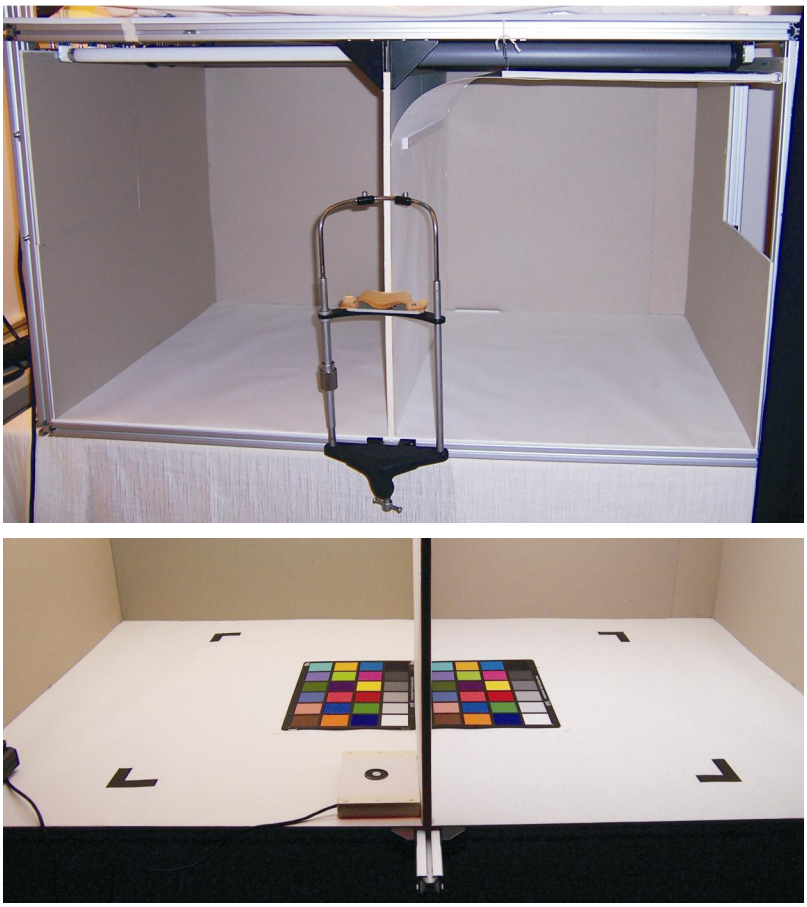
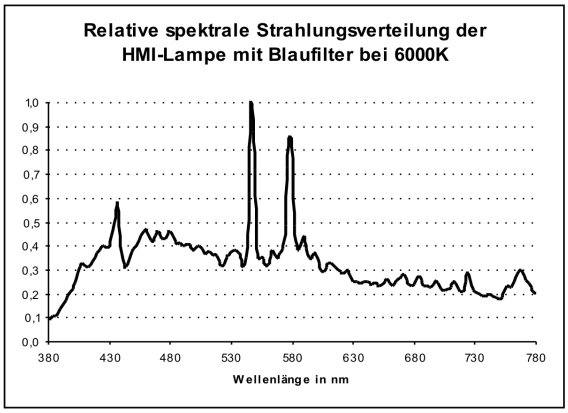
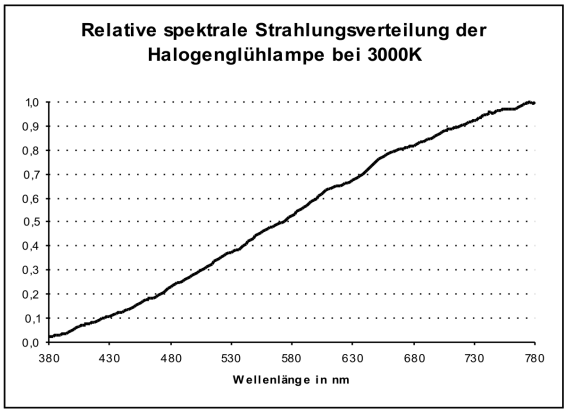
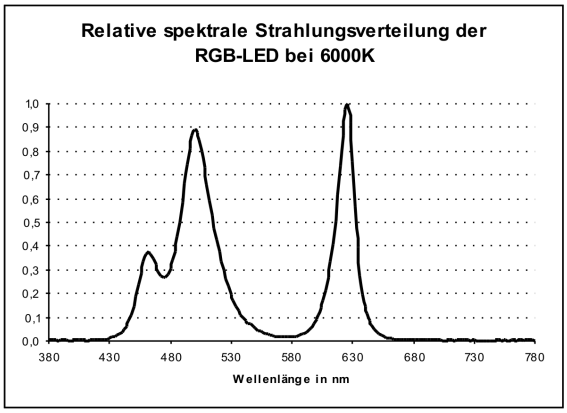
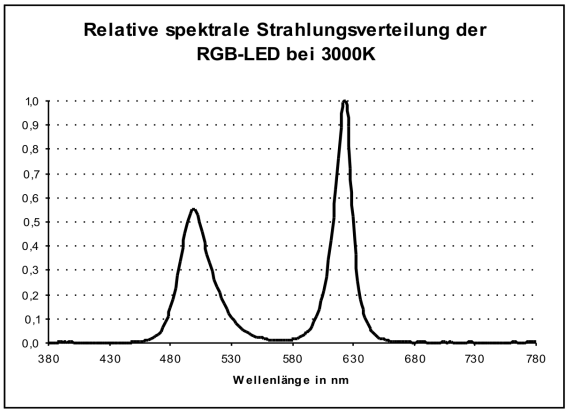


