
Aktuelle Entwicklungen auf dem Gebiet der Farbmessung von Lichtquellen

Steffen Görlich*

Der vorliegende Artikel behandelt zwei aktuelle Themen der Farbmessung von Lichtquellen. Es handelt sich zum einen um die Entwicklung und den Test von neuen Spektralwertfunktionen und zum anderen um die Definition von neuen Berechnungsverfahren für die Farbwiedergabe. Dabei wird bei beiden Themen zunächst die historische Entwicklung erläutert, um dann auf die aktuellen Probleme und deren Lösungsansätze einzugehen.

1 Entwicklung und Test neuer Spektralwertfunktionen

Die Farbmessung in industriellen und anderen gewerblichen Anwendungen beruht seit mehr 80 Jahren auf den CIE Spektralwertfunktionen von 1931. Diese wurden aufgrund von Untersuchungen von Wright und Guild [1] auf einer CIE-Beratung am 18. September 1931 in Cambridge verbindlich festgelegt und werden bis heute unverändert eingesetzt.

* Dr. Steffen Görlich, JETI Technische Instrumente GmbH, D-07745 Jena

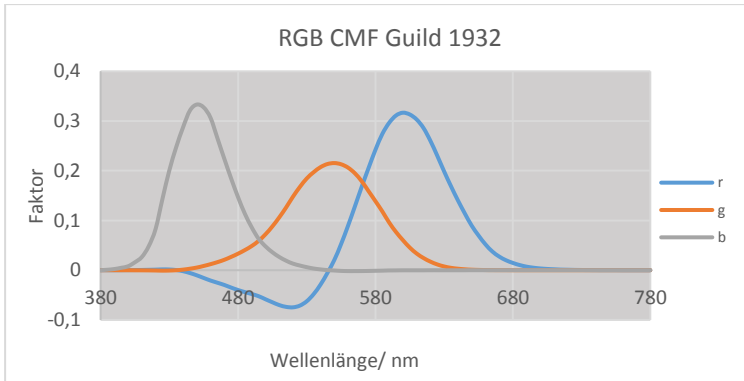


Bild 1. RGB Spektralwertfunktionen von Guild (publiziert 1932) [2]

Das menschliche Farbsehen beruht auf drei Typen von Empfängern (Zapfen) in der Netzhaut (kurz-, mittel- und langwellig).

Die Experimente von Wright und Guild bestanden darin, dass Testpersonen Spektralfarben von 380 (400) nm bis 700 nm in Schritten von 5 bzw. 10 nm durch eine Kombination von drei Primärfarben mit den Wellenlängen 435,8 nm, 546,1 nm und 700 nm nachzubilden hatten. Man stellte eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse beider Forscher fest und bildete daraus die Spektralwertfunktionen $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ und $b(\lambda)$. Während der Versuche stellte sich heraus, daß die Probanden bei bestimmten Wellenlängen keine Kombination aus den drei Primärfarben finden konnten, um das monochromatische Licht nachzubilden (445 ... 525 nm). Man behalf sich damit, auf der Seite der Testlichtquelle einen Rotanteil zuzumischen. Dadurch entstanden im Verlauf der rgb-Spektralwertfunktionen negative Bereiche (siehe Bild 1). Durch eine Matrixtransformation wurde das bekannte XYZ-System geschaffen. Die Transformation wurde so angelegt, daß folgende Bedingungen erfüllt wurden:

- keine negativen Werte
- y-Werte der Funktion sind mit der bereits 1924 definierten $V(\lambda)$ -Kurve identisch
- xyz-Werte für den energiegleichen Strahler sind identisch
- z-Kurve enthält im langwelligen Bereich nur Nullen

Es ist davon auszugehen, dass all diese Einschränkungen heute so nicht mehr definiert werden würden.

