

Neue Spektralwertfunktionen zur Erfassung visueller Farbgleichheit bei LED-Spektren

*Saskia Polster, Karin Bieske, TU Ilmenau, Prof.-Schmidt-Str. 26, 98693 Ilmenau
Kontakt: karin.bieske@tu-ilmenau.de*

Einleitung

Mit der LED (Light Emitting Diode) hat sich ein neues Leuchtmittel in der Innenraumbeleuchtung etabliert. Die standardisierten Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931 und 1964 können bei bestimmten Spektralzusammensetzungen zu fehlerhaften Bewertungen von LED-Spektren führen. Teils werden gleich wahrgenommenen Spektren auf unterschiedliche Farbörter abgebildet. Teils werden Spektren mit denselben messtechnisch ermittelten Farbkoordinaten visuell unterschiedlich wahrgenommen. Damit ergeben sich massive Probleme bei der Ansteuerung von LED-Beleuchtungssystemen, die für homogene Flächenbeleuchtungen verwendet werden. Bedingt durch den Produktionsprozess zur Herstellung von LEDs werden in einem Beleuchtungssystem immer LED-Lichtquellen mit leicht unterschiedlichen Spektralverteilungen verwendet. Wenn diese aber messtechnisch nicht korrekt erfasst werden, ergeben sich Inhomogenitäten innerhalb der beleuchteten Flächen. Bei der Verwendung von LEDs einer einzigen Lichtfarbe kommt es zu Problemen bei der richtigen Selektion der miteinander zu verwendenden Lichtquellen. Bei Beleuchtungssystemen, die innerhalb eines definierten Gamuts eine freie Farbwahl ermöglichen, besteht das Problem darin, dass die einzelnen Lichtquellen nicht korrekt charakterisiert werden können. Damit kommt es zu Schwierigkeiten bei der Ansteuerung eines gemeinsamen Farborts.

Ziel der Untersuchungen

Die hier vorgestellten Untersuchungen zur Erfassung visueller Farbgleichheit bei LED-Spektren hatten zum einen das Ziel das Ausmaß der Fehlbewertungen von LED-Spektren durch die Normspektralwertfunktionen festzustellen. Zum anderen sollten Spektralwertfunktionen ermittelt werden, mit denen visuell gleich wahrgenommene Spektren auf dieselben Farbkoordinaten abgebildet werden.

Datenbasis visuell gleich wahrgenommener Spektren

Zunächst wurde eine Datenbasis visuell gleich wahrgenommener Spektren erstellt. Zu diesem Zweck wurde ein Testsetup aufgebaut in dem die Farbwahrnehmung bei unterschiedlichen LED-Spektren in verschiedenen Beobachterfeldgrößen untersucht werden konnte. In diesem Versuchsaufbau wurden Side-by-Side Abgleichversuche durchgeführt.

Versuchsbedingungen

Die Untersuchungen fanden alle unter photopischen Adaptationsbedingungen statt. Die Umgebungsleuchtdichte betrug durchschnittlich 70 cd/m^2 während die Leuchtdichte auf dem Test- und Referenzfeld bei ca. 132 cd/m^2 lag. Unterschiedliche Kombinationen aus Referenz- und Testlichtspektren wurden untersucht. Dabei wurden die Abgleiche jeweils bei drei Farbtemperaturen (3500 K, 5000 K und 6500 K) durchgeführt. Die Umgebungsbeleuchtung wurde an die gerade untersuchte Lichtfarbe angepasst.

In Voruntersuchungen wurde festgestellt, dass die Unterschiede in der visuellen Wahrnehmung zwischen einem 2°- und einem 10°-Beobachter bei einigen LED-Lichtquellen stark zum Tragen kommen. Daher wurden alle Untersuchungen jeweils in einem 2°- („K“), 5°- („M“) und 10°-Beobachterfeld („G“) durchgeführt. Abbildung 1 zeigt den Versuchsaufbau für die Abgleichuntersuchungen. Auf der rechten Seite ist die Drehscheibe dargestellt, die einen einfachen Wechsel der verwendeten Beobachterfeldgröße erlaubt. Insgesamt nahmen zwanzig Probanden an den Untersuchungen teil. Die Hälfte der Probanden war weiblich und das durchschnittliche Alter der Probandengruppe lag bei 30 ± 6 Jahren.

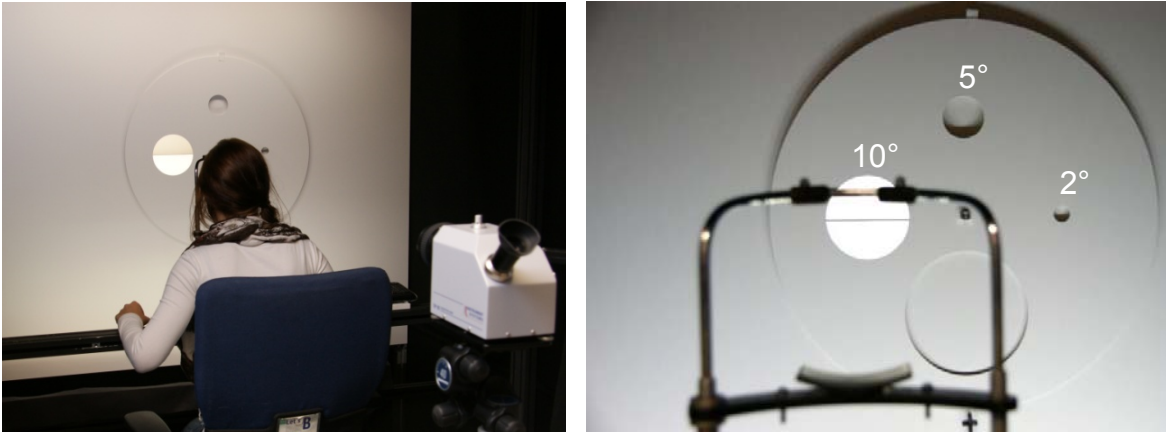


Abbildung 1: Abgleichstand mit zweigeteiltem Beobachterfeld und änderbarem Ausschnitt für Anpassung der Beobachterfeldgröße

Versuchsablauf

Die Probanden machten Abgleichversuche bei denen durch eine gezielte Ansteuerung der Testlichtquelle visuelle Gleichheit zwischen Testlichtfeld und Referenzlichtfeld hergestellt wurde. Zu Beginn jedes Abgleichs war der Farbart der Testlichtquelle messtechnisch, mit Hilfe der Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931, an die Referenzlichtquelle angeglichen. Der Proband steuerte die Farbe des Testfeldes in zwei Dimensionen auf der Achse Grün-Rot und der Achse Blau-Gelb mit Hilfe von Richtungstasten an. Zudem konnte die Testperson die Helligkeit des Testfeldes wenn nötig anpassen. Wurde die Farbtemperatur zwischen den Abgleichtests umgeschaltet, adaptierte der Proband solange auf die neue Situation bis er die Umgebung wieder als weiß wahrnahm; mindestens aber zwei Minuten. Vor jedem Versuchsdurchlauf wurden die drei Einstellungen des Referenzlichtfeldes messtechnisch überprüft. Die vom Probanden eingestellte Testfläche wurde mit einem Spektralradiometer (CAS140-CT der Firma Instrument Systems) nach jedem Abgleich vermessen. Die Ergebnisse der Abgleichversuche wurden dann in die Datenbasis aufgenommen.