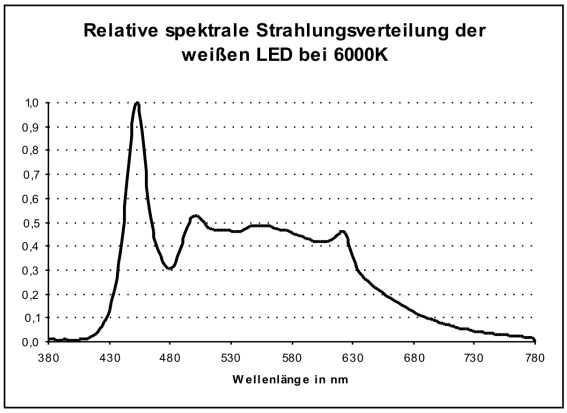
Abbildung 1: Blick in die Versuchskammern und Position der Testfarben

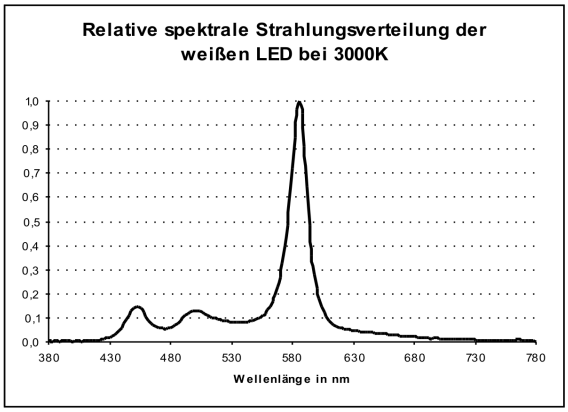


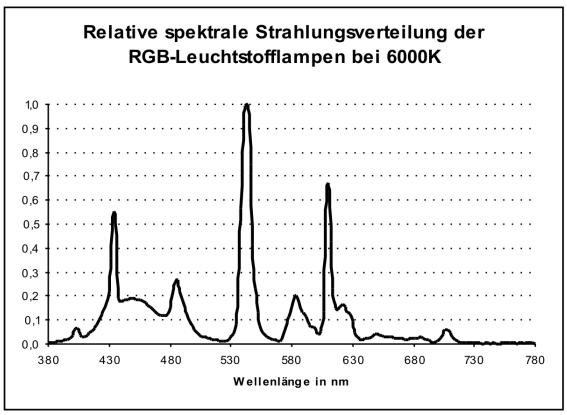












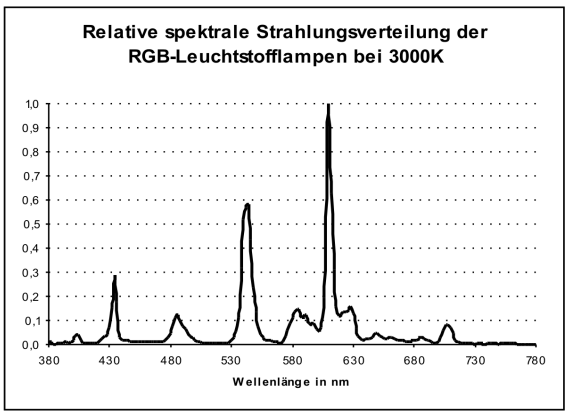


Abbildung 2: Relative spektrale Strahlungsverteilungen der bewerteten Lichtquellen

In die Untersuchungen wurden Lichtquellen mit sehr unterschiedliche Spektren einbezogen, zum einen die kontinuierlichen Spektren von Halogenglühlampe und einer spektral angepassten HMI-Lampe (nahe D65) und zum anderen die diskontinuierlichen Spektren von verschiedenen Leuchtstofflampen und LEDs. Die Spektren der verwendeten Lichtquellen sind in Abbildung 2 dargestellt. Ähnlich wie beim CIE-Farbwiedergabeindex wurden die Lampen mit kontinuierlichen Spektren als Referenzquellen eingesetzt.

Untersucht wurde in einem ersten Schritt der Vergleich von verschiedenen Lichtquellen bei einer ähnlichsten Farbtemperatur von 6000 K bei einer Beleuchtungsstärke von 500 lx. Als Referenzquelle diente dabei die HMI-Lampe. Im zweiten Schritt wurden diese Untersuchungen bei 3000 K und 500lx im Vergleich zu einer Halogenglühlampe durchgeführt. Um