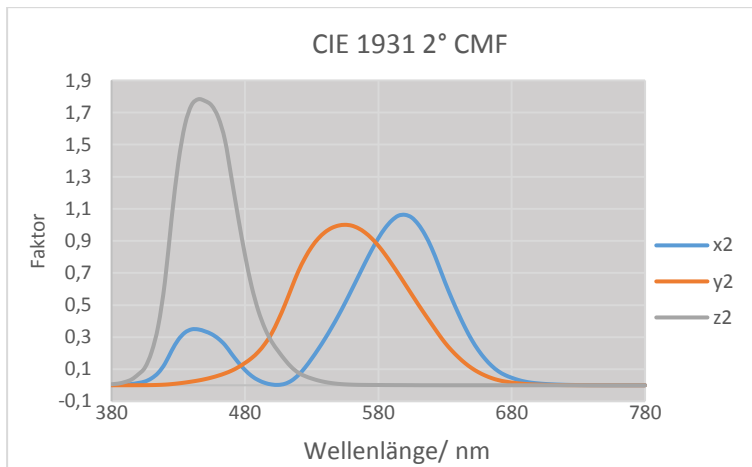


Bild 2. 2° XYZ CIE Spektralwertfunktionen von 1931 [3]

Die praktische Realisierung dieser Spektralwertfunktionen zur messtechnischen Umsetzung erfolgt in zwei verschiedenen Techniken: Bei Filtergeräten (Kolorimeter) werden die Kurven hardwaremäßig durch geeignete Filter nachgebildet, die in Kombination mit der Empfängerempfindlichkeit möglichst genau die Kurvenverläufe widerspiegeln sollen. Spektroradiometer hingegen messen das komplette Spektrum der Lichtquelle und anschließend wird dieses mit den drei Spektralwertfunktionen rechnerisch gewichtet. Dadurch ergibt sich eine größere Genauigkeit (kein Anpassungsfehler wie bei Filtergeräten) sowie die einfache Möglichkeit der Veränderung der verwendeten

Spektralwertfunktionen. Die nachfolgenden Berechnungen, beispielsweise der Farbkoordinaten xy oder $u'v'$, erfolgt dann bei beiden Geräteklassen in gleicher Weise.

Bereits in den 1950er Jahren stellte man fest, dass Messungen, die auf den Spektralwertfunktionen von 1931 basieren, oft nicht mit visuellen Gegebenheiten übereinstimmen. Einerseits wurden daraufhin Funktionen für den 10° Beobachter (1964) festgelegt (aufgrund der unterschiedlichen Rezeptordichte auf der Netzhaut), andererseits begann man aber auch, die 2° -Funktionen zu modifizieren. Bekannte Beispiele dafür sind die Daten von Stiles/Burch (2° - 1955 und 10° - 1959) sowie von Judd (1951), die von Vos 1978 modifiziert wurden. Die folgende Bild zeigt eine Auswahl davon. Man erkennt, dass die wesentlichen Unterschiede im blauen Wellenlängenbereich liegen.

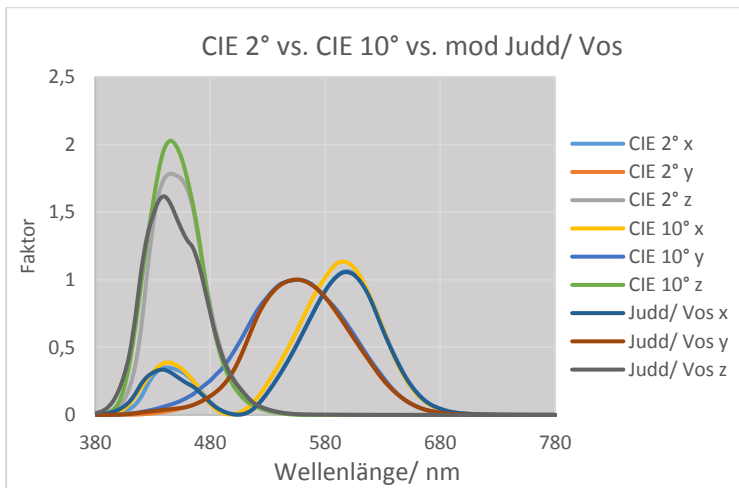


Bild 3. 2° und 10° CIE Spektralwertfunktionen im Vergleich mit den Judd/ Vos Daten für 2°

Diese Untersuchungen erfolgten hauptsächlich aus wissenschaftlichen Gründen. In den praktischen Anwendungen erfüllte die CIE-Farbmessung von 1931 ihren Zweck. Bis in die 1990er