Untersuchte Spektralzusammensetzungen

Insgesamt wurden in den Abgleichuntersuchungen sieben unterschiedliche Spektralzusammensetzungen der Test- und Referenzlichtquellen untersucht. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die in den einzelnen Versuchsszenarien verwendeten Referenz- und Testlichtquellen. In Tabelle 2 wird die Zusammensetzung der einzelnen Lichtquellen genauer beschrieben. Den Ausgangspunkt für die Untersuchungen bildeten zwei weiße LED-Typen (T1 und T2) vom Produkttyp Rebel des Herstellers Lumileds aus benachbarten ISO-Bins mit unterschiedlichen Spektralverteilungen. Diese unterscheiden sich trotz nahezu gleicher Farbörter deutlich in der visuellen Wahrnehmung. Da das Licht des LED-Typs T1 deutlich rötlich wirkt, wird die RGBW-Kombination, die diesen LED-Typen beinhaltet, im weiteren Verlauf als Testlichtquelle-Rot (TLR) bezeichnet. Der LED-Typ T2 wird dagegen deutlich grünlich wahrgenommen. Daher wird die RGBW-Lichtquelle mit diesem LED-Typ im

Folgenden als Testlichtquelle-Grün (TLG) bezeichnet. Abbildung 2 zeigt die Spektren der LED-Typen T1 und T2 im Vergleich.

Auch bei der Verwendung dieser LED-Typen mit RGBW-Mischalgorithmen ergeben sich trotz messtechnischer Übereinstimmung der Farbörter deutliche visuelle Unterschiede. Versuchsszenario VS1 beschreibt den Vergleich des TLR-RGBW-Mischspektrums mit dem TLG-RGBW-Mischspektrum. Es wurde die Hypothese aufgestellt, dass die Diskrepanz zwischen visuellem Eindruck und messtechnischer Metamerie zwischen TLR und TLG auf den spektralen Unterschieden im Bereich zwischen 480 nm und 500 nm zurückzuführen ist. Daher wurde in Versuchsszenario VS3 das RGBW-Mischspektrum der TLR mit der Spektralverteilung einer cyanfarbenen LED aufgefüllt und wiederum dem TLG-RGBW-Mischspektrum gegenübergestellt. Versuchsszenario VS2 beschreibt den Vergleich der RGB-Mischspektren von TLR und TLG. Die Spektralverteilungen der jeweiligen roten und blauen LEDs sind nahezu identisch. Der Peak der grünen LED der TLR ist um 10 nm hin zu höheren Wellenlängen verschoben. Tabelle 3 listet die Peakwellenlängen und die Halbwertsbreiten der einzelnen LED-Komponenten auf. In Versuchsszenario VS4 respektive Versuchsszenario VS5 werden die RGBW-Mischspektren von TLR bzw. TLG als Testspektrum auf eine 8-LED-Vollspektrum-Referenzlichtquelle abgeglichen. Die Versuchsszenarien VS6 und VS7 wurden eingeführt, um mit maximal verschiedenen Spektralzusammensetzungen von Test- und Referenzspektrum Worst-Case Szenarien zu generieren. Diese sind in der Realität nur mit geringer Wahrscheinlichkeit anzutreffen. Sie sollen aber eine Abschätzung ermöglichen, welche Fehler bei der Abbildung visuell gleicher Spektren auf Farbörter im schlimmsten Fall auftreten können. In VS6 wird ein möglichst lückenloses Spektrum (8-LED-Vollspektrum-Referenzlichtquelle) mit einem reinen Peakspektrum (RGB-Mischung von TLR) verglichen. Versuchsszenario VS7 stellt ein Worst-Case-Szenario dar, in dem zwei Peakspektren miteinander verglichen werden, wobei die Peaks der Spektren genau versetzt liegen.

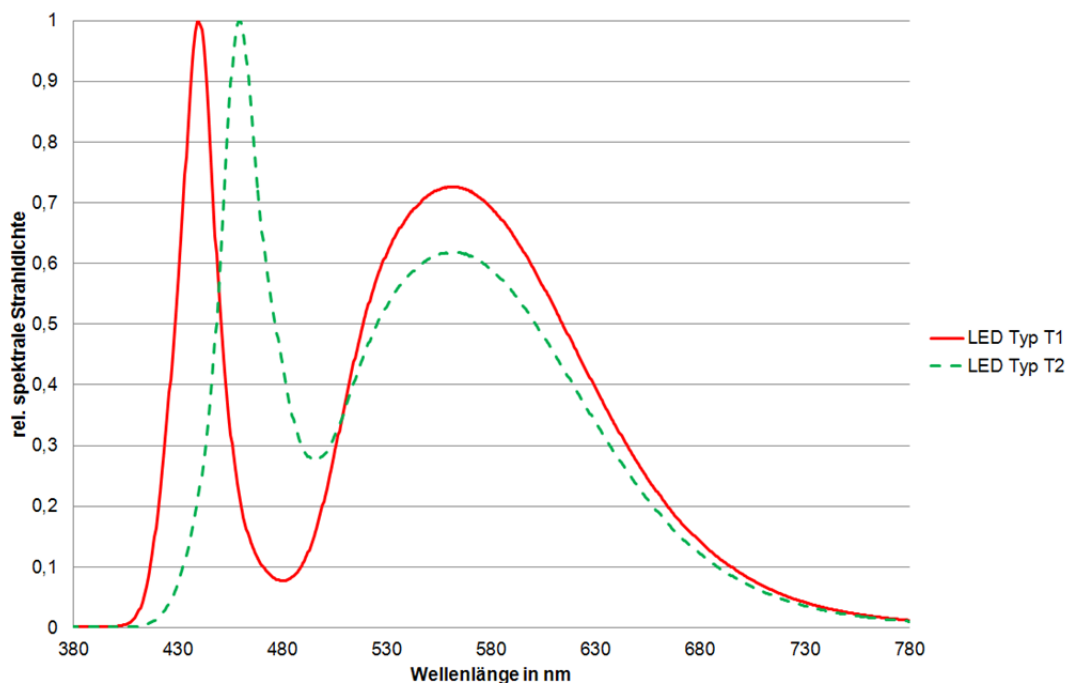


Abbildung 2: Relative Spektralverteilung der weißen LEDs T1 und T2 der Testlichtquellen TLR und TLG

Tabelle 1: Zusammenstellung der in den Versuchsszenarien VS1 bis VS9 verwendeten Referenz- und Testlichtquellen

Versuchsszenario	Referenzlichtquelle	Testlichtquelle
VS1	TLR-RGBW	TLG-RGBW
VS2	TLR-RGB	TLG-RGB
VS3	TLR-RGBW+C	TLG-RGBW
VS4	8-LED-Vollspektrum	TLR-RGBW
VS5	8-LED-Vollspektrum	TLG-RGBW
VS6	8-LED-Vollspektrum	TLR-RGB
VS7	ACB-Mix	TLR-RGB
VS8	TLR-Cyan-Mix-RGBW	TLG-RGBW
VS9	RCBW-Mix	TLR-RGBW

Tabelle 2: Zusammensetzung der verwendeten Referenz- und Testlichtquellen

Bezeichnung	Erläuterung
TLR	Mischung aus LED Typ T1 und roter, grüner und blauer LED
TLG	Mischung aus LED Typ T2 und roter, grüner und blauer LED
TLR-RGBW+C	RGBW-Mischung der TLR mit konstantem Mischanteil einer cyanfarbenen LED
8-LED-Vollspektrum	Mischspektrum ohne Lücken oder ausgeprägte Peaks im Spektrum
ACB-Mix	Mischung aus amber-, cyanfarbener und blauer LED
TLR-Cyan-Mix-RGBW	Mischung aus LED Typ T1 und roter, cyanfarbener und blauer LED
RCBW-Mix	Mischung aus roter, cyanfarbener, blauer und warmweißer LED der 8-LED-Lichtquelle

Tabelle 3: Peakwellenlängen λ_{Peak} und Halbwertsbreiten $\lambda_{h1=h2}$ der einzelnen LED-Komponenten

Bezeichnung	rote LED		grüne LED		blaue LED		Blaukomponente der weißen LED	
	λ_{Peak} in nm	$\lambda_{h1=h2}$ in nm	λ_{Peak} in nm	$\lambda_{h1=h2}$ in nm	λ_{Peak} in nm	$\lambda_{h1=h2}$ in nm	λ_{Peak} in nm	$\lambda_{h1=h2}$ in nm
TLR	643	18	535	36	449	23	440	22
TLG	640	17	525	32	447	18	460	28
ACB-Mix	596	15	497	27	467	20	-	-

Farbabstände zwischen visuell gleich wahrgenommenen Spektren

Die Datenbasis enthält innerhalb eines Datensatzes jeweils zwei Spektren, die von einem Probanden als visuell gleich wahrgenommen werden. Da zwei visuell gleich wahrgenommene Spektren innerhalb eines korrekten Farbraums auf denselben Farbart abgebildet werden sollten, stellt der Farbabstand zwischen den Farbtörtern der beiden Spektren den Farbraumfehler dar, der innerhalb des verwendeten Systems gemacht wird. Je kleiner der Farbraumfehler ausfällt, desto besser wird die Farbwahrnehmung der Probandengruppe durch die verwendeten Spektralwertfunktionen modelliert. Die hier untersuchten Farbdifferenzen stellen jeweils die Farbdifferenz zwischen dem Mittelwert der Abgleichergebnisse aller Probanden und der Referenzlichtquelle dar.

