

Subjektive Bewertung von Lichtfarbunterschieden für den 2°-Normalbeobachter bei messtechnisch identischer Beleuchtung

Frank Hofmann; Karin Bieske, Christoph Schierz
 Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik
 D-98693 Ilmenau

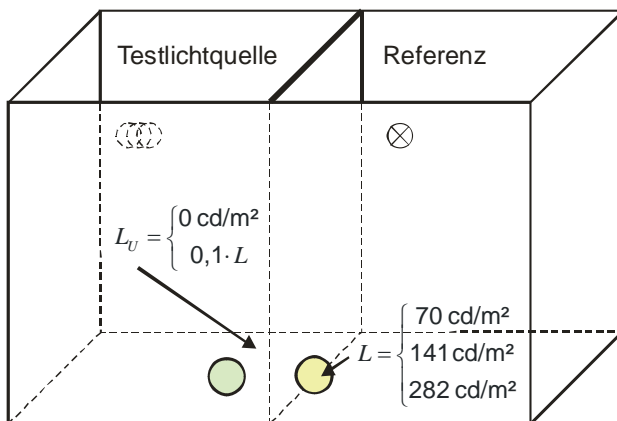
1 Hintergründe

Die Verwendung der Normspektralwertfunktionen (CIE 1931) für Berechnungen bzgl. des subjektiven Abgleichs von zwei Lichtquellen mit unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung führt zum Teil zu deutlichen Abweichungen zwischen dem messtechnisch erfassten und dem subjektiv empfundenen identischen Farbort beider Lichtquellen. Die beobachteten Unterschiede lassen sich nicht mit intra- oder interindividuellen Unterschieden oder mit Messunsicherheiten erklären. Unter Zuhilfenahme der modifizierten Spektralwertfunktionen nach WOLD fallen diese Abweichungen deutlich geringer aus [1].

Zu dieser Problematik wurden Probandenversuche mit verschiedenen Lichtquellen bei verschiedenen Lichtfarben und Beleuchtungsniveaus mit einem Lichtsimulator für ein 2°-Gesichtsfeld durchgeführt. Zusätzlich wurde der Einfluss von Umgebungshelligkeit auf den Abgleich identischer Lichtfarben untersucht.

2 Versuchsaufbau

Zwei nebeneinanderliegende Boxen wurden im Inneren mit unterschiedlichen Lichtquellen beleuchtet und durch zwei Öffnungen mit einem Beobachtungswinkel von etwa 2° durch Probanden betrachtet (siehe Abb. 1).



Versuchssituation	Testlichtquelle	Referenz	CCT
V1	RGB-LEDII	RGB-LEDII	5400K
V2	RGB-LEDII	HGL+F	5400K
V3	RGB-LEDI	HGL+F	5400K
V4	RGB-LEDI	HGL	2800K

Legende:

RGB-LED I (634 nm, 520 nm, 460 nm)
 RGB-LED II (624 nm, 500 nm, 460 nm)
 HGL+F Halogenleuchte mit Tageslichtfilter

Abb. 1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus links und Überblick über die Versuchsparmeter rechts

Abb. 2 zeigt die relativen Spektralverteilungen der verwendeten Test- und Referenzlichtquellen für die einzelnen Versuchssituationen.

Die Probanden hatten die Aufgabe, die Testlichtquelle subjektiv hinsichtlich Lichtfarbe und Helligkeit an die Referenzbeleuchtung anzupassen. Unterschiedliche Versuchssituationen wurden bei je drei verschiedenen Beleuchtungsniveaus L mit zwei Umfeldhelligkeiten L_U dargeboten. Jede Versuchssituation wurde von den Probanden dreimal abgeglichen. An der Untersuchung nahmen 15 normalfarbsichtige Probanden (davon 7 Frauen) im Alter zwischen 17 und 30 Jahren ($23,7 \pm 2,5$ Jahre) teil.