zum CIE-Farbwiedergabeindex vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wurde darauf geachtet, dass sowohl ähnlichste Farbtemperatur als auch Beleuchtungsstärke zwischen Test- und Referenzquelle möglichst ähnlich zueinander sind. So wurden die Spektren der Leuchtstofflampen und der LEDs mithilfe einer DALI-Steuerung entsprechend der Vorgaben der jeweiligen Referenzlichtquelle angepasst. Insgesamt ergaben sich bei dieser Untersuchung neun zu bewertende Vergleichssituationen von denen sechs in diesen Ausführungen betrachtet werden.

3. Bewertung der Farbwiedergabe

Die Farbwiedergabebewertung der Lampen wurde von 20 Probanden (darunter 6 Frauen) im Alter von 14 bis 60 Jahren durchgeführt. Hierbei wurden die Probanden so vor den Lichtboxen positioniert, dass jedes Auge jeweils eine Box sehen konnte, so dass die Bewertung haploskopisch im Simultanvergleich erfolgte. Mittels einer Kopfstütze wurde diese Kopfposition fixiert (Abbildung 1 oben). Die Lampenbewertung erfolgte anhand von 28 repräsentativen Körperfarben (Abbildung 3) und zusätzlich 4 Farbfotografien, in denen der Schwerpunkt auf der Bewertung von Haut- und Pflanzenfarben lag.

