

Subjektive Untersuchungen zur Farbwiedergabe in Abhängigkeit vom Lampenspektrum

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

1 Einführung

In unserem alltäglichen Umfeld werden klassische Beleuchtungsmittel wie Glühlampe oder Leuchtstofflampe zunehmend von modernen Leuchtmitteln wie beispielsweise LEDs ergänzt oder sogar ersetzt. Diese modernen Beleuchtungsquellen versprechen vor allem Vorteile in Energieeffizienz und architektonischen und farbdynamischen Gestaltungsmöglichkeiten. Vor allem an Arbeitsplätzen, aber auch in vielen anderen Bereichen ist jedoch ebenfalls eine gute Farbwiedergabe der Beleuchtung notwendig. Bei der Bewertung der Farbwiedergabe moderner Lichtquellen traten jedoch Unstimmigkeiten zwischen der CIE-Bewertung und subjektiven Eindrücken auf.

Bei Untersuchungen von Schierz /1/ wurde deutlich, dass vor allem 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 wird, 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.

Aus diesen Vorgaben heraus wurde der CIE-Farbwiedergabeindex zum Ausgangspunkt zahlreicher subjektiver Untersuchungen, in denen sowohl die Beleuchtungsspektren als auch die Beleuchtungsstärke variiert wurden. Diese subjektiven Untersuchungen dienen als Grundlage zum Vergleich mit dem CIE-Farbwiedergabeindex und zahlreichen anderen Indizes, um den Einfluss des Lampenspektrums auf die subjektive Bewertung der Farbwiedergabe zu bestimmen (/6/, /7/, /8/). Auf der Basis dieser Untersuchungen werden nun Möglichkeiten zur Verbesserung oder Erweiterung des CIE-Farbwiedergabeindex geprüft.

2 Subjektive Untersuchung

2.1 Versuchsaufbau

Für die subjektive Untersuchung wurden sowohl Lampen mit kontinuierlichem Spektrum wie Halogenleuchtstofflampe oder HMI-Lampe (nahe D65) als auch Lampen mit diskontinuierlichem Spektrum wie Leuchtstofflampen oder RGB-LEDs verwendet. Den Probanden wurden Vergleichssituationen mit Variationen in Lichtfarbe (zwischen 3000K und 6000K) und Beleuchtungsstärke (zwischen 250lx und 1250lx) präsentiert. Dabei dienten die Beleuchtungsquellen mit einem kontinuierlichem Spektrum in Anlehnung an den CIE-Farbwiedergabeindex als Referenzquellen. In Tabelle 1 sind die entsprechenden Untersuchungssituationen dargestellt.

CCT in K	E in lx	Referenzleuchte	Testleuchte
6000	500	HMI	LED RGB
		HMI	LED weiß
		HMI	LL RGB
3000	500	HGL	LED RGB
		HGL	LED weiß
		HGL	LL RGB
6000	250	LL weiß 960	LL weiß 860
	1250	LL weiß 960	LL weiß 860
3000	250	LL weiß 930	LL weiß 830
	1250	LL weiß 930	LL weiß 830
6000	500	HGL + Rösslerfilter	Hybridlampe
3000	500	HGL	Hybridlampe

Tab. 1: Gegenüberstellung der Parameter der untersuchten Lichtsituationen

Die subjektive Bewertung erfolgte durch den Simultanvergleich zweier Lichtquellen, also dem direkten Vergleich von Referenzquelle und Testlichtquelle. Der Versuchsaufbau wurde in Anlehnung an die Richtlinien zum Testen von Farberscheinungsmodellen nach Fairchild /9/ entworfen. Es wurden zwei identisch aufgebaute, nebeneinander liegende 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 der rechten Lichtbox wurden die Referenzquellen installiert, während in der linken Box die zu vergleichenden Lichtquellen angebracht wurden. 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. Durch eine Kinnstütze konnte hierbei gewährleistet werden, dass alle Probanden einen ähnlichen Blickwinkel auf die zu bewertenden Proben hatten. Hierbei wurden die Probanden so vor den Lichtboxen positioniert, dass jedes Auge jeweils eine Box sehen konnte, so dass die Bewertung wie bereits erwähnt haploskopisch im Simultanvergleich erfolgte.