Test der anerkannten Spektralwertfunktionen

Mit Hilfe der Datenbasis aus den Abgleichuntersuchungen wurden alle anerkannten Spektralwertfunktionen auf ihre Fähigkeit hin untersucht, visuell gleich wahrgenommene Spektren auf denselben Farbart abzubilden. Dabei wurden für den Test der Spektralwertfunktionen jeweils die Abgleichergebnisse aus den entsprechenden Beobachterfeldgrößen verwendet. Das bedeutet, nachdem die Spektralwertfunktionen der CIE von 1931 für einen 2°-Standardbeobachter ermittelt wurden, wurden diese auch mit Hilfe der Abgleichergebnisse aus dem 2°-Beobachterfeld untersucht. Die Farbdifferenz $\Delta u'v'_{K\text{-Referenz}}$ bezeichnet die Farbdifferenz zwischen dem, im kleinen 2°-Beobachterfeld abgeglichenen Testspektrum und dem Referenzspektrum. Die Farbdifferenz $\Delta u'v'_{G\text{-Referenz}}$ bezeichnet dagegen die Farbdifferenz zwischen dem Abgleichergebnis aus dem 10°-Beobachterfeld und dem dazugehörigen Referenzspektrum. Die Abgleichuntersuchungen aus dem 5°-Beobachterfeld sollen zeigen, ob sich die Farbartverschiebung zwischen den 2°- und 10°-Abgleichergebnissen linear verhält oder einen anderen Verlauf in der $u'v'$ -Farbtafel annimmt.

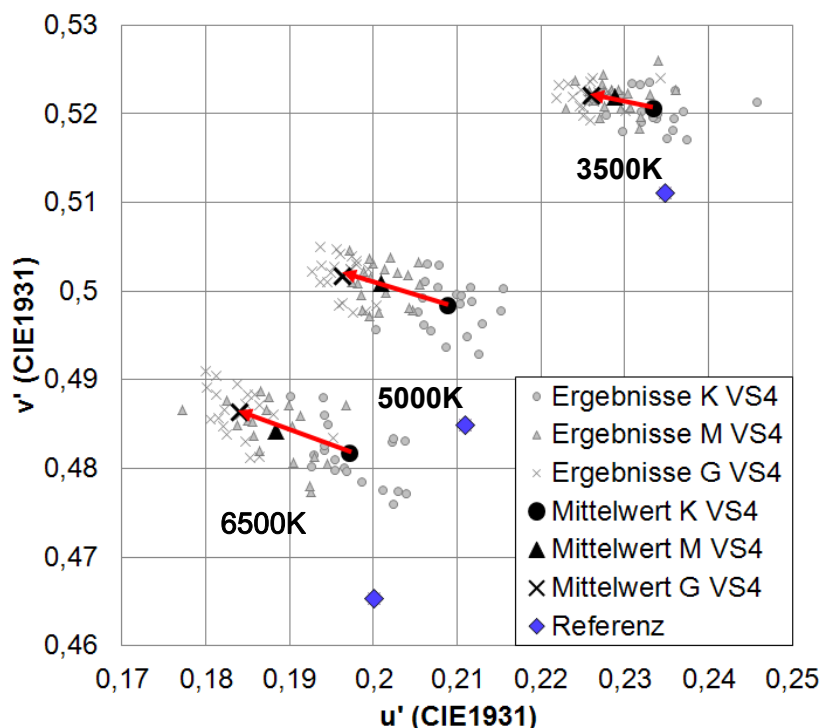


Abbildung 3: Abgleichergebnisse unter Verwendung des 2°- ("K"), 5°- ("M") und 10°-Beobachterfeldes ("G") für Versuchsszenario VS4

Abbildung 3 zeigt exemplarisch anhand von Versuchsszenario VS4, dass die Abgleiche aus dem 5°-Beobachterfeld („M“) jeweils auf der Verbindungsgeraden zwischen den Abgleichergebnissen aus dem 2°- („K“) und dem 10°-Beobachterfeld („G“) liegen. Dieses lineare Verhalten lässt sich für alle Versuchsszenarien bestätigen. Zunächst wurden die Farbraumfehler $\Delta u'v'_{K\text{-Referenz}}$ (CIE1931) ermittelt, die sich unter Verwendung der Spektralwertfunktionen der CIE von 1931 ergeben. Für den Großteil der untersuchten Versuchsszenarien ergaben sich deutliche Farbdifferenzen zwischen den visuell gleich wahrgenommenen Spektren. Abbildung 4 zeigt die Farbraumfehler $\Delta u'v'_{K\text{-Referenz}}$ (CIE1931) für die Versuchsszenarien VS1 bis VS7 bei den Farbtemperaturen 3500 K, 5000 K und 6500 K. Diese erreichen Werte von bis zu $\Delta u'v'_{K\text{-Referenz}}$ (CIE1931) = 0,0165. Die Farbraumfehler liegen über einem Wert von $\Delta u'v'_{K\text{-Referenz}}$ (CIE1931) = 0,008 für fünf der sieben untersuchten Versuchsszenarien. Um die Wahrnehmungsschwelle abschätzen zu können, wurde die Intrabeobachterstreuung für einige der Versuchsszenarien ermittelt. Diese liegt in einem Wertebereich von ca. $\Delta u'v' = 0,002$. Die Farbraumfehler liegen demnach für die meisten Versuchsszenarien deutlich über der Wahrnehmungsschwelle.

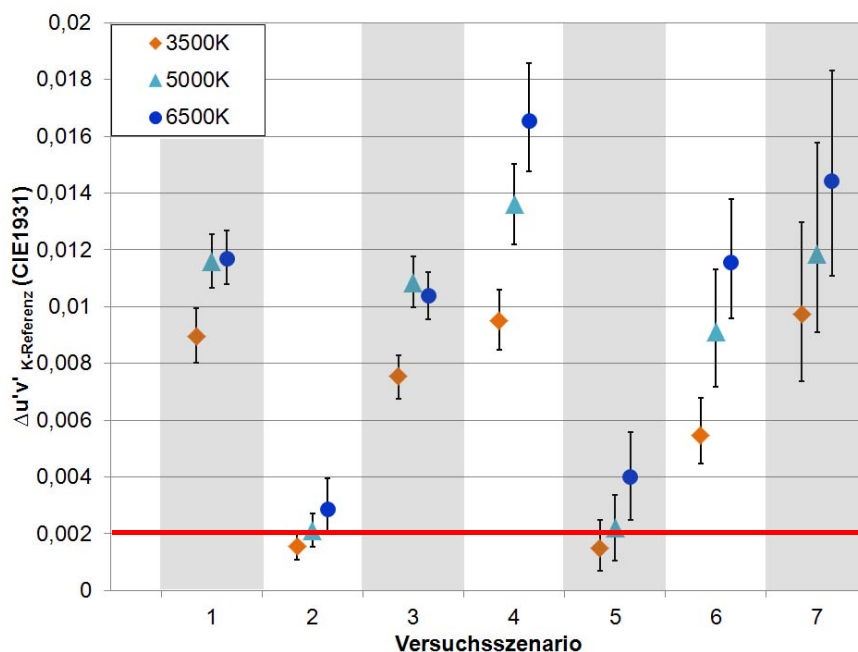


Abbildung 4: Farbraumfehler unter Verwendung der Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931