Abbildung 3: CIE-Farbäquivalente von Baumann links; GretagMacBeth ColorChecker rechts

Die Farbproben wurden zum einen aus den CIE-Farben 01 – 08, 13 und 14 erstellt und durch eine Auswahl des MacBeth ColorCheckers ergänzt. Für diese Untersuchungen wurden die CIE-Farben durch äquivalente Farbproben aus dem Baumann-Katalog ersetzt. Um für die Bewertung störende Effekte wie z.B. Simultankontrast auszuschließen wurden die Farbproben in Gruppen (Rot, Gelb, Grün, Blau und Unbunt) unterteilt und so den Probanden gezeigt. Hierfür wurden Schablonen (wie in Abbildung 4 dargestellt) angefertigt, die aus dem selben Material bestanden wie die Arbeitsfläche der Lichtsimulatoren. Die Farbproben hatten eine Größe von 3 x 3 cm, was für die Entfernung vom Probanden zur Arbeitsfläche einem 2°-Sehwinkel entspricht. Die Zuordnung der Farben zu den genannten Farbgruppen ist in Tabelle 1 dargestellt.

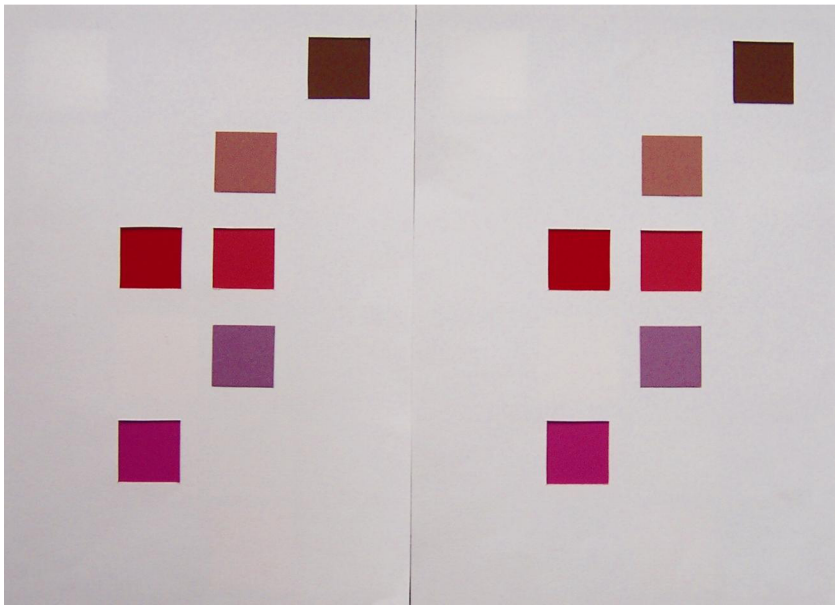


Abbildung 4: Beispiel für eine Bewertungsschablone (Gruppe: Rot)

Rot	**Gelb**	**Grün**	**Blau**	**Unbunt**
Hautfarbe dunkel	Orange	Erdfarbe (CIE)	Blau	Weiß
Altrosa (CIE)	Hautfarbe (CIE)	Grün	Hellblau (CIE)	Grau6.5
Rot	Gelb	Blattgrün (CIE)	Blaulila	Grau5
Hellrot	Gelborange	Grün (CIE)	Lila	Schwarz
Hellpurpur (CIE)		Gelbgrün (CIE)	Hellviolett (CIE)	
Magenta		Gelbgrün	Cyan	
		Blaugrün	Türkisblau (CIE)	

Tabelle 1: Gruppenzuordnung der ausgewählten Farbproben

Nehmen Sie einen Unterschied zwischen der rechten und der linken Farbprobe wahr?

ja: O nein: O

Die linke Farbprobe ist im Vergleich zur rechten:

	1 (deutlich)	**2 (etwas)**	**3 (kein Unterschied)**	**4 (etwas)**	**5 (deutlich)**	
heller						dunkler
grauer						leuchtender
wärmer						kälter
kräftiger						blasser
trüber						reiner

Liegt eine Farbverschiebung vor?

ja O nein O

Wenn ja, in welche Richtung?