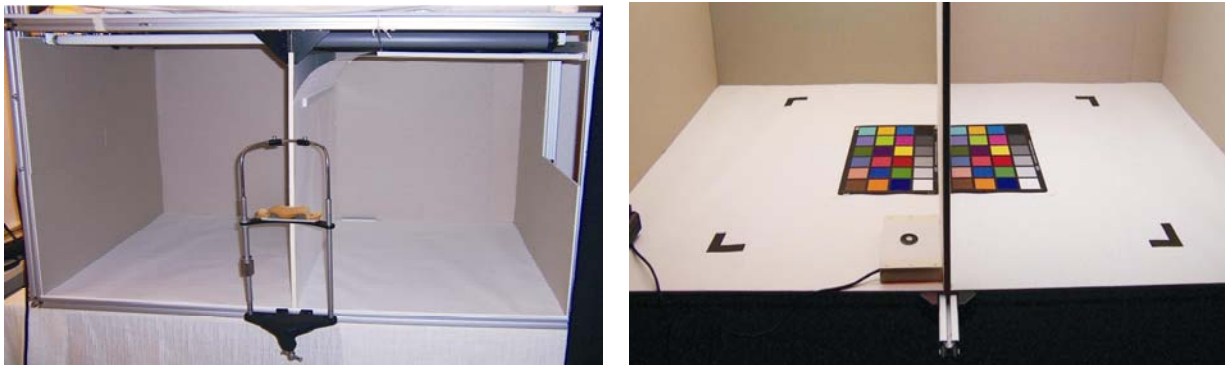


Abb. 1: Blick in die Versuchskammern und Position der Testfarben

Die Lampenbewertung erfolgte anhand von 28 repräsentativen Körperfarben (Abbildung 2) und zusätzlich 4 Farbfotografien, in denen der Schwerpunkt auf der Bewertung von Haut- und Pflanzenfarben lag. 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. den 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 2 dargestellt) angefertigt, die aus dem selben Material bestanden wie die Arbeitsfläche der Lichtsimulatoren. Die Farbproben haben eine Größe von 3 cm x 3 cm, was für die Entfernung vom Probanden zur Arbeitsfläche einem 2°-Sehwinkel entspricht.



Abb. 2: CIE-Farbäquivalente von Baumann und GretagMacBeth ColorChecker links; Beispiel für Bewertungsschablone (Gruppe: Rot) rechts

Die subjektive Bewertung wurde in jedem Versuchsdurchlauf durch ungefähr 20 Probanden durchgeführt (die Probandenzahl variiert auf Grund der langen Zeitspanne zwischen den einzelnen Versuchsdurchläufen). Dabei waren circa Dreiviertel aller Probanden männlich. Außerdem waren wiederum 75 % aller Befragten zwischen 18 und 30 Jahren alt. Die restlichen 25 % hatten ein Alter zwischen 40 und 60 Jahren.

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

2.2 Bewertung der subjektiven Untersuchungen

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

$$SBI(X_j) = 100 - 100 \frac{\sum(\Delta X_{o,j}) + |\{\Delta X_{n,j} \neq 0\}|}{\sum(\Delta X_{o,max}) + |\{X_{fv,j}\}| + |\{X_{fe,j}\}|}$$

$X_{o,j}$ Median der Variable für die Lichtquelle j (o = Helligkeit, Sättigung, Temperatur, Empfindung)

$X_{o,ref} = 3$ Median der Variable für die Referenzlichtquelle ‚ref‘ (3 entspricht der Wahrnehmung keines Unterschiedes)

$X_{n,j}$	Am häufigsten genannte Einstufung der Variable m für die Lichtquelle j (n = Farbverschiebung (fv), Farberinnerung (fe))
$X_{fv,ref} = 0$	Am häufigsten genannte Einstufung der Variable fv,m für die Referenzlichtquelle ‚ref‘ (0 entspricht der Wahrnehmung keines Unterschiedes)
$X_{fe,ref} = 4$	Am häufigsten genannte Einstufung der Variable fe,m für die Referenzlichtquelle ‚ref‘ (4 ist gleichbedeutend mit der Entsprechung der Farbprobe mit der Vorstellung von dieser Farbe)

Das Prinzip des SBI beruht auf dem Verhältnis von Abweichung zu maximal möglicher Abweichung und Anzahl. Für die Variablen Helligkeit, Sättigung, Temperatur und Empfindung wird diese Abweichung vom Median „3“ bestimmt und diese Abweichungen über alle Farbproben aufsummiert und zur maximal möglichen Abweichung ins Verhältnis gesetzt. Für die Variablen Farbverschiebung und Farberinnerung wird die Anzahl der gegebenen Antworten, die von dem Referenzwert abweichen ins Verhältnis zur jeweiligen Gesamtanzahl gesetzt.