Jahre hinein waren deshalb die Probleme der Farbmessung von Lichtquellen nur für die Spezialisten von Interesse. Die damaligen Lichtquellen waren fast ausschließlich Glüh- und Halogenlampen sowie Entladungs- und Leuchtstofflampen und im Bereich der Displaytechnik waren die Kathodenstrahlröhre üblich. Im Gegensatz dazu bestimmen heute LED-basierte Lichtquellen die moderne Beleuchtungstechnik. Im Displaybereich herrscht eine Vielfalt an Technologien vor, die sehr unterschiedliche Spektren erzeugen (LCD mit CCFL, LED und Quantum dot backlight, Plasma, OLED). Aufgrund dieser Entwicklung wurden die bestehenden Probleme in der Farbmesstechnik immer bedeutender für die Industrie. Es wurden bei verschiedenen Lichtquellen Widersprüche der Farbmessung zur visuellen Empfindung festgestellt.

Beispielsweise stellte Polster [4] bei Bewertungsexperimenten von LED-Lichtquellen Abweichungen von bis zu 0,0165 im u^*v^* -Farbraum fest. Die Erkennbarkeitsschwelle liegt hier bei 0,0004 bis ca. 0,002, also deutlich niedriger. Visuell gleich erscheinende Spektren können auf unterschiedliche Farborte (xy oder u^*v^*) abgebildet werden und umgekehrt, unterschiedliche Spektren mit gleichen Farborten (metamere Spektren) können unterschiedlich aussehen.

Es stellte sich zudem heraus, dass das individuelle Empfinden eines Menschen stark von vereinheitlichten Spektralwertfunktionen abweichen kann. Allerdings sind individuelle Spektralwertfunktionen nicht praxistauglich, da die meisten Lichtsituationen (z.B. Beleuchtung oder Monitoreinstellung) nicht für einen speziellen Beobachter zugeschnitten werden können. Einen signifikanten Einfluss auf die Farbwahrnehmung hat aufgrund der sich verändernden Transmission der Augenlinse das Alter des Beobachters. Allerdings ergeben sich aufgrund der Lebensweise usw. aber auch hier wieder individuelle Unterschiede. Außerdem spielen die Versuchsbedingungen bei Vergleichsexperimenten eine große Rolle, insbesondere die verwendete Leuchtdichte. Das trifft sowohl auf die Leuchtdichte des Testfeldes als auch auf die des Hintergrundes zu.

Eine typische Anwendung der LED-Beleuchtungstechnik ist, das Leuchten oft aus verschiedenen LED-Modulen zusammengesetzt werden, zum Beispiel bei der Innenbeleuchtung von Flugzeugkabinen. Die hier eingesetzten LEDs werden nach CIE 1931 2°-basierten Messungen klassifiziert. Oft treten dabei trotz enger Klassifizierungsgrenzen deutlich sichtbare Farbunterschiede auf. Im Displaybereich besteht beispielsweise das Problem, daß ein auf Neutralweiß D65 entsprechend CIE 1931 eingestellter OLED Monitor deutlich grünlich aussehen kann oder daß Displays verschiedener Technologien nach sorgfältigem Abgleich deutlich unterschiedlich erscheinen können.

Die Verwendung der Daten des 10° Beobachters verschafft in vielen Fällen eine Verbesserung, löst aber das Problem nicht. Nichtsdestotrotz werden aufgrund des Interesses aus der Industrie weltweit seit Jahren Untersuchungen vorgenommen, um die bestehenden Spektralwertfunktionen bezüglich ihrer Übereinstimmung mit dem visuellen Empfinden bei modernen Lichtquellen, insbesondere LED-Lampen, zu verbessern. Es wurden die vorhandenen älteren Forschungsergebnisse aufgegriffen und entsprechend den modernen Erkenntnissen modifiziert. 2006 und 2015 wurde von der CIE eine zweiteilige Publikation veröffentlicht [5], die auf den 10° Daten von Stiles/ Burch beruhen und von Stockman/ Sharpe unter Berücksichtigung der modernen Erkenntnisse angepasst wurden. Die Spektralwertfunktionen können für jeden Winkel zwischen 1° und 10° bestimmt werden, ebenso kann das Lebensalter des Beobachters rechnerisch berücksichtigt werden.

Von OSRAM wird beispielsweise bereits das Binning von LEDs entsprechend dem CIE 2006/ 2015 Farbraum, gerechnet auf den 10° Beobachter und mit CIE 1976 UCS Transformation, angeboten. Damit verbessert sich die visuelle Vergleichbarkeit der Module deutlich. Selbstverständlich ist das Umstellen eines ganzen Industriezweiges auf eine neue Berechnung ein langwieriges Unterfangen.