Rot Gelb Grün Blau

Empfinden:

	1 (deutlich)	**2 (etwas)**	**3 (kein Unterschied)**	**4 (etwas)**	**5 (deutlich)**	
gefällt besser						gefällt schlechter
wirkt natürlicher						unnatürlicher

Welche Farbprobe entspricht Ihrer Vorstellung von dieser Farbe:

Rechts O Links O

Keine O Beide O

Abbildung 5: Fragenkatalog zum Farbenvergleich

Die Zusammenstellung des Fragenkatalogs (Abbildung 5) orientierte sich am Wesen des CIE-Farbwiedergabeindexes und an anderen ausgewählten Farbwiedergabeindizes und Farberscheinungsmodellen. Daraus resultierten die Fragen nach der Änderung in Helligkeit, Leuchtkraft, Reinheit, Kräftigkeit, Buntton, Gefallen und Natürlichkeit einer Farbe im Bezug auf die jeweilige Farberscheinung unter der Referenzquelle.

4. Auswertung

Nach einer Faktorenanalyse wurden die abgefragten Parameter zu Helligkeit, Sättigung, Buntton und Empfindung zusammengefasst. Um eine Vergleichbarkeit der subjektiven Bewertung zu den Farbwiedergabeindizes zu erzielen, wurde für jede Lichtquelle ein subjektiver Bewertungsindex (SBI) nach folgendem Algorithmus definiert:

$X_{m,j}$ Median der Variable für das Merkmal m und die Lichtquelle j

$X_{m,\,ideal} = 3$ Median der Variable für das Merkmal m und die Vergleichslichtquelle ideal (3 entspricht der Wahrnehmung keines Unterschiedes)

$$\Delta\left|X_{m,j}\right| = \left|X_{m,\,j} - X_{m,\,ideal}\right|$$

$$SBI\left(X_{m,j}\right) = 100 - 100\,\frac{\sum\left(\Delta\left|X_{m,\,j}\right|\right)}{\sum\left(\Delta\left|X_{m,\,max}\right|\right)}$$

individueller SBI der Einzelmerkmale m und der Lichtquelle j

$$SBI\left(X_{j}\right) = 100 - 100\,\frac{\sum\left(\Delta\left|X_{j}\right|\right)}{\sum\left(\Delta\left|X_{max}\right|\right)}$$

allgemeiner SBI der betrachteten Lichtquelle j

Existieren keine Unterschiede zwischen der bewerteten Testlichtquelle und der Referenzlichtquelle, so nimmt der SBI-Index den Wert SBI = 100 an. Lichtarten, die davon abweichen, müssen nicht automatisch schlechter bewertet worden sein, sondern geben die Körperfarben lediglich anders als die Referenzquelle wieder.