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

3 Auswertung

3.1 Vergleich des SBI mit dem CIE-Farbwiedergabeindex

In den Diagrammen in Abbildung 3 und 4 werden die subjektiven Bewertungsindizes der jeweiligen Lichtquelle mit den entsprechenden CIE-Farbwiedergabeindizes verglichen. Hier werden der CIE-Farbwiedergabeindex mit der klassischen Berechnungsmethode nach der CIE13.2 mit dem SBI verglichen. Dabei sind die entsprechenden Farbwiedergabewerte innerhalb der jeweiligen Balken zu erkennen. Der SBI nimmt bei den jeweiligen Referenzquellen seinen Maximalwert (100) an. Dieser Wert ist so gesetzt, da dies einem direkten Vergleich der Lichtquelle mit sich selbst entspräche. Da hierbei keine Unterschiede auftreten, ist dieser Wert also maximal. Der SBI, der bei den anderen Lichtquellen angegeben ist, entspricht der subjektiven Bewertung des Direktvergleichs zwischen Test- und Referenzquelle (also beispielsweise dem Vergleich von HMI-Lampe und RGB-LED, wobei die RGB-LED hier lediglich einen subjektiven Übereinstimmungswert von 56 erhält).

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. Trotzdem bleibt die Tendenz bestehen, dass Lichtquellen mit sehr schmalbandigem Spektrum auch subjektiv schlechter bewertet werden als Beleuchtungsquellen mit einem höheren kontinuierlichen Anteil im Spektrum. Solche Lichtquellen, wie beispielsweise Leuchtstofflampen und weiße LEDs unterscheiden sich in der subjektiven Bewertung hingegen kaum von der CIE-Bewertung und erreichen in der Regel Werte zwischen 80 und 100 in beiden Bewertungssystemen.

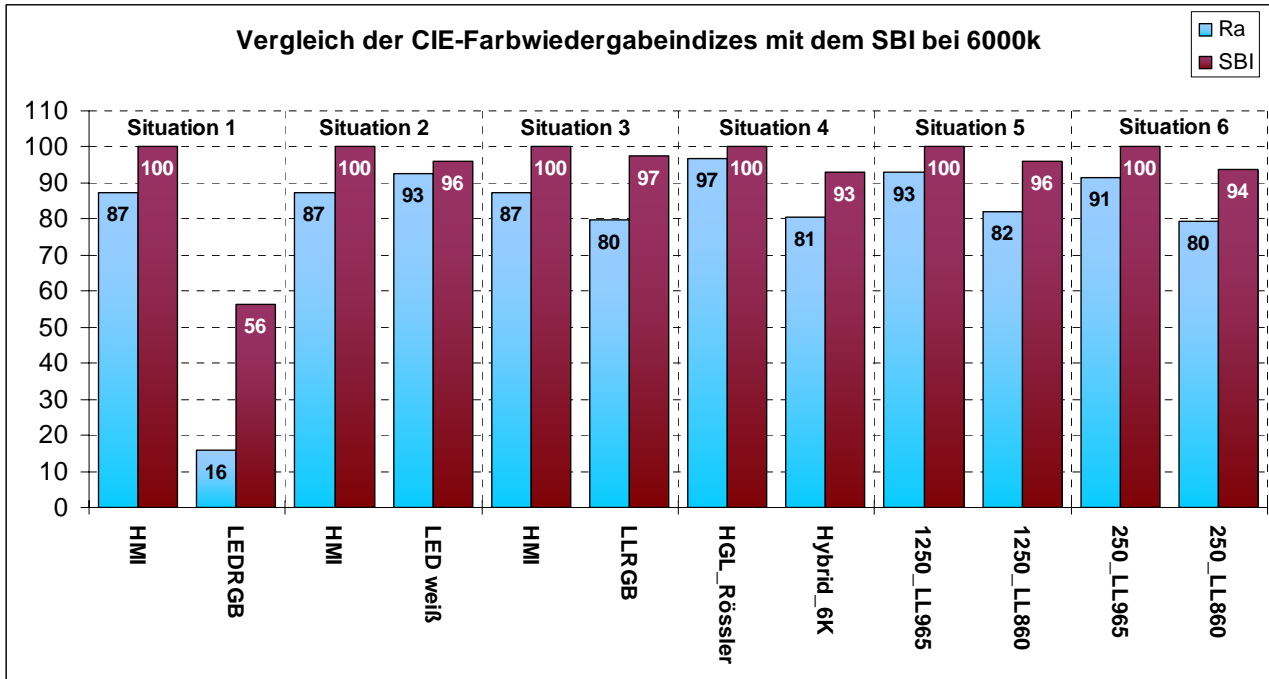


Abb. 3: Vergleich der CIE-Farbwiedergabeindizes mit dem SBI bei einer ähnlichsten Farbtemperatur von 6000K