Außerdem müssen zur Verwendung neuer Spektralwertfunktionen für die Messung immer Spektroradiometer eingesetzt werden, da man die Datensätze hier in der Software ändern kann. Filtermessgeräte können nicht einfach „umprogrammiert“ werden, bei ihnen muss die

Filteranpassung hardwaremäßig vorgenommen werden. Möglicherweise kommen aber solche modifizierten Geräte in Zukunft auf den Markt, wenn die entsprechende Akzeptanz neuer Spektralwertfunktionen gegeben ist.

Schon bald nach Erscheinen dieser CIE-Publikation wurden wieder Probleme in der Übereinstimmung mit der visuellen Erscheinung, insbesondere bei RGB-LEDs festgestellt, wiederum insbesondere im blauen Bereich des Spektrums. Daraufhin wurden Modifizierungen der Daten veröffentlicht, zunächst durch Csuti/ Schanda [6] und später durch Polster [4]. Diese Modifikationen beruhen hauptsächlich auf einer Verschiebung der Kurve für die kurzwelligen Zapfen. Dabei wurden diese von Csuti/ Schanda um 6 nm ins kurzwellige verschoben, um dann von Polster wieder um ca. 3 nm zurückgeschoben zu werden.

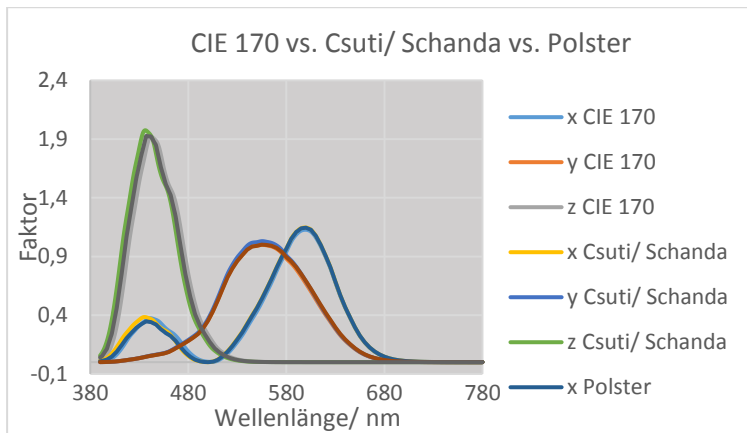


Bild 4. CIE 170 Spektralwertfunktionen im Vergleich zu den Modifizierungen von Csuti/ Schanda [6] und Polster [4], jeweils für 2°

Neuere Untersuchungen ergaben, dass die visuellen Anpassungsprobleme durch die Anwendung neuer Spektralwertfunktionen deutlich gemildert, aber immer noch nicht vollständig gelöst werden können. Das zeigt sich insbesondere bei der

Kalibrierung von Displays. Wie sich herausstellte, erweisen sich unterschiedliche Displaytypen auch unterschiedliche Datensätze als beste Lösung. So ließ sich beispielsweise ein OLED- Bildschirm mit den 2° Daten von Polster am besten abgleichen, während für einen Plasma-Bildschirm die 2° Daten von Csauti/ Schanda geeignet waren [7]. Somit kann bisher keine der neuen Spektralwertfunktionen als universelle Lösung für die aktuellen Probleme in der Farbmestechnik angegeben werden.

Die folgende Bild zeigt die Farbwerte einer weißen LED, die mit den verschiedenen Spektralwertfunktionen aus dem Spektrum berechnet wurden. Man erkennt für beide Koordinaten deutliche Unterschiede, die auch visuell klar erkennbar sind.