Im folgenden Schritt wurden die Normspektralwertfunktionen von 1964 und die Spektralwertfunktionen CIE2006-2°/10° getestet. Die Spektralwertfunktionen CIE2006-2°/10° basieren auf den Sehzapfen-Grundfunktionen der CIE Empfehlung CIE170-1:2006 [1] für ein 2°- und ein 10°-Beobachterfeld. Die Diagramme in Abbildung 5 links zeigen die Farbdifferenzen, die sich unter Verwendung der unterschiedlichen Spektralwertfunktionen für die Abgleichergebnisse aus dem 2°-Beobachterfeld ergeben. Die Diagramme rechts zeigen die Farbraumfehler $\Delta u'v'_{G\text{-Referenz}}$ für die Abgleiche aus dem 10°-Beobachterfeld. Mit Hilfe der Spektralwertfunktionen CIE2006-2° können die Farbraumfehler der Abgleichergebnisse aus dem 2°-Beobachterfeld auf Werte unter $\Delta u'v'_{K\text{-Referenz}}$ (CIE2006-2°) = 0,006 reduziert werden. Die Werte liegen für den Großteil der Abgleichergebnisse aber immer noch über der Wahrnehmungsschwelle.

Die Farbraumfehler erreichen unter Verwendung der Spektralwertfunktionen der CIE von 1964 für einen 10°-Standardbeobachter maximal Werte von $\Delta u'v'_{G\text{-Referenz}}$ (CIE1964) = 0,008.

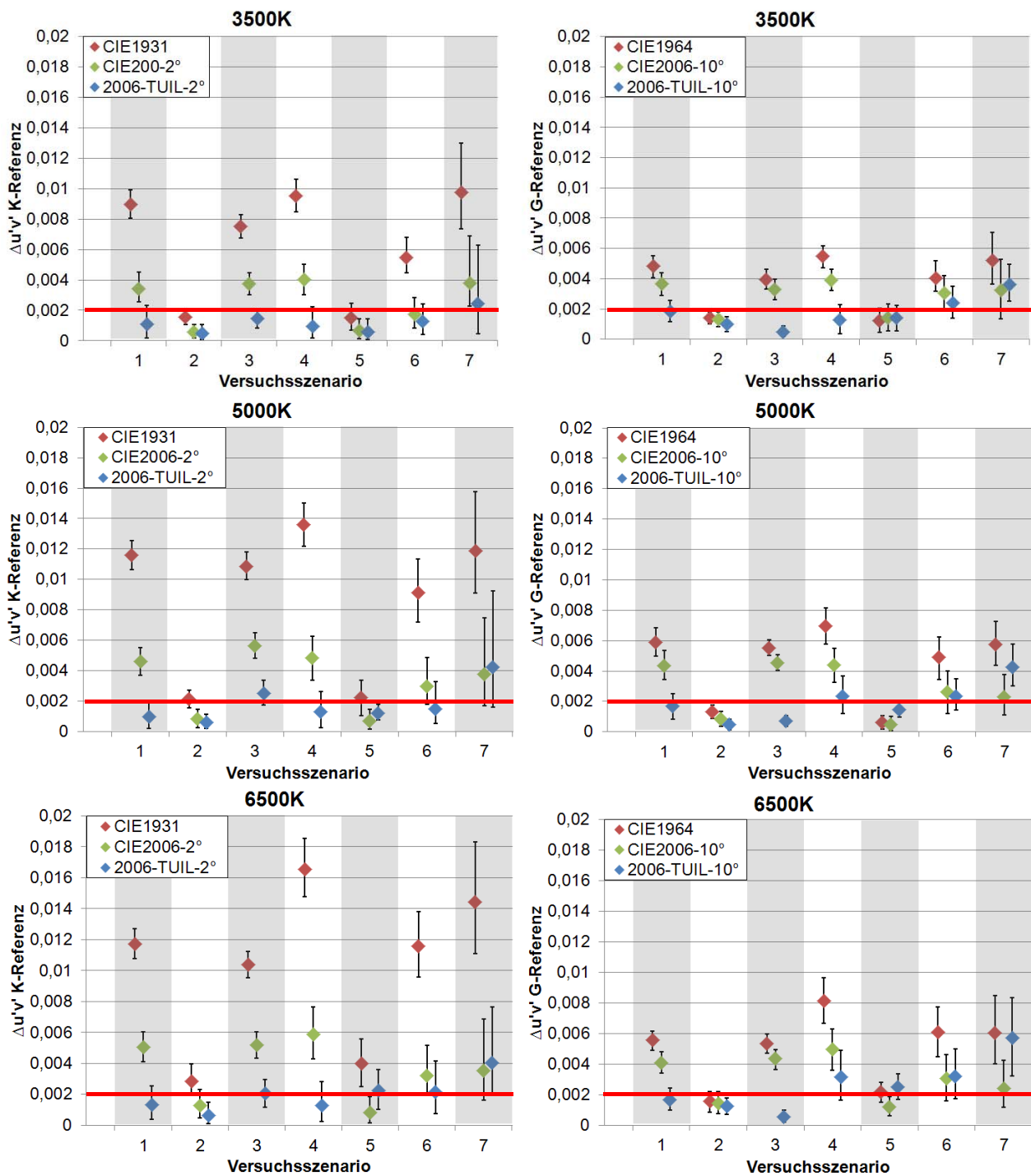


Abbildung 5: Mittelwerte der Farbraumfehler $\Delta u'v'$ _{K/G-Referenz} mit 95%-Konfidenzintervallen unter Verwendung der unterschiedlichen Spektralwertfunktionen.
 links: Farbraumfehler $\Delta u'v'$ _{K-Referenz} für die Farbwahrnehmung im 2°-Beobachterfeld
 rechts: Farbraumfehler $\Delta u'v'$ _{G-Referenz} für die Farbwahrnehmung im 10°-Beobachterfeld

Damit modellieren die Normspektralwertfunktionen von 1964 die Farbwahrnehmung im 10°-Beobachterfeld deutlich besser, als die Normspektralwertfunktionen von 1931 die Farbwahrnehmung im 2°-Beobachterfeld abbilden. Allerdings liegen auch hier die Farbraumfehler deutlich über der Wahrnehmungsschwelle. Daher wurden auch für die Modellierung der Farbwahrnehmung im 10°-Beobachterfeld die Spektralwertfunktionen basierend auf den Sehzapfen-Grundfunktionen der CIE-Empfehlung CIE170:1-2006 für einen 10°-Beobachter untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass zwar für einige Versuchsszenarien eine Verringerung der Farbraumfehler erreicht werden kann. Aber die Farbraumfehler $\Delta u'v'$ G-Referenz (CIE2006-10°) liegen für die Versuchsszenarien VS1, VS3 und VS4 weiterhin über der Wahrnehmungsschwelle mit Werten bis zu 0,005.