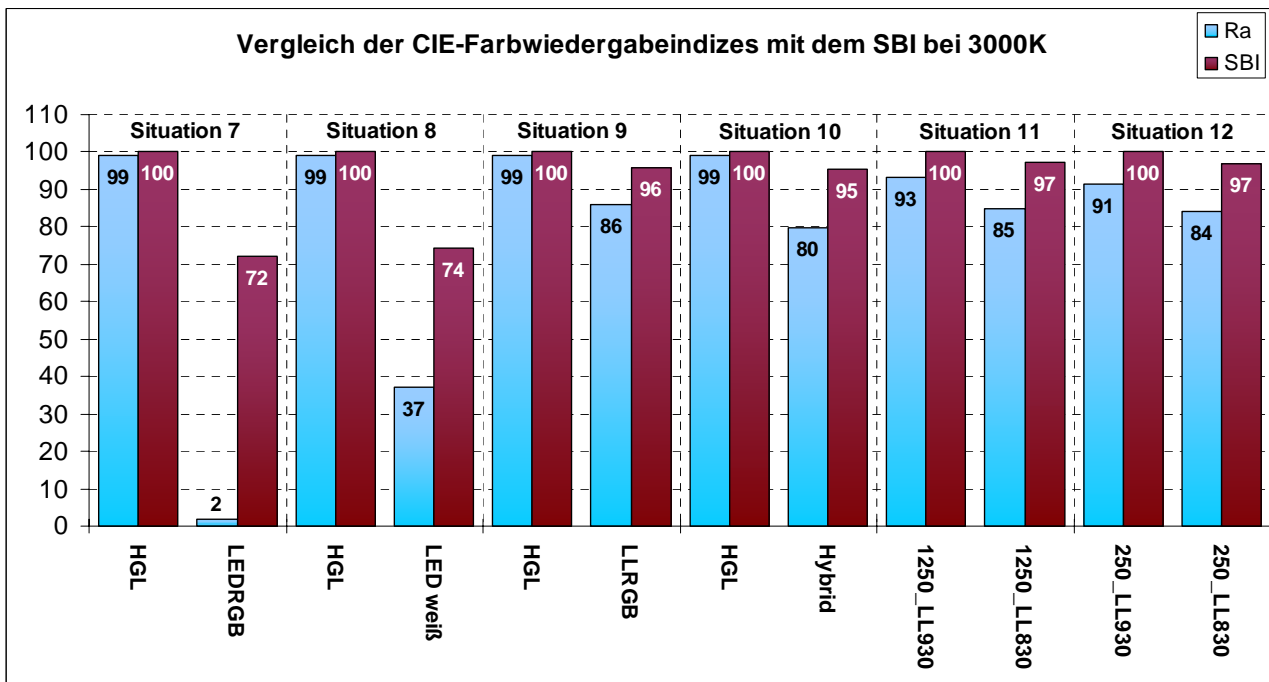


Abb. 4: Vergleich der CIE-Farbwiedergabeindizes mit dem SBI bei einer ähnlichsten Farbtemperatur von 3000K

Des Weiteren ist festzustellen, dass diese Einschätzung unabhängig von Farbtemperatur (3000K oder 6000K) und Beleuchtungsstärke (500lx, 250lx (Situationen 6 und 12) oder 1250lx (Situationen 5 und 11)) zutrifft. Allgemein lässt sich zeigen, dass die subjektive Bewertung sich positiver darstellt, als die Bewertung durch die CIE. Dies lässt beim bisherigen Untersuchungsstand vermuten, dass Probanden in der vergleichenden Einschätzung von Beleuchtungssituationen toleranter gegenüber Änderungen der Farberscheinungsattribute sind, als dies die CIE-Bewertungen sind. Allerdings sind die Auswertungen

nicht vollständig abgeschlossen, so dass diese Ergebnisse als vorläufig betrachtet werden müssen, und zum gegenwärtigen Zeitpunkt viel Raum für Diskussionen lassen.