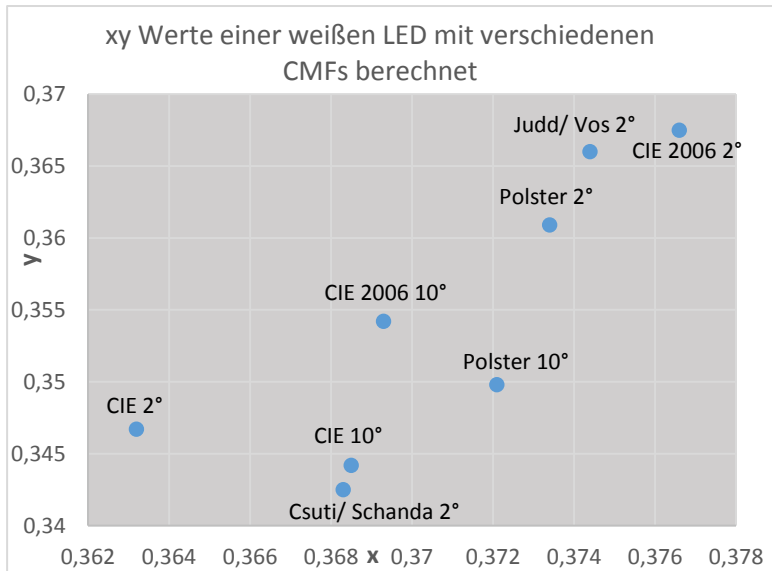


Bild 5. xy Werte einer weißen LED (verwendet in Abschnitt 2), berechnet mit verschiedenen Spektralwertfunktionen

2 Neue Berechnungssysteme für die Farbwiedergabe

Der erste Versuch zur Charakterisierung der Farbwiedergabe von Lichtquellen wurde in den 1940er Jahren auf Basis einer Spektralbandmethode unternommen. Dabei wurde das Spektrum der Testlichtquelle in 8 Spektralbänder aufgeteilt und anschließend diese mit denen einer Referenzlichtquelle verglichen. Es stellte sich aber heraus, dass diese Methode im Vergleich zu visuellen Untersuchungen keine gute Korrelation erzielen konnte.

Daraufhin wurde das Konzept des Farbwiedergabeindex entwickelt und schließlich 1965 durch die CIE in der Schrift Nr. 13 definiert (Color Rendering Index, CRI), welche bis heute bis auf kleine Änderungen gültig ist [8].

Der Farbwiedergabeindex gibt an, wie gut eine Lichtquelle einen definierten Satz von 14 bzw. 15 reflektierenden Objektfarben im Vergleich zu einer Referenzlichtquelle wiedergibt, d.h. wie groß die sich ergebende Farbdifferenz bei den verschiedenen Testobjekten ist. Diese Testfarben stammen im Wesentlichen aus dem Munsell-Farbatlas (TCS 1 ... 14/ 15) und liegen als Reflexionsspektren vor. Die Berechnung beruht auf dem gemessenen Spektrum der Lichtquelle und erfolgt in folgenden Schritten:

Berechnung des Farbortes uv und der Farbtemperatur (CCT) der Lichtquelle (die CRI-Berechnung erfolgt nur, wenn sich der Farbort im uv -Diagramm maximal 0.0054 (D_{uv}) vom Planckschen Strahler befindet).

Berechnung des Spektrums der Referenzlichtquelle mit gleicher CCT wie die Testlichtquelle (CCT < 5000 K – Verwendung Planckscher Strahler. > 5000 K – Verwendung Tageslichtphasen)

Berechnung der Normfarbwerte XYZ der Testfarben bei Beleuchtung mit Test- und Referenzspektrum, anschließende Transformation in den CIE 1960 uv Farbraum und das CIE 1964 $W*U*V*$ System

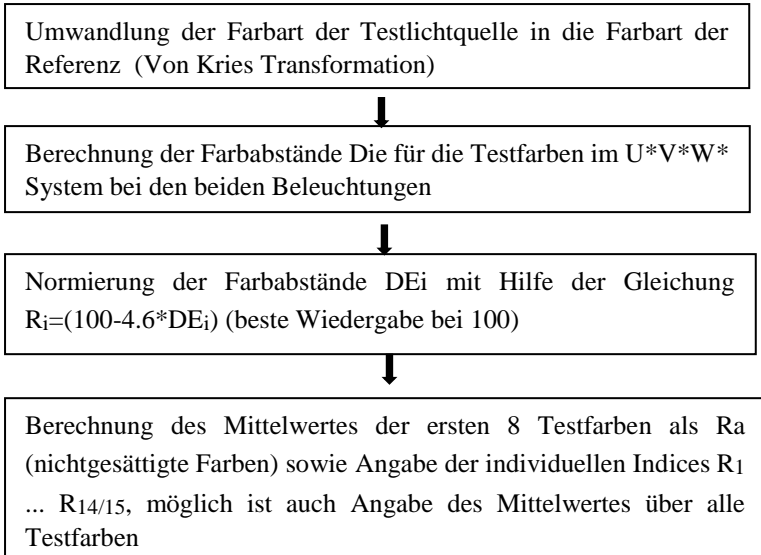


Bild 6. Ablauf der Berechnung des Farbwiedergabeindex (CRI)

Aus Gründen der Vereinfachung wird bei Lichtquellen fast immer nur der allgemeine Farbwiedergabeindex R_a angegeben.

Die folgende Bild zeigt den CRI für die weiße LED aus Bild 5. Es ergibt sich ein R_a von 81 und stark von den anderen Werten abweichender R_9 .

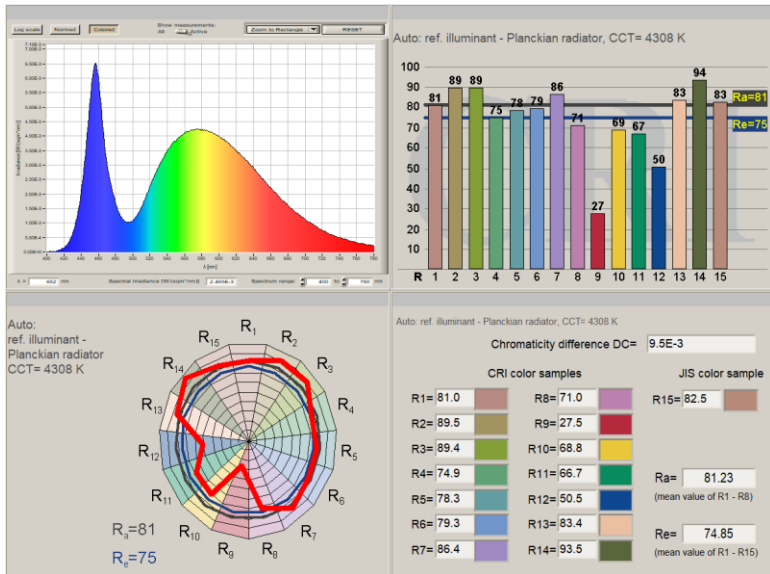


Bild 7. Farbwiedergabeindex CRI der weißen LED

Mit dem Aufkommen von Beleuchtungen auf LED-Basis erwies sich sehr schnell, daß deren Farbwiedergabebewertung durch diese Berechnungsmethode in einigen Fällen im Gegensatz zum visuellen Empfinden steht. So kann es vorkommen, daß sowohl RGB- als auch leuchtstoffkonvertierte LEDs im Vergleich mit anderen Lichtquellen mit einer visuell guten Farbwiedergabe einen schlechten Ra Wert aufweisen und umgekehrt.

Die Gründe dafür sind vor allem Folgende:

- Die Berechnung beruht auf einer kleinen Anzahl von Oberflächenfarbmustern, die zudem kein repräsentativer Ausschnitt der in der realen Welt vorkommenden Farben sind.
- Die Referenzquelle weist bei 5000 K eine Unstetigkeit auf.
- Die Mittelwertbildung für Ra führt zu einem Informationsverlust. Außerdem können nichtgesättigte Farben die Farbwiedergabe von Lichtquellen mit schmalbandigen Anteilen (z.B. RGB-LED) nicht widerspiegeln.

- R_a ist unterschiedlich empfindlich auf spektrale Störungen im Beleuchtungsspektrum.
- Die von Kries-Transformationsmethode weist bei größeren Adaptationsunterschieden große Fehler auf.
- Es wird zur Berechnung der veraltete $U^*V^*W^*$ Farbraum angewandt, dieser ist visuell nicht gleichabständig.

Aus diesen Gründen wurden seit 1967 eine Reihe von neuen Berechnungen für ein verbessertes System als Nachfolge des CRI vorgeschlagen. Das sind unter anderem:

- Colour Flattery Index
- Colour Preference Index
- Colour Discrimination Index
- R96a
- RCRI (Ratingskala-Index)
- CQS (Color Quality Scale)
- TM 30-15
- GAI (Gamut Area Index)
- TLCI 2012/ TLMF 2013 (kamerabezogene Indices)
- CIE 2017 (Farbtreueindex zur genauen wissenschaftlichen Anwendung)
- CRI-CAM02UCS
- CRI2012

Aus dieser Auflistung wird ein weiteres Problem klar: Seit langem wird der Begriff Farbwiedergabe (Color Rendering) verwendet, um den Grad der Übereinstimmung der visuellen Erscheinung von Objekten bei Beleuchtung mit dem Testspektrum und einem Referenzspektrum zu beschreiben. Viele vorgeschlagene Berechnungsmethoden beziehen sich aber auch auf Angaben zur empfundenen Qualität der Lichtquelle. In diesem Zusammenhang hat sich in der Praxis auch herausgestellt, daß der Farbwiedergabeindex oft auch als eine Angabe zur Farbqualität fehlinterpretiert wurde. Deshalb benutzt man neuerdings statt diesem Begriff das Wort Farbtreue (Color Fidelity). Angaben zur Farbqualität werden mit dem Begriff Farbpräferenz bezeichnet.

Die in den vergangenen Jahren vorgeschlagenen Berechnungsmethoden zur Farbwiedergabe beruhen auf dem gleichen

Prinzip wie der CIE-CRI, d.h. virtuelle Beleuchtung einer Reihe von Oberflächenfarben durch Test- und Referenzspektrum und Ermittlung der Farbdifferenzen zur Berechnung des Endergebnisses. Die Verbesserungen zum CIE-CRI bestehen vor allem in der Auswahl der Farbmuster, der Wahl des Farbraumes zur Berechnung, der Art der Farbdifferenzberechnung sowie der besseren Berücksichtigung von Adaptionseffekten.

Der CQS verwendet beispielsweise nur gesättigte Testfarben. Dadurch erreicht man, daß dieser Index für ungesättigte Farben als genaue Farbtreuemetrik fungiert und für gesättigte Farben deutlich besser mit dem visuellen Empfinden übereinstimmt als der CIE-CRI. Die Methode bewertet die Erhöhung der Sättigung durch die Testlichtquelle nicht negativ. Durch diese Maßnahmen wird dieser Index allerdings zu einer kombinierten Farbwiedergabe-Farbpräferenz-Metrik [9]. Weiterhin führt der CQS einen CCT-Faktor ein, um das Endergebnis für Farbtemperaturen unter 3000 K besser dem visuellen Empfinden anzupassen. Statt des veralteten $W^*U^*V^*$ -Farbraums wird der modernere CIELAB-Farbraum verwendet. Die von Kries Methode zur chromatischen Adaption wurde durch die modernere Methode CMCCAT2000 abgelöst. Schließlich wurden negative Einzelwerte durch einen mathematischen Kniff vermieden und als Methode zur Berechnung des Gesamtwertes (hier Q_a genannt) wurde der quadratische Mittelwert verwendet.

In der folgenden Bild ist der CQS für das gleiche LED-Spektrum dargestellt wie beim CRI. Der Q_a -Wert (Analogon zum R_a -Wert) beträgt 74. Man erkennt bei den einzelnen Indices, daß kein Wert mehr stark abweicht, wie es beim CRI war.