Neue Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° für einen 2°- und einen 10°-Beobachter

Nachdem sich bei allen anerkannten Spektralwertfunktionen Farbdifferenzen zwischen den visuell gleich wahrgenommenen Spektren ergaben, wurden zwei neue Sätze Spektralwertfunktionen entwickelt. Diese wurden empirisch mit Hilfe der zuvor erstellten Datenbasis ermittelt und basieren auf den Sehzapfen-Grundfunktionen der CIE Empfehlung von 2006. Lediglich die S-Zapfen-Empfindlichkeitsfunktion wurde um 3 nm hin zu niedrigeren Wellenlängen verschoben. Mit den Gleichungen (1) und (2) können aus den modifizierten $l(\lambda)$ -, $m(\lambda)$ - und $s(\lambda)$ -Funktionen die neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° und 2006-TUIL-10° (Abbildung 6) ermittelt werden.

$$\begin{bmatrix} x_{2006-TUIL-2^\circ}(\lambda) \\ y_{2006-TUIL-2^\circ}(\lambda) \\ z_{2006-TUIL-2^\circ}(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,93556 & -1,39194 & 0,35649 \\ 0,68990 & 0,34832 & 0 \\ 0 & 0 & 1,92567 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} l_{2006-TUIL-2^\circ}(\lambda) \\ m_{2006-TUIL-2^\circ}(\lambda) \\ s_{2006-TUIL-2^\circ}(\lambda) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} x_{2006-TUIL-10^\circ}(\lambda) \\ y_{2006-TUIL-10^\circ}(\lambda) \\ z_{2006-TUIL-10^\circ}(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,91920 & -1,32333 & 0,43000 \\ 0,69284 & 0,34968 & 0 \\ 0 & 0 & 2,13728 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} l_{2006-TUIL-10^\circ}(\lambda) \\ m_{2006-TUIL-10^\circ}(\lambda) \\ s_{2006-TUIL-10^\circ}(\lambda) \end{bmatrix} \quad (2)$$

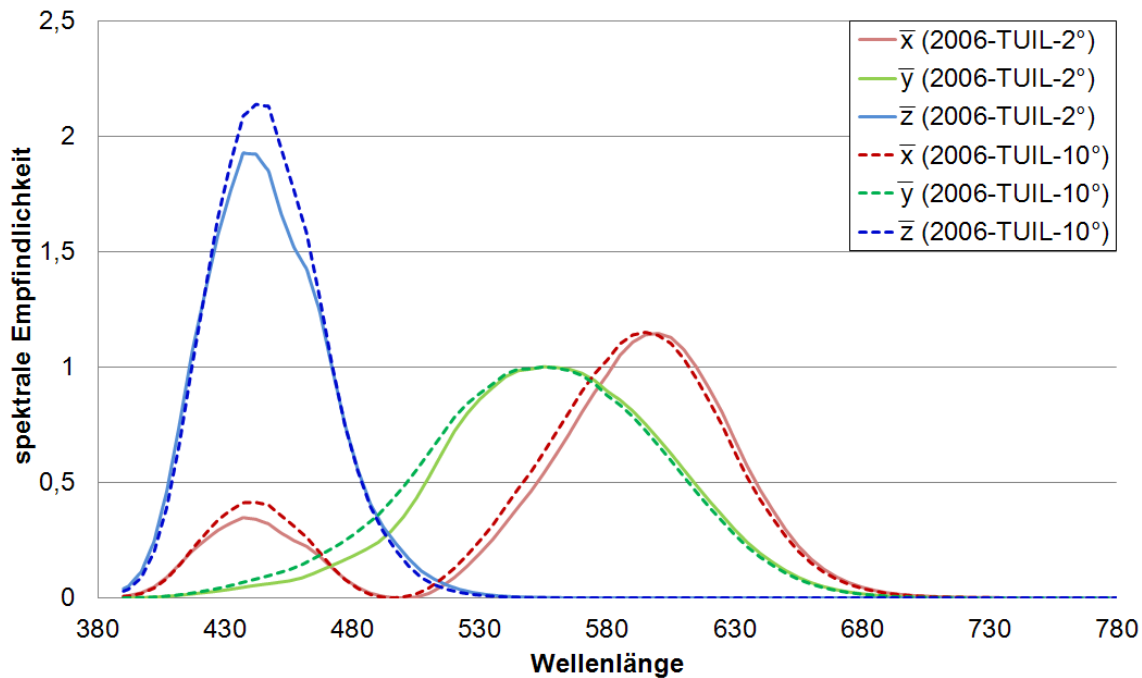


Abbildung 6: Spektrale Empfindlichkeitsfunktionen 2006-TUIL-2° und 2006-TUIL-10° für einen dreißigjährigen Standardbeobachter

Die resultierenden Farbraumfehler, die unter Verwendung der neuen Spektralwertfunktionen ermittelt wurden, sind in Abbildung 5 im Vergleich zu den Farbraumfehlern unter Verwendung der anerkannten Spektralwertfunktionen aufgetragen. Mit Hilfe der neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° können die Farbraumfehler auf eine mittlere Farbdifferenz von $\Delta u'v'_{K/G\text{-Referenz}} = 0,002$ reduziert werden und liegen damit für beinahe alle untersuchten Versuchsszenarien im Bereich der Wahrnehmungsschwelle. Die neuen Spektralwertfunktionen eignen sich demnach gut für die hier untersuchten Spektralzusammensetzungen, um visuell gleich wahrgenommene Spektren auf denselben Farbart abzubilden.

Validierung der neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° mittels Farbdifferenzbewertungen

Die Relevanz der neuen Spektralwertfunktionen für die korrekte Modellierung des Farbsehens wurde mit Hilfe von Farbdifferenzbewertungen validiert. Dabei bewerteten die Probanden die Farbdifferenz zwischen zwei Testfeldern auf einer psychometrischen Rangskala mit Werten von 0 bis 8. Die Skala umfasst eine Abstufung von *'nicht wahrnehmbar'* (0), *'gerade wahrnehmbar'* (2), *'gering'* (4), *'deutlich'* (6) bis *'sehr groß'* (8). Die Spektren der Testfelder wurden mit Hilfe der unterschiedlichen Spektralwertfunktionen auf denselben Farbart eingestellt. Die Untersuchungen wurden mit neun unterschiedlichen Versuchsszenarien an acht verschiedenen Farbörtern mit allen sechs Spektralwertfunktionen durchgeführt. Dabei wurden die Spektralwertfunktionen CIE1931, CIE2006-2° und 2006-TUIL-2° im 2°-Beobachterfeld getestet, während die Spektralwertfunktionen CIE1964, CIE2006-10° und 2006-TUIL-10° in einem 10°-Beobachterfeld zum Einsatz kamen.

Wahrnehmbarkeit der Verringerung der Farbraumfehler

Zunächst wurde mit denselben Versuchsszenarien VS1 bis VS7, an den gleichen Farbörtern und unter denselben Versuchsbedingungen wie bei den Abgleichversuchen überprüft, ob die rechnerisch signifikanten Verringerungen der Farbraumfehler tatsächlich zu einer signifikanten Verringerung der wahrgenommenen Farbdifferenzen führen. 19 der 20 Probanden aus den Abgleichuntersuchungen nahmen an den Tests teil.

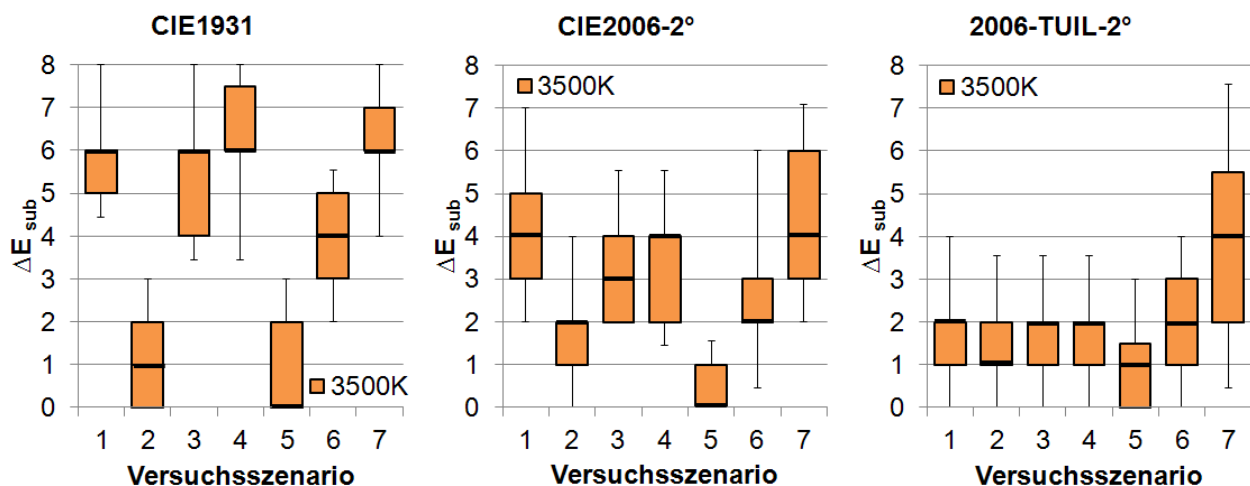


Abbildung 7: Box-Whisker-Plots der Farbdifferenzbewertungen der 19 Testpersonen für die Untersuchungen im 2°-Beobachterfeld bei 3500 K

Das Ergebnis dieser Untersuchungen zeigte, dass die Mediane der wahrgenommenen Farbdifferenzen unter Verwendung der Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° auf Werte im Bereich der Wahrnehmungsschwelle ($\Delta E_{\text{sub}} = 0..2$) reduziert werden konnten.