3.2 Quantitative Erfassung der subjektiven Bewertung

Um die Größe der wahrgenommenen Farbabstände genauer bestimmen zu können, wurde der Versuchsaufbau und die Befragungsmethodik erweitert und angepasst. Beispielfür die Situationen 4 und 10 (siehe Abb. 3 und 4) wurde diese abgewandelte Form der subjektiven Bewertung durchgeführt.

Hierfür wurde den Probanden auf der Seite der Testlichtart eine einzelne Farbprobe vorgelegt, und diese hatten aus einer Matrix ähnlicher Farbproben beleuchtet von der Referenzquelle die ähnlichste auswählen. In Abbildung 5 ist dies am Beispiel einer roten Farbprobe dargestellt. Mithilfe dieser Aussagen sollen tatsächlich gesehene Farbabstände messtechnisch bestimmt werden.

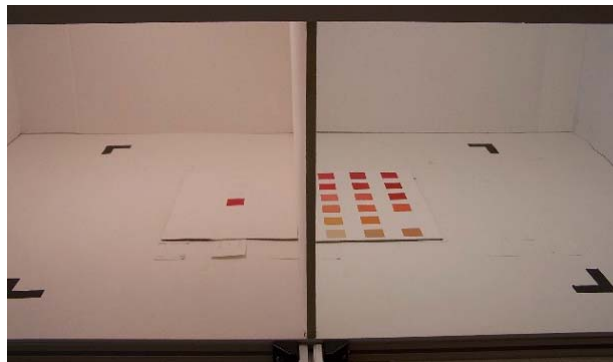


Abb. 5: *links*: Testprobe, beleuchtet von der Testlichtart und *rechts*: Auswahlmatrix, beleuchtet von der Referenzlichtart

Die Auswertung dieser quantitative Erfassung erfolgte auf Basis des CIELAB-Farbensystems. Als erster Interpretationsansatzpunkt wurde die Korrelation des Farbabstandes zwischen Testfarbe und der Farbprobe, die tatsächlich der Testprobe entsprach mit dem SBI ermittelt. In Tabelle 2 sind die Ergebnisse des Korrelationstests dargestellt. Hier wird deutlich, dass zwischen dem Farbabstand und dem SBI eine sehr signifikante negative Korrelation besteht. Es ist also wahrscheinlich, dass je geringer der Farbabstand ist, um so größer ist der SBI.

Situation	Korrelationskoeffizient	Signifikanz (2-seitig)	Signifikanzniveau
3000K	$r = -0,672$	$p = 0,0016$	Sehr signifikant
6000K	$r = -0,757$	$p = 0,0002$	Höchst signifikant
Gesamt	$r = -0,713$	$p = 0,0000$	Höchst signifikant

Tab. 2: Korrelation zwischen dem CIELAB-Farbabstand und dem SBI

Ein weiterer Ansatzpunkt bestand darin, die Korrelationen zwischen Wahlhäufigkeit einer Farbprobe aus der Matrix und Farbabstand zur Testprobe zu prüfen. Hierbei wurde eine signifikante negative Korrelation mit $r=-0,380$ (Signifikanz (2-seitig) $p=0,0119$) festgestellt. Also lässt sich auch hier sagen, dass je geringer der Farbabstand zwischen ausgewählter Farbprobe aus der Matrix und der Testprobe ist, um so größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass diese Probe gewählt wird.

Im dritten Schritt wurde versucht, mit Hilfe der gewählten Farbproben den fiktiven Farbort der Farbe, die von den Probanden als identisch gesehen würde zu finden. Hierfür wurde aus den Farbörtern im CIELAB-Farbenraum der tatsächlich gewählten Farbproben ein gewichteter Schwerpunkt gebildet. Die Wichtung entspricht dabei der Wahlhäufigkeit der jeweiligen Farbprobe. In Abbildung 6 ist ein Beispiel dargestellt, welches den Farbort einer

gezeigten Farbprobe auf der Testseite zeigt. Des Weiteren sind in diesem Diagramm die Farbörter der Farbproben abgebildet, die von den Probanden aus der Probenmatrix auf der Referenzseite gewählt wurden. In dieser Grafik entsprechen die neben den Farbörtern angegebenen Zahlen den Wahlhäufigkeiten der jeweiligen Probe. „S“ entspricht dem errechneten Schwerpunkt, „k“ entspricht dem Farbabstand zwischen der Testprobe und dem Schwerpunkt und „m“ dem Farbabstand zwischen Testprobe und identischer Referenzprobe.