5. Ergebnisse

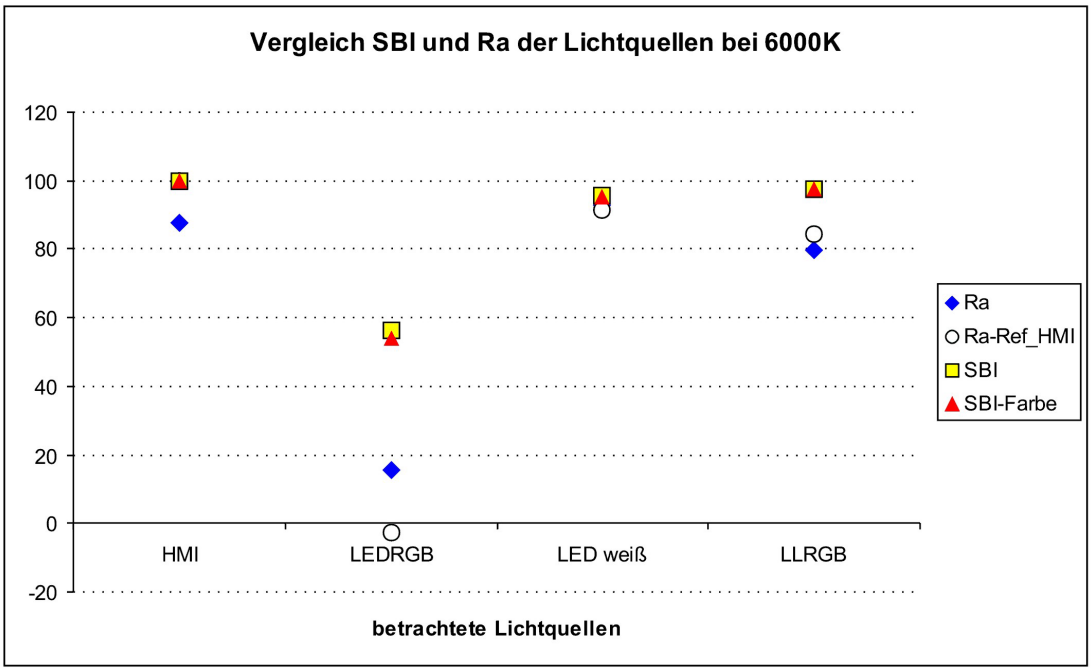
In den Diagrammen in Abbildung 6 werden die subjektiven Bewertungsindizes der jeweiligen Lichtquelle mit den entsprechenden CIE-Farbwiedergabeindex verglichen.

Hier werden der CIE-Farbwiedergabeindex mit der klassischen Berechnungsmethode nach der CIE13.2 und mit den Referenzleuchten HMI- und Halogenglühlampe als Bezugslichtarten mit zwei Varianten des SBI verglichen. Dabei gehen in der ersten Variante alle dargestellten Körperfarben einschließlich der zu bewertenden Farbfotografien in den Index ein. In der zweiten Variante werden nur die Farbproben ohne die unbunten Farbproben und ohne die Farbfotos bewertet. In Tabelle 2 sind die Einzelwerte die Diagramme zusammengefasst.

Wie anhand der Ergebnisse deutlich zu sehen ist, schneiden sowohl bei 3000K als auch bei 6000K Lichtquellen mit ausschließlich schmalbandigen Spektralverteilungen (vor allem RGB-LEDs) in der subjektiven Bewertung wesentlich besser ab als in der Bewertung durch den CIE-Farbwiedergabeindex. Lichtquellen mit einem kontinuierlichem Anteil im Spektrum wie Leuchtstofflampen und weiße LEDs unterscheiden sich in der subjektiven Bewertung hingegen kaum von der CIE-Bewertung.

Lichtquelle	**CIE-R_a**	**CIE-R_a***	**SBI(x_j)**	**SBI(x_j)-Farben**
HMI	88	100	100	100
LL-RGB-6000K	80	84	97	97
LED-weiß-6000K	93	91	96	95
LED-RGB-6000K	16	-2,7	56	54
HGL	99	100	100	100
LL-RGB-3000K	86	86	96	94
LED-weiß-3000K	37	37	74	70
LED-RGB-3000K	1,7	4,0	72	66

Tabelle 2: Vergleich zwischen R_a und SBI (* → das Spektrum der jeweiligen Referenzquelle (HMI bzw. HGL) wird auch für den CIE-R_a eingesetzt)