Unter Verwendung der Normspektralwertfunktionen wurden die Farbdifferenzen dagegen im Mittel als 'klein' bis 'deutlich' ($\Delta E_{\text{sub}} = 4..6$) bewertet. Abbildung 7 zeigt exemplarisch die Box-Whisker-Plots der Farbdifferenzbewertungen der 19 Testpersonen für die Untersuchungen im 2°-Beobachterfeld bei 3500 K. Die visuell wahrgenommenen Farbdifferenzen konnten unter Verwendung der Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° signifikant verringert werden (Signifikanzniveau: $\alpha = 0,025$). Damit wurde gezeigt, dass metamere Spektren, die mit den neuen Spektralwertfunktionen ermittelt werden, bei den Probanden tatsächlich denselben Farbeindruck hervorrufen.

Validierung der neuen Spektralwertfunktionen an anderen Farbörtern

Die neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° wurden empirisch auf Basis der Daten aus den Abgleichergebnissen ermittelt. Mit den zuvor beschriebenen Farbdifferenzbewertungen wurde lediglich die Wahrnehmbarkeit der erzielten Reduzierung der Farbdifferenzen untersucht. Daher wurde in einem weiteren Versuch getestet, ob die neuen Spektralwertfunktionen auch bei anderen Farbörtern unter Verwendung anderer Spektralzusammensetzungen ihre Gültigkeit beibehalten.

Mit drei Versuchsszenarien VS1, VS8 und VS9 (vgl. Tabelle 1) wurden an fünf Farbörtern für gesättigte Lichtfarben Farbdifferenzbewertungen durchgeführt. Die untersuchten Farbörter sind in Abbildung 8 dargestellt. Dabei wurden die beiden Testfelder mit Hilfe der Spektralwertfunktionen der CIE und 2006-TUIL-2°/10° aneinander angepasst. Die Versuchsbedingungen wurden wiederum so gewählt, dass die Leuchtdichte der Umgebungsbeleuchtung 70 cd/m² und auf den Testflächen ca. 132 cd/m² betrug.

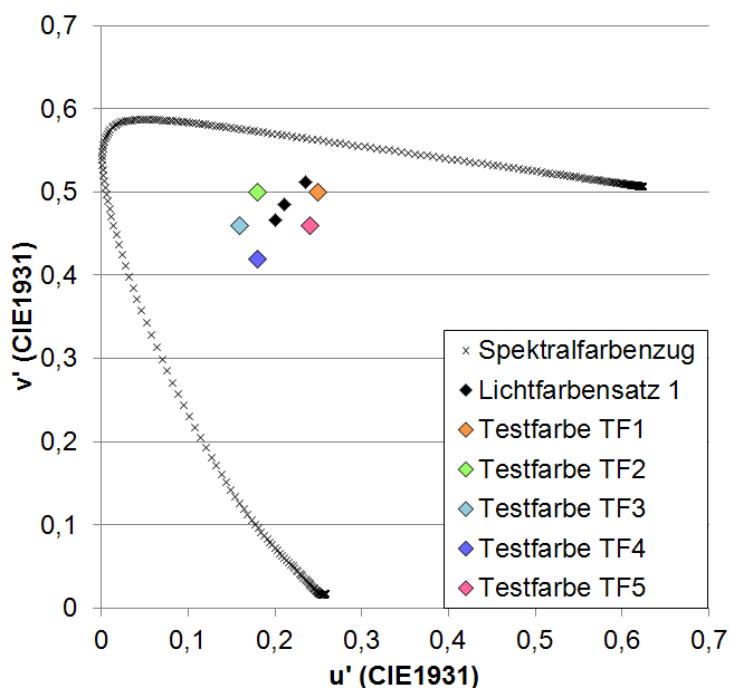


Abbildung 8: Farbörter der Untersuchungen zur Validierung der neuen Spektralwertfunktionen an Farbörtern außerhalb des Planckschen Kurvenzugs

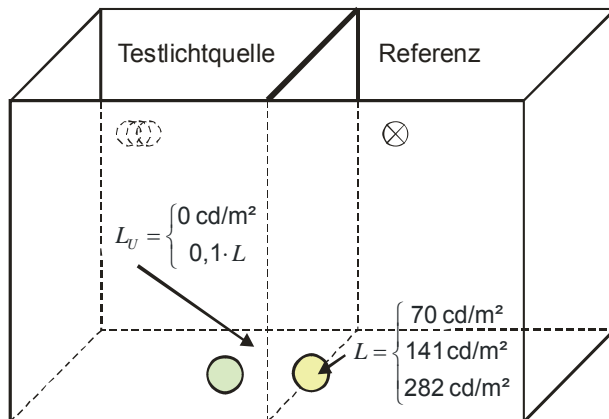
Die Untersuchungen ergaben, dass auch für gesättigte Lichtfarben unter Verwendung der neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° die geringeren Farbdifferenzen wahrgenommen wurden. Die wahrgenommenen Farbdifferenzen unter Verwendung der Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° lagen im Bereich der Wahrnehmungsschwelle ($\Delta E_{\text{sub}} = 0..2$). Für einen Großteil der Versuchsszenarien konnte auch hier eine signifikante Verringerung der wahrgenommenen Farbdifferenzen durch die Verwendung der neuen Spektralwertfunktionen verzeichnet werden. Damit konnte die Relevanz der neuen Spek-

tralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° für die Modellierung der Farbwahrnehmung von gesättigten Lichtfarben nachgewiesen werden.

Validierung mit früheren Untersuchungen

In früheren Untersuchungen an der TU Ilmenau wurden Probandenversuche mit verschiedenen Lichtquellen bei verschiedenen Lichtfarben (CCT) und Beleuchtungs-niveaus (L) mit einem Lichtsimulator für ein 2°-Gesichtsfeld durchgeführt und der Einfluss von Umgebungshelligkeit (L_U) auf den Abgleich identischer Lichtfarben untersucht [3].

Dafür wurden zwei nebeneinanderliegende Boxen im Inneren mit unterschiedlichen Lichtquellen beleuchtet und durch zwei Öffnungen mit einem Beobachtungswinkel von etwa 2° durch Probanden betrachtet (siehe Abbildung 9).



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 Halogenglühlampe mit Tageslichtfilter

Abbildung 9: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus links und Überblick über die Versuchssituationen rechts [3]

Untersucht wurden die relativen Spektralverteilungen der verwendeten Test- und Referenzlichtquellen für die einzelnen Versuchssituationen gemäß Abbildung 10.