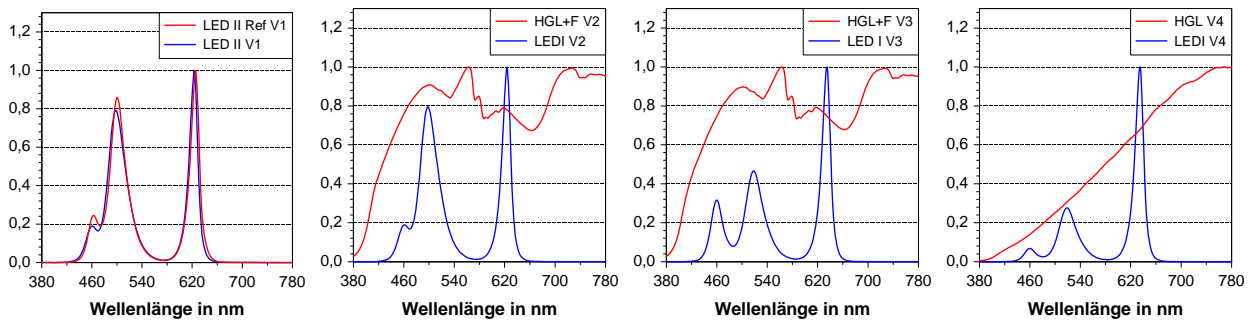


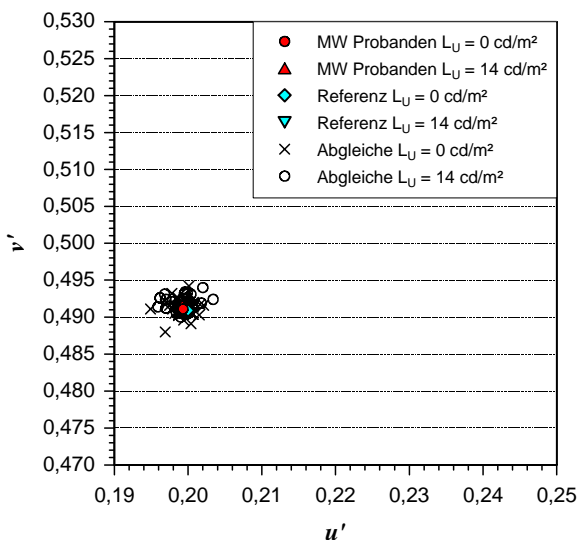
Abb. 2: Relative Spektralverteilungen der verwendeten Test- und Referenzlichtquellen für die Versuchssituationen V1 bis V4

3 Ergebnisse

Mit dem Spektralradiometer CS-2000 von Minolta wurden sowohl die messtechnisch identische Lichtfarben der Ausgangssituation, als auch die von den Probanden als identisch eingestellte Lichtfarben vermessen. Aus den Daten erfolgte die Bestimmung der Normfarbwerte, Normfarbwertanteile für den 2° Normalbeobachter und die Umrechnung in die Farbkoordinaten u' , v' nach DIN 5033 Teil 3 [2].

Die Ergebnisse für die subjektiven Gleichheitsurteile sind beispielhaft für das Beleuchtungsniveau von $L = 141 \text{ cd/m}^2$ in Abb. 3 und Abb. 4 dargestellt. Deutlich erkennbar ist, dass der Abgleich zwischen gleichartigen Lichtquellen eine hohe Übereinstimmung im Farbort besitzt (V1), während der Abgleich zwischen Lichtquellen mit sehr unterschiedlichen Spektralverteilungen deutliche Unterschiede zwischen den objektiv messbaren Farbörtern bei subjektiver Gleichheit der Lichtfarbe aufweist. Am größten waren die Abweichungen in der Versuchssituation V2. Hier traten auch die größten Streuungen zwischen Gleichheitsurteilen der einzelnen Probanden auf.