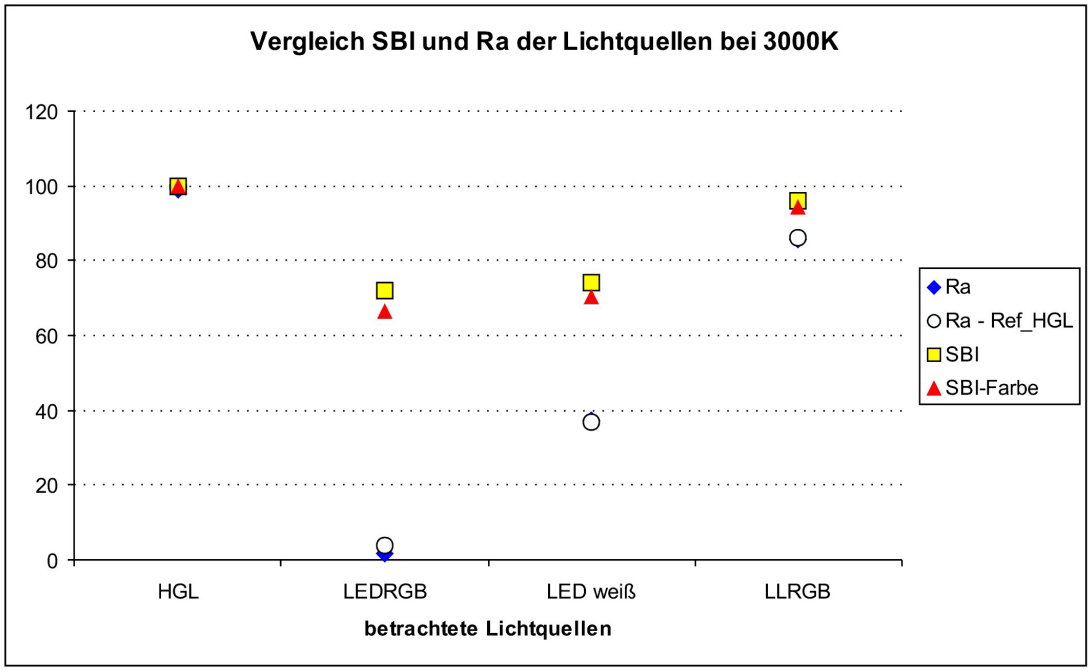


Abbildung 6: Ergebnisdiagramme; oben für eine ähnlichste Farbtemperatur von 6000K und unten für eine ähnlichste Farbtemperatur von 3000K (20 Probanden)

Legende:

Ra: *Berechnung nach dem CIE-Farbwiedergabeindex*

Ra-Ref_HMI / Ra-Ref_HGL: *Berechnung nach CIE mit Referenzquellen (HMI bzw. HGL) als Bezugslichtarten*

SBI: *subjektiver Bewertungsindex unter Einbeziehung aller Bewertungen (Farben, Fotos, Unbuntproben)*

SBI-Farbe: *subjektiver Bewertungsindex nur auf die Farben bezogen (Ausschluss von Fotos, Unbuntproben)*

6. Zusammenfassung

Für Lichtquellen mit ausschließlich schmalbandigen Spektralverteilungen, wie beispielsweise LEDs, zeigen sich deutlich Diskrepanzen zwischen dem bisherigen Bewertungsmaßstab für die Farbwiedergabe nach CIE und der subjektiven Farbwahrnehmung. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit der Überarbeitung des CIE-Farbwiedergabeindexes für diesen Problembereich. Dies kann beispielsweise durch die Einbeziehung subjektiver Bewertungskriterien oder eine entsprechende Gewichtung des R_a geschehen. Ansätze hierfür werden derzeit in unseren aktuellen Forschungsarbeiten untersucht.

7. Literaturverzeichnis:

[1] Schierz, Ch.: Wirkung von Linienspektren auf die Akkomodation des Auges. Dissertation ETH Zürich, 1993

[2] CIE Publication No.13.2, 1988: Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources

[3] Narendran, N.; Deng, L.: Color Rendering Properties of LED Light Sources. Proceedings of SPIE Vol. 4776 (2002), S. 61ff

[4] Tarczali, T. et all: Colour Rendering Properties of LED Sources. 2. LED-Symposium, 2001

[5] Sandor, N. et all: Direct visual assessment of colour rendering

[6] Fairchild, M. D.: Testing clour appearance models: Guidelines for coordinated research. CIE – Collection in colour and vision; CIE 118 – 1995