Diese so ermittelten Schwerpunkte sollen in der weiteren Auswertung dazu genutzt werden, das Maß der Änderung zwischen Test- und Referenzsituation zu beschreiben.

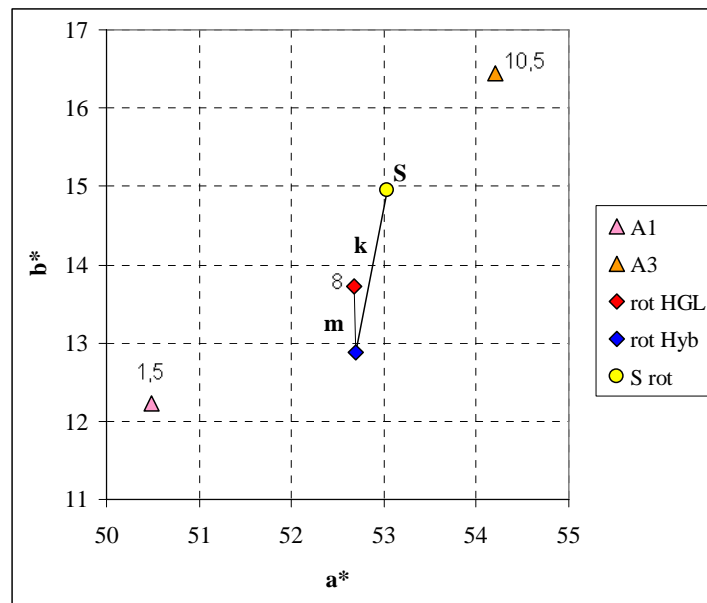


Abb. 6: Farbörter von Test- und Referenzfarbproben der Beispielfarbe Rot

4 Zusammenfassung

Unsere Forschungsarbeiten haben Diskrepanzen zwischen der subjektiven Bewertung und der CIE-Bewertung von schmalbandigen Lichtquellen, vor allem von RGB-LEDs, deutlich gemacht. Aussagen über die Güte der Abweichungen und eventuelle Verbesserungsvorschläge für den CIE-Index werden derzeit erforscht. Einen Ansatz liefern die Farberscheinungsmodelle oder Farbabstandberechnungen in anderen Farbräumen wie CIELAB, CIEDE2000, DIN99 oder CIECAM02, wie sie derzeit weltweit von unterschiedlichen Wissenschaftlern untersucht werden. Aber auch die Verknüpfung mehrerer verschiedener Indizes scheint eine Lösung zu bieten. Diese und andere Ansätze werden derzeit an unserem Institut geprüft.

Im Bereich der quantitativen Auswertungen stehen wir derzeit noch am Anfang. Es bestehen einige weitere Möglichkeiten zur statischen Analyse, die in der vorliegenden Veröffentlichung nicht erwähnt wurden. Da diese Untersuchungen nicht abgeschlossen sind, lassen sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine entgeltigen Ergebnisse darstellen. Diese Auswertungen sind jedoch zur Weiterentwicklung des Farbwiedergabeindex mit Berücksichtigung der subjektiven Bewertung ein wichtiges Element und daher nicht vernachlässigbar.

5 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 al: Colour Rendering Properties of LED Sources. 2. LED-Symposium, 2001
- /5/ Sandor, N. et al: Direct visual assessment of colour rendering
- /6/ Jungnitsch, K.: Subjektive Bewertung der Farbwiedergabeeigenschaften von Lampen mit unterschiedlichen Spektren, Diplomarbeit, Technische Universität Ilmenau, 2005
- /7/ Liedtke, C., Schuster, M.: Untersuchungen zur Farbwiedergabe in Abhängigkeit vom Farbwiedergabeindex und dem Beleuchtungsniveau, Medienprojektarbeit, Technische Universität Ilmenau, 2007
- /8/ Ring, S.: Verfahren zur quantitativen Erfassung der subjektiven Bewertung der Farbwiedergabeeigenschaften von Lampen mit unterschiedlichen Spektren, Diplomarbeit, Technische Universität Ilmenau, 2007
- /9/ Fairchild, M. D.: Testing colour appearance models: Guidelines for coordinated research. CIE – Collection in colour and vision; CIE 118 – 1995