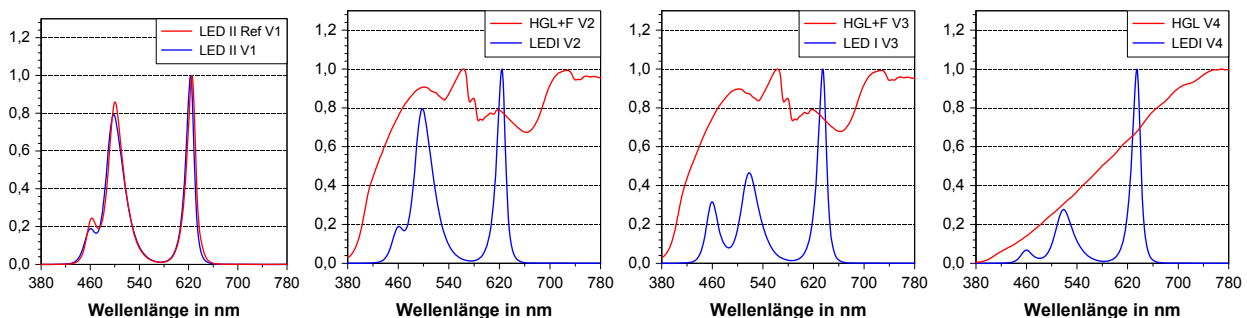
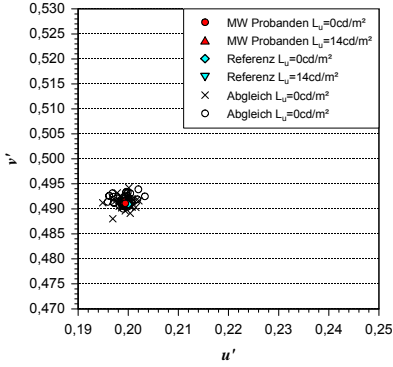


Abbildung 10: Relative Spektralverteilungen der verwendeten Test- und Referenzlichtquellen für die Versuchssituationen V1 bis V4 [3]

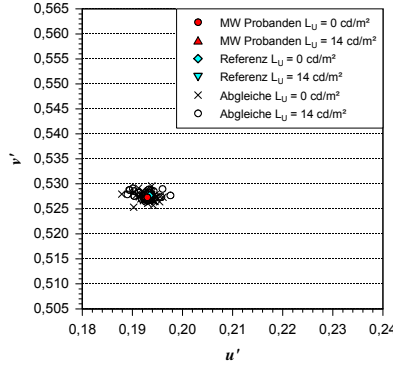
Die Probanden hatten die Aufgabe, die Testlichtquelle subjektiv hinsichtlich Lichtfarbe und Helligkeit an die Referenzbeleuchtung anzupassen. Jede Versuchssituation wurde von den Probanden dreimal abgeglichen. An der Untersuchung nahmen 15 normalfarbsichtige Probanden (davon 7 Frauen) im Alter zwischen 17 und 30 Jahren ($23,7 \pm 2,5$ Jahre) teil.

Sowohl die messtechnisch identische Lichtfarben der Ausgangssituation, als auch die von den Probanden als identisch eingestellte Lichtfarben wurden mit dem Spektralradiometer CS-2000 von Minolta vermessen. Für diese Daten wurden die Spektralwertfunktionen CIE1931, CIE2006-2° und 2006-TUIL-2° getestet. Die Ergebnisse für das Beleuchtungs-niveau $L = 141 \text{ cd/m}^2$ sind in den Diagrammen in Abbildung 11 dargestellt.

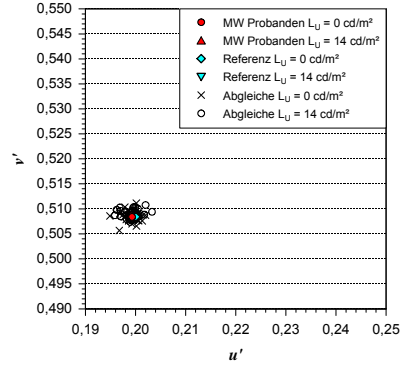
**Abgleich V1: RGB-LED II zu RGB-LED II $L=141\text{cd/m}^2$
CIE1931**



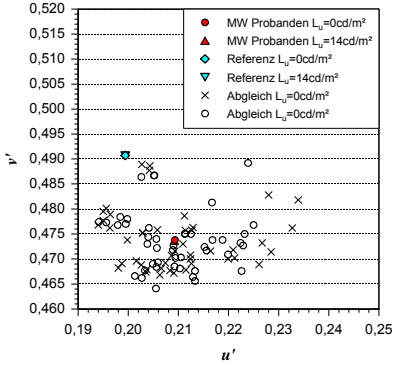
**Abgleich V1: RGB-LED II zu RGB-LED II $L=141\text{cd/m}^2$
CIE2006-2°**



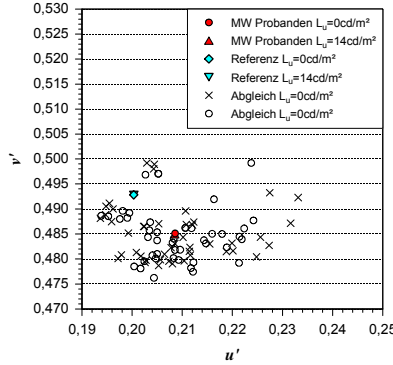
**Abgleich V1: RGB-LED II zu RGB-LED II $L=141\text{cd/m}^2$
2006-TUILL-2°**



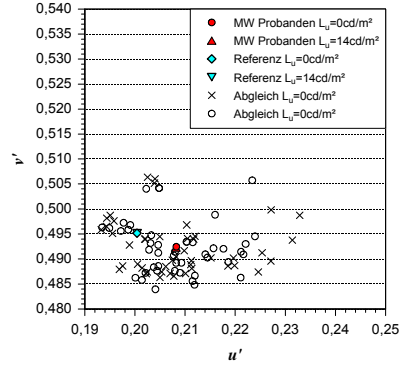
**Abgleich V2: RGB-LED II zu HGL+F $L=141\text{cd/m}^2$
CIE1931**



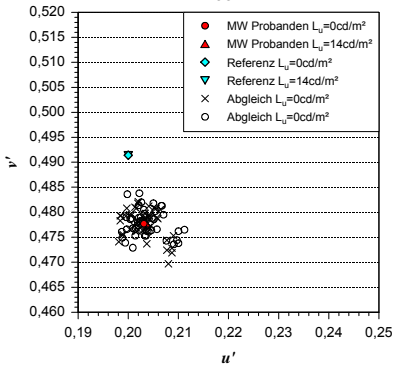
**Abgleich V2: RGB-LED II zu HGL+F $L=141\text{cd/m}^2$
CIE2006-2°**



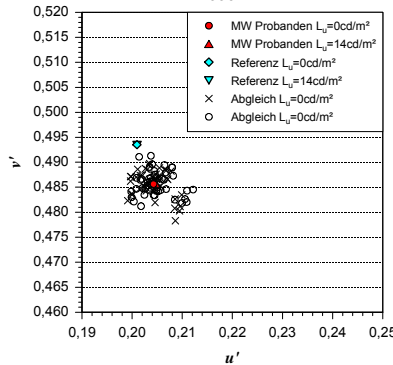
**Abgleich V2: RGB-LED II zu HGL+F $L=141\text{cd/m}^2$
2006-TUILL-2°**



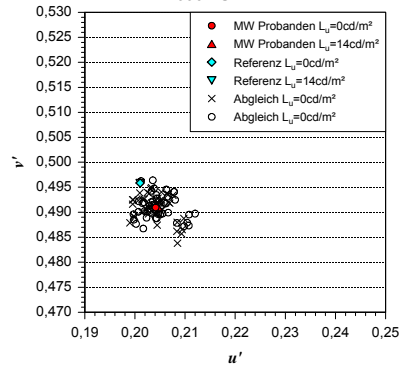
**Abgleich V3: RGB-LED I zu HGL+F $L=141\text{cd/m}^2$
CIE1931**



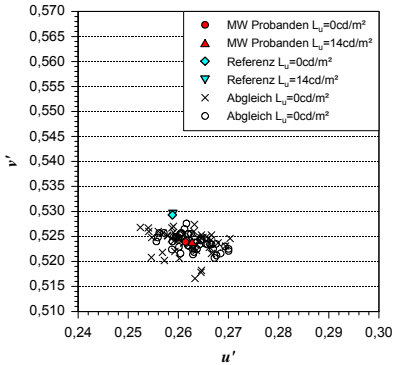
**Abgleich V3: RGB-LED I zu HGL+F $L=141\text{cd/m}^2$
CIE2006-2°**