Abgleich V1: RGB-LED II zu RGB-LED II $L=141 \text{ cd/m}^2$



Abgleich V2: RGB-LED II zu HGL+F $L=141 \text{ cd/m}^2$

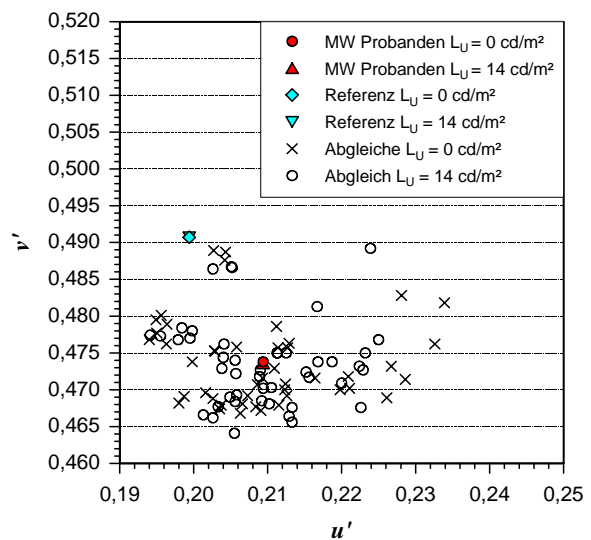
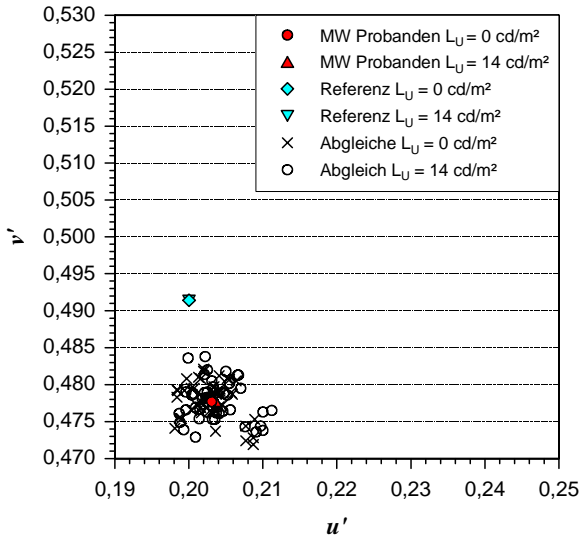


Abb. 3: Ergebnisse der subjektiven Bewertung in der CIE-UCS-Farbtabelle 1976 für die Versuchsreihen V1 und V2 auf der Basis der 2°-Normspektralwertfunktionen

Abgleich V3: RGB-LED I zu HGL+F $L=141\text{cd/m}^2$



Abgleich V4: RGB-LED I zu HGL $L=141\text{cd/m}^2$

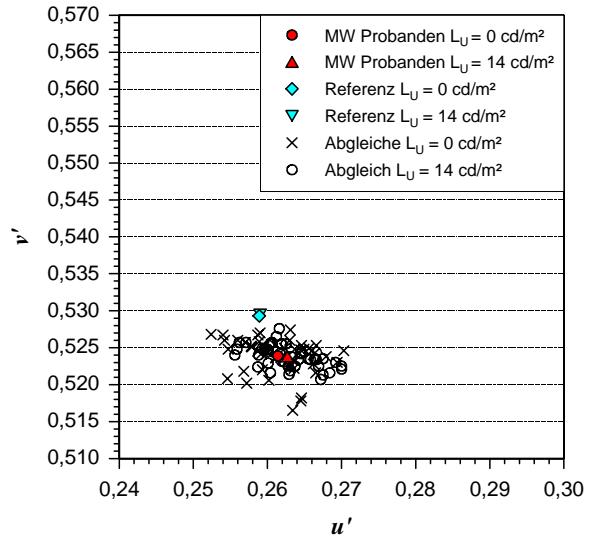


Abb. 4: Ergebnisse der subjektiven Bewertung in der CIE-UCS-Farbtafel 1976 für die Versuchsreihen V3 und V4 auf der Basis der 2°-Normspektralwertfunktionen

Der Lichtfarbenunterschied $\Delta u'v'$ der abgeglichenen Testlichtfarbe zur Referenz wurde nach Gleichung 1 zwischen dem Farbort der Referenzlichtquelle (u'_1, v'_1) und dem Mittelwert der Farbörter aller Probandenabgleiche (u'_2, v'_2) berechnet.

Gleichung 1:
$$\Delta u'v' = \sqrt{(u'_2 - u'_1)^2 + (v'_2 - v'_1)^2}$$

Die Farbunterschiede $\Delta u'v'$ sind in Abb. 5 für alle Versuchssituationen dargestellt.

Subjektive Gleichheit für 2°-Normspektralwertfunktionen

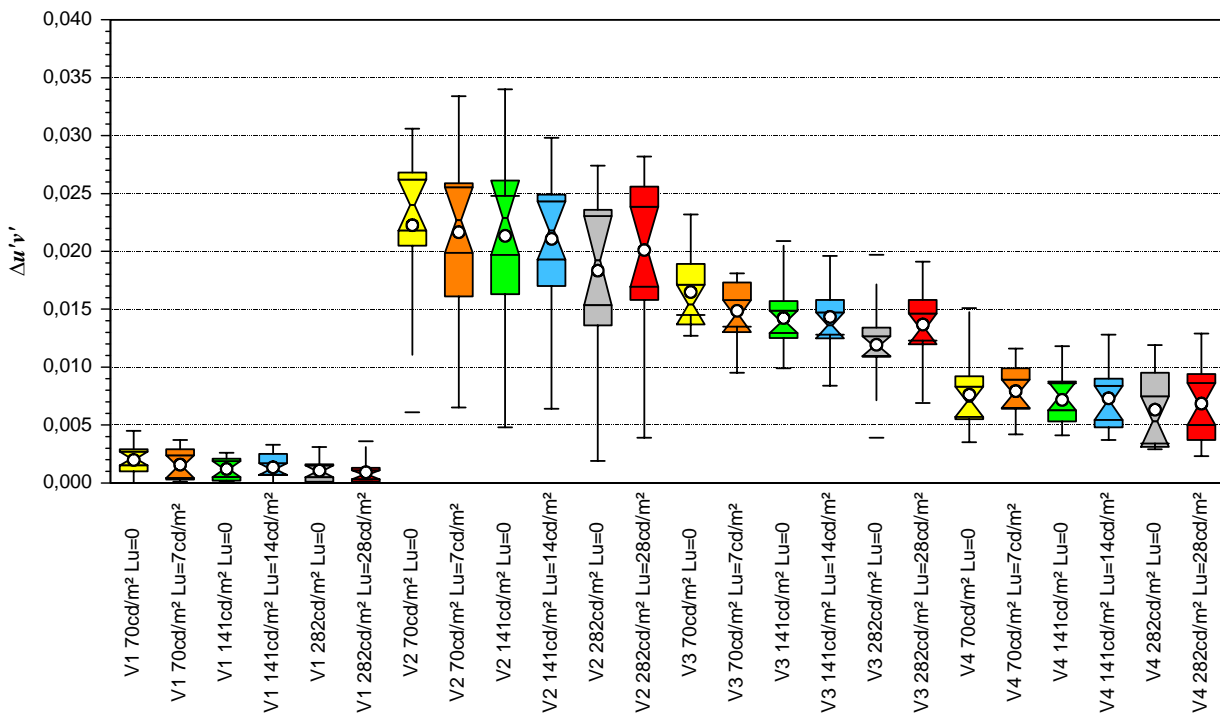


Abb. 5: Lichtfarbenunterschiede bei subjektiver Gleichheit für Bewertung mit den 2°-Normspektralwertfunktionen ($n = 15$ Probanden)

Für den grafischen Vergleich wurde der taillierte Boxplot gewählt. Die Quartile Q_1 , Q_2 und Q_3 kennzeichnen diejenigen Bereiche, unterhalb denen 25%, 50% und 75% der Werte liegen, wobei Q_2 dem Median der Datenreihe entspricht. Ausgehend von den Boxen wird durch senkrechte Striche der Bereich dargestellt, dessen Werte innerhalb des 1,5-fachen des Interquartilabstandes $Q_3 - Q_1$ liegen. In der Grafik sind ebenfalls die Extremwerte jeder Versuchsreihe gekennzeichnet. Gemäß Gleichung 2 kann für den Median \tilde{x} das Konfidenzintervall $\tilde{\mu}$ für die Datenmenge n angegeben werden. Im Boxplot wird dieses Intervall durch die Taillierung verdeutlicht. Der Kreis kennzeichnet den arithmetischen Mittelwert.

Gleichung 2:
$$\tilde{\mu} = \tilde{x} + \frac{1,58 \cdot (Q_3 - Q_1)}{\sqrt{n}}$$

Es zeigt sich, dass der subjektive Abgleich der Lichtfarbe unabhängig sowohl vom Beleuchtungsniveau zwischen 70 cd/m² und 282 cd/m² als auch von der Zusatzbeleuchtung mit $L_U = 0,1 \cdot L$ im Umfeld ist. Dagegen haben Unterschiede in der Spektralverteilung zwischen Test- und Referenzlichtquelle einen deutlichen Einfluss auf die beobachteten Abweichungen. Beim Vergleich der Versuchssituationen V3 und V4 fällt auf, dass bei höheren Farbtemperaturen deutlich größere Unterschiede auftreten.

Werden Messunsicherheiten berücksichtigt, so ergeben sich für den Untersuchungsbe-
reich aus den Messunsicherheiten für die Normfarbwertanteile $x: \pm 0,0015$; $y: \pm 0,0010$ [3]
Lichtfarbenunterschiede von etwa $\Delta u'v' = 0,0010$. Die in den Versuchsreihen V2 bis V4 be-
obachteten Abweichungen zwischen der objektiven Messung und den Farbempfindungen
lassen sich allein aus Messunsicherheiten nicht erklären und müssen andere Ursachen
haben. Vermutet werden Unzulänglichkeiten in den Normspektralwertfunktionen.

Die Normspektralwertfunktionen \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} für den 2°-Normalbeobachter wurden 1931 von
der CIE standardisiert. Sie wurden aus den Spektralwertkurven \bar{r} , \bar{g} , \bar{b} transformiert, die
anhand von Gleichheitsurteilen durch Nachmischung aus den festgelegten Primärvalen-
zen R , G , B mit innerer und äußerer Mischung bestimmt wurden [4]. Zugrunde lagen
Versuchsreihen von GUILD und WRIGHT mit 17 Probanden und man war sich bewusst, dass
gerade im kurzwelligen Bereich ein Kompromiss vereinbart wurde, da es zwischen den
Ergebnissen der Versuchsreihen zum Teil Abweichungen gab [5],[6]. Dies zeigte sich auch
in den Arbeiten von STILES und BURCH mit 10 Versuchspersonen, wurde jedoch nicht als
gesichert genug angesehen, um Eingang in die internationale Normung zu finden [6].

Während die Normspektralwertfunktionen auf Versuchsreihen beruhen, die die Farbemp-
findung als komplexe Problematik in seiner Gesamtheit untersuchten, gibt es in den letz-
ten Jahren im Rahmen der Arbeit des Technical Committee TC 1-36 der CIE Ansätze, die
Spektralwertfunktionen aus den Zapfenempfindlichkeiten \bar{l} , \bar{m} und \bar{s} zu bestimmen.
Dabei werden die Einflüsse der dazwischen liegenden Augenmedien auf die spektrale
Empfindlichkeit berücksichtigt, so dass es möglich ist, die Farbreizfunktion, die auf die
Hornhaut des Auges auftrifft, umzurechnen in die Farbreizfunktion, die auf die Netzhaut
gelangt. Im Ergebnis wurden modifizierte Spektralwertfunktionen \bar{x}_f , \bar{y}_f , \bar{z}_f von WOLD
vorgeschlagen, deren Einführung international noch in der Diskussion ist [7].

Abb. 6 zeigt die Normspektralwertfunktionen für 2°- und 10°-Normalbeobachter und die
modifizierte Spektralwertfunktionen für den 2°-Normalbeobachter nach WOLD. Im Vergleich
zu den 2°-Normspektralwertfunktionen weisen die 10°-Normspektralwertfunktionen und
Spektralwertfunktionen für den 2°-Normalbeobachter nach WOLD einen geringfügigen Shift
hin zu kürzeren Wellenlängen auf und berücksichtigen die kurzwelligen Komponenten bei
der Farbempfindung stärker. CSUTI und SCHANDA erzielten mit der Verwendung der modifi-

zierte Spektralwertfunktionen nach WOLD gute Übereinstimmungen in ihren Experimenten [1].