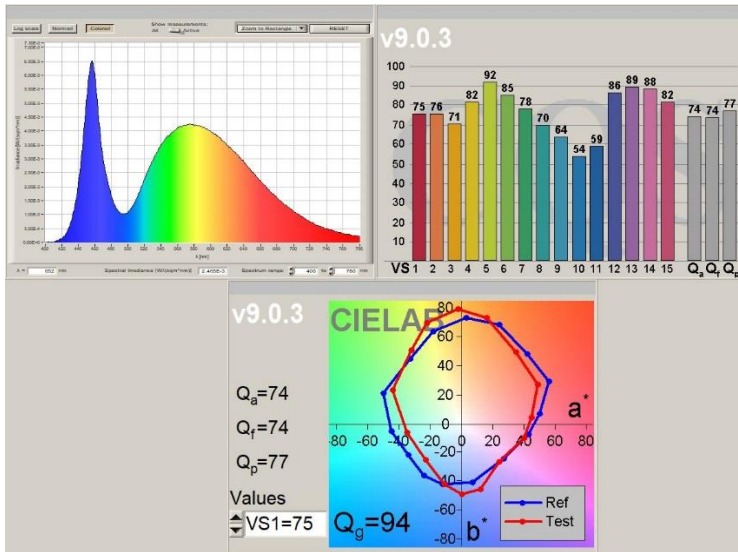


Bild 8. Color Quality Scale (CQS) der weißen LED

Beim TM-30-15 [10] werden 99 virtuelle Oberflächenfarben verwendet, die aus einer Sammlung von 105 000 Reflexionsspektren so herausgesucht wurden, daß sie alle möglichen Farben von realen Objekten bestmöglich widerspiegeln. Diese werden zur Wahrung der Übersichtlichkeit in 16 Klassen (bins) zusammengefaßt. Der Index liefert zwei Maßzahlen, den Wiedergabeindex R_f und den Farbraum (Gamut)-Index R_g . Die Referenzspektren werden wie beim CRI durch den Planckschen Strahler und Tageslichtspektren berechnet. Im Bereich von 4500 bis 5500 K wird eine proportionale Mischung aus beidem verwendet, um die beim CRI auftretende Unstetigkeit zu vermeiden. Zur Berechnung wird das CIECAM02-Farbwiedergabemodell verwendet. Dieses benutzt ein komplexeres Beobachtungsfeld, bei dem auch Adaptionseffekte infolge von Hintergrundeffekten berücksichtigt werden. Die verwendete chromatische Adaptionstransformation erfolgt in zwei Farbräumen.

Der finale Farbwiedergabeindex R_f wird wieder als skaliertes arithmetisches Mittelwert der Farbdifferenzen der 99 Testfarben, beleuchtet mit Test- und mit Referenzspektrum, berechnet. Dieser Wert hat einen zum CRI vergleichbaren Maßstab.

Der Farbraum-Index R_g wird aus dem Verhältnis der Flächen berechnet, die bei Beleuchtung der 99 Testfarben mit Test- und Referenzspektrum im (a^*b^*) Farbraum entstehen.

Die folgende Bild zeigt die wesentlichen Ergebnisse der TM-30-15 Berechnung des gleichen Spektrums. Der R_f -Wert (Analogon zum R_a bei CRI) beträgt 75.

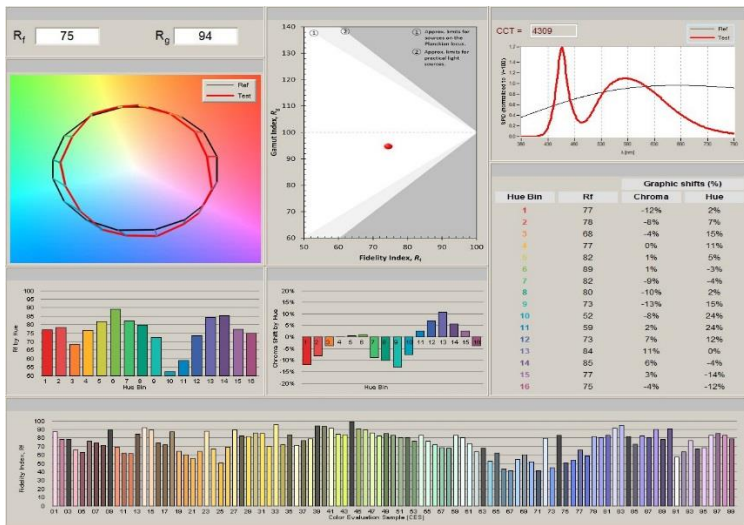


Bild 9. TM30-15 der weißen LED

Der neue CIE 2017 Farbtreuheitsindex [11] beruht im Wesentlichen auf dem TM-30-15 und weist folgende kleine Änderungen auf:

- In TM-30-15 wurden die Reflexionsspektren der Testfarben, wenn sie nur für einen eingeschränkten Wellenlängenbereich verfügbar waren, auf den Bereich von 380 bis 780 nm extrapoliert. Da dies von der CIE nicht empfohlen wird, wurde hier eine andere Methode angewandt.

- Der Anpassungsbereich zwischen Planckschem Strahler und Tageslicht als Referenz wurde auf 4000 bis 5000 K festgelegt. Damit gehört das oft eingesetzte D50 Tageslichtspektrum zu den möglichen Referenzspekren.
- Der Skalierfaktor für die finale Berechnung des R_f wurde mit 6,73 festgelegt (TM-30-15: 7,54; CIE-CRI: 4,6).
- Eine spezielle Farbraum-Maßzahl ist beim CIE 2017 Farbtreuindex nicht vorgesehen.