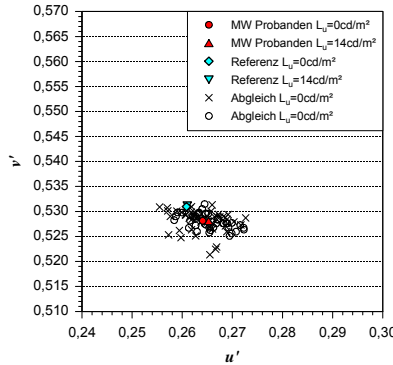
**Abgleich V3: RGB-LED I zu HGL+F $L=141\text{cd/m}^2$
2006-TUILL-2°**



**Abgleich V4: RGB-LED I zu HGL $L=141\text{cd/m}^2$
CIE1931**



**Abgleich V4: RGB-LED I zu HGL $L=141\text{cd/m}^2$
CIE2006-2°**



**Abgleich V4: RGB-LED I zu HGL $L=141\text{cd/m}^2$
2006-TUILL-2°**

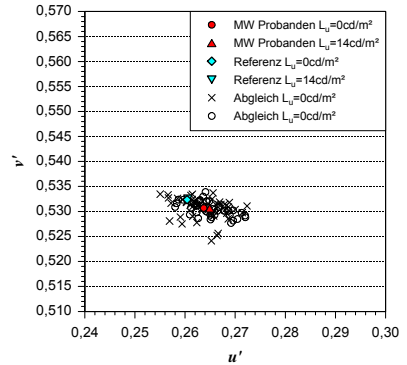


Abbildung 11: Ergebnisse der subjektiven Gleichheit mit verschiedenen Spektralwertfunktionen

Für den Abgleich identischer Spektralverteilungen (V1) zeigen sich keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Spektralwertfunktionen. In der Versuchsreihe V4 werden bei der Bewertung der Ergebnisse mit der Spektralwertfunktionen CIE2006-2° und 2006-TUIL-2° vergleichbare Ergebnisse erreicht, die etwas geringer ausfallen als bei der Anwendung der Normspektralwertfunktion CIE1931. Deutlicher sind die Verbesserungen beim Abgleich mit Spektralverteilungen, die deutliche Unterschiede aufweisen (V2 und V3). Hier kann durch die Anwendung der Spektralwertfunktionen CIE2006-2° und 2006-TUIL-2° im Vergleich zur Normspektralwertfunktion CIE1931 der Farbraumfehler deutlich verringert werden, wobei mit der neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° die besten Ergebnisse erzielt werden. In Tabelle 4 sind die Mittelwerte der Farbraumfehler über alle Versuchssituationen zusammengefasst.

Tabelle 4: Mittelwerte der Farbraumfehler $\Delta u'v'$ (Farbabstand zwischen Referenz und Mittelwert aus den Abgleichen von 15 Probanden) für alle Versuchssituationen bei Anwendung verschiedener Spektralwertfunktionen

CIE1931					
Versuchssituation		V1	V2	V3	V4
$L = 70 \text{ cd/m}^2$	$L_U = 0 \text{ cd/m}^2$	0,0009	0,0211	0,0163	0,0065
$L = 70 \text{ cd/m}^2$	$L_U = 7 \text{ cd/m}^2$	0,0008	0,0205	0,0147	0,0071
$L = 141 \text{ cd/m}^2$	$L_U = 0 \text{ cd/m}^2$	0,0007	0,0196	0,0141	0,0060
$L = 141 \text{ cd/m}^2$	$L_U = 14 \text{ cd/m}^2$	0,0009	0,0197	0,0141	0,0068
$L = 282 \text{ cd/m}^2$	$L_U = 0 \text{ cd/m}^2$	0,0008	0,0173	0,0115	0,0051
$L = 282 \text{ cd/m}^2$	$L_U = 28 \text{ cd/m}^2$	0,0006	0,0190	0,0134	0,0062
CIE2006-2°					
Versuchssituation		V1	V2	V3	V4
$L = 70 \text{ cd/m}^2$	$L_U = 0 \text{ cd/m}^2$	0,0004	0,0122	0,0105	0,0047
$L = 70 \text{ cd/m}^2$	$L_U = 7 \text{ cd/m}^2$	0,0005	0,0119	0,0092	0,0055
$L = 141 \text{ cd/m}^2$	$L_U = 0 \text{ cd/m}^2$	0,0006	0,0113	0,0086	0,0043
$L = 141 \text{ cd/m}^2$	$L_U = 14 \text{ cd/m}^2$	0,0004	0,0114	0,0086	0,0053
$L = 282 \text{ cd/m}^2$	$L_U = 0 \text{ cd/m}^2$	0,0007	0,0093	0,0064	0,0038
$L = 282 \text{ cd/m}^2$	$L_U = 28 \text{ cd/m}^2$	0,0004	0,0107	0,0080	0,0050
2006-TUIL-2°					
Versuchssituation		V1	V2	V3	V4
$L = 70 \text{ cd/m}^2$	$L_U = 0 \text{ cd/m}^2$	0,0004	0,0082	0,0076	0,0040
$L = 70 \text{ cd/m}^2$	$L_U = 7 \text{ cd/m}^2$	0,0006	0,0083	0,0065	0,0049
$L = 141 \text{ cd/m}^2$	$L_U = 0 \text{ cd/m}^2$	0,0008	0,0083	0,0058	0,0037
$L = 141 \text{ cd/m}^2$	$L_U = 14 \text{ cd/m}^2$	0,0008	0,0083	0,0060	0,0048
$L = 282 \text{ cd/m}^2$	$L_U = 0 \text{ cd/m}^2$	0,0010	0,0071	0,0040	0,0035
$L = 282 \text{ cd/m}^2$	$L_U = 28 \text{ cd/m}^2$	0,0007	0,0078	0,0053	0,0046

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden neue Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° vorgestellt, die eine korrekte Modellierung der Farbwahrnehmung der untersuchten Probandengruppe erlauben. Diese sind für die korrekte Bewertung der farbmatischen Eigenschaften von LED-Lichtquellen geeignet und ermöglichen damit eine korrekte Charakterisierung von LED-Lichtquellen und damit auch die korrekte Ansteuerung von LED-Beleuchtungssystemen.

Wichtig wäre es diese neuen Spektralwertfunktionen mit einer größeren Probandenanzahl und in realen Beleuchtungssituationen weiter zu verifizieren. Zu beachten ist, dass alle Spektralwertfunktionen immer nur für eine definierte Beobachterfeldgröße gelten. Da bei der homogenen Flächenbeleuchtung meistens eine Fläche unter verschiedenen Beobachterwinkeln betrachtet wird, muss neben der Verwendung der korrekten Spektralwertfunktionen darauf geachtet werden den Einfluss der Beobachterfeldgröße zu minimieren. Dies kann erreicht werden, indem man die miteinander verwendeten Spektren speziell selektiert. Zu diesem Zweck kann der „Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit“ [2] angewandt werden, der von einer der Autorinnen auf der CIE-Tagung in Paris 2013 vorgestellt wurde. Weitere kritische Faktoren die untersucht werden sollten, sind die Einflüsse großer Interbeobachterstreuungen und der Einfluss des Alters auf das Farbsehen. Hier muss untersucht werden, ob die in der CIE-Empfehlung CIE170:1-2006 modellierten Alterseinflüsse ausreichen. Diese könnten einfach in neuen Spektralwertfunktionen mit eingerechnet werden.

Danksagung

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



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Referenzen

- [1] TC1-36, *CIE170-1:2006: Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes - Part 1*, Commission Internationale de l'Eclairage, 2006
- [2] Polster, S., Schierz, C.: *Towards a Field Size Independent Metamerism*, Proceedings of CIE Centenary Conference „Towards a New Century of Light“, 2013, Paris, S.456-464
- [3] Hofmann, F.; Bieske, K., Schierz, C.: *Subjektive Bewertung von Lichtfarbunterschieden für den 2°-Normalbeobachter bei messtechnisch identischer Beleuchtung*, Tagungs-CD Tagung „Licht 2010“, 2010, Wien