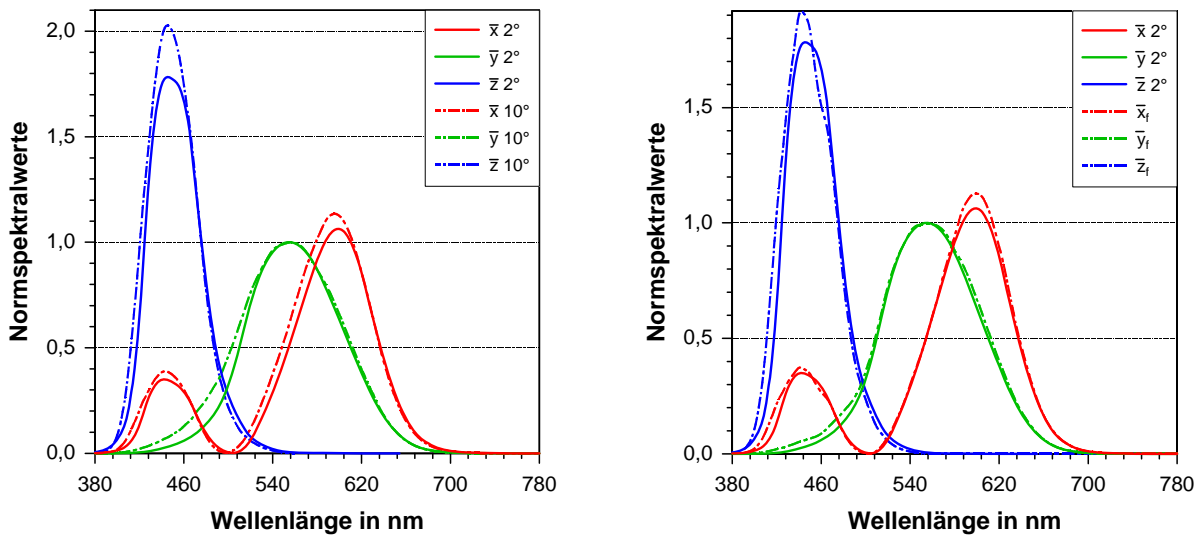


Abb. 6: Normspektralwertfunktionen für den 2°- und 10°-Normalbeobachter und für die modifizierten Spektralwertfunktionen nach WOLD für den 2°-Normalbeobachter

Für die weitere Auswertung wurden die Spektraldaten der Gleichheitsurteile der Probanden mit den Normspektralwertfunktionen für den 10°-Normalbeobachter und mit den modifizierten Spektralfunktionen für den 2°-Normalbeobachter nach Wold bewertet und die Lichtfarbenunterschiede $\Delta u'v'$ bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abb. 7 und Abb. 8 dargestellt.

Subjektive Gleichheit für 10°-Normspektralwertfunktionen

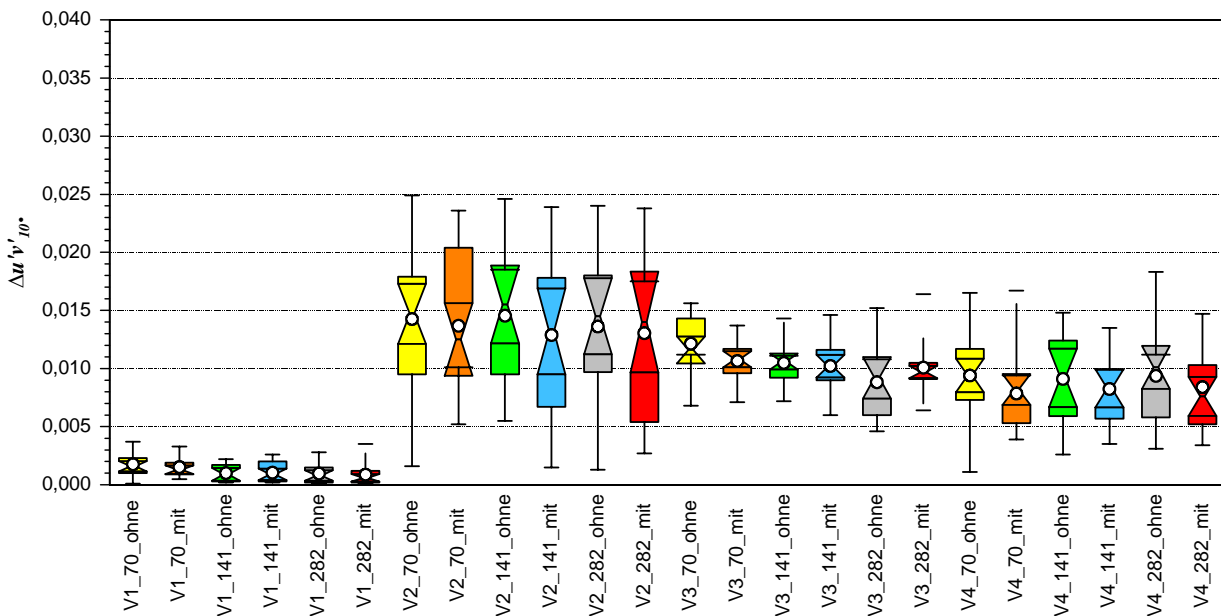


Abb. 7: Lichtfarbenunterschiede bei subjektiver Gleichheit für Bewertung mit den 10°-Normspektralwertfunktionen ($n = 15$ Probanden)

Subjektive Gleichheit für 2°-Spektralwertfunktionen nach WOLD

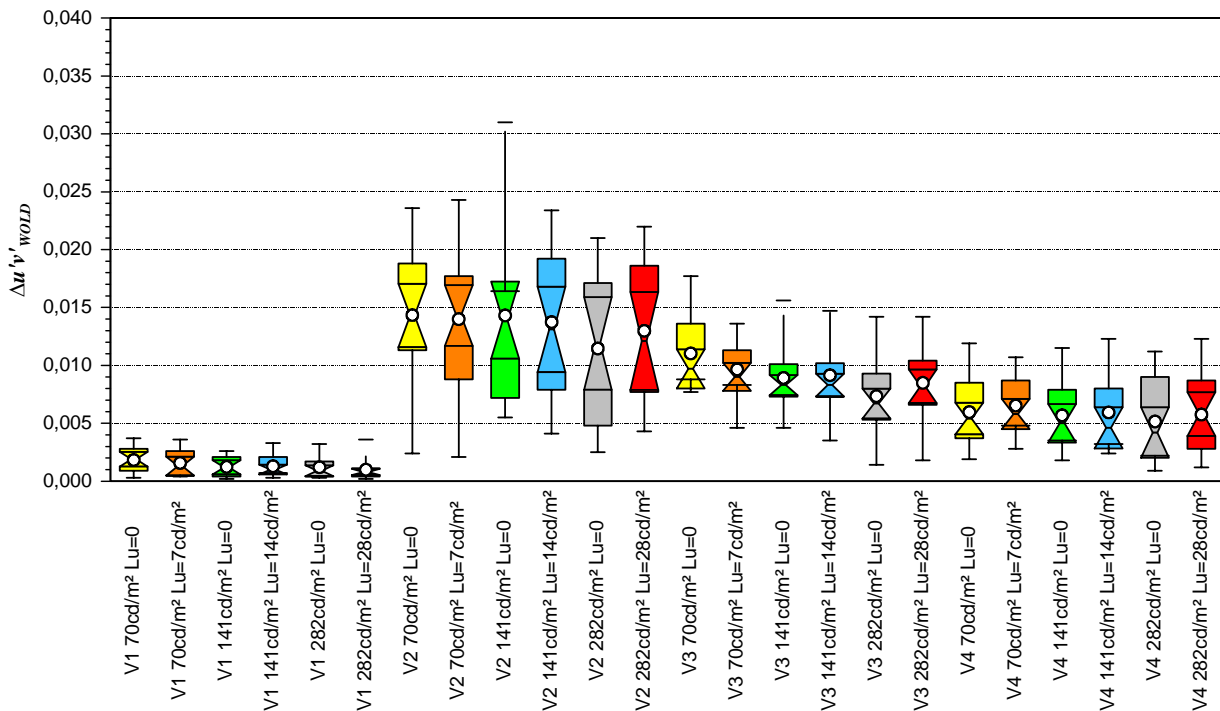


Abb. 8: Lichtfarbenunterschiede bei subjektiver Gleichheit für Bewertung mit den modifizierten Spektralwertfunktionen des 2°-Normalbeobachters nach WOLD ($n = 15$ Probanden)

Zu erkennen sind eine Verringerung der Abweichungen in den Versuchsreihen V2 bis V4. Es ist daher zu vermuten, dass die \bar{z} -Funktion der CIE 1931-2°-Normspektralwertfunktionen nicht exakt der visuellen Wahrnehmung entspricht. Hier bedarf es noch weiterführender Untersuchungen.

4 Literatur

- [1] Bieske K, Csuti P, Schanda J: *Colour appearance of metameric lights and possible colorimetric description*. CIE expert symposium on Visual Appearance, Paris, 2006
- [2] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *Farbmessung - Farbmaßzahlen*. DIN 5033 Teil 3, Berlin: Beuth Verlag, Juli 1992
- [3] KONIKA MINOLTA: *Technische Daten CS-2000*. <http://www.konicaminolta.eu/de/messinstrumente/produkte/display-messtechnik/spektorradiometer/cs-2000/technische-daten.html> (23.08.2010)
- [4] LANG, H: *Farbwiedergabe in den Medien: Fernsehen, Film, Druck*. Muster-Schmidt Verlag Technik Göttingen Zürich, 1995, ISBN 3-7881-4052-6
- [5] GUILD, J: *The colorimetric properties of the spectrum*. Phil. Trans. Roy. Soc. London A230 (1931), S. 149-187
- [6] WRIGHT, W D: *A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours*. Trans. Opt. Soc. London 30 (1928/29), S. 144-164
- [7] CIE (2005): *Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes - Part 1* Draft Technical Report by TC 1-16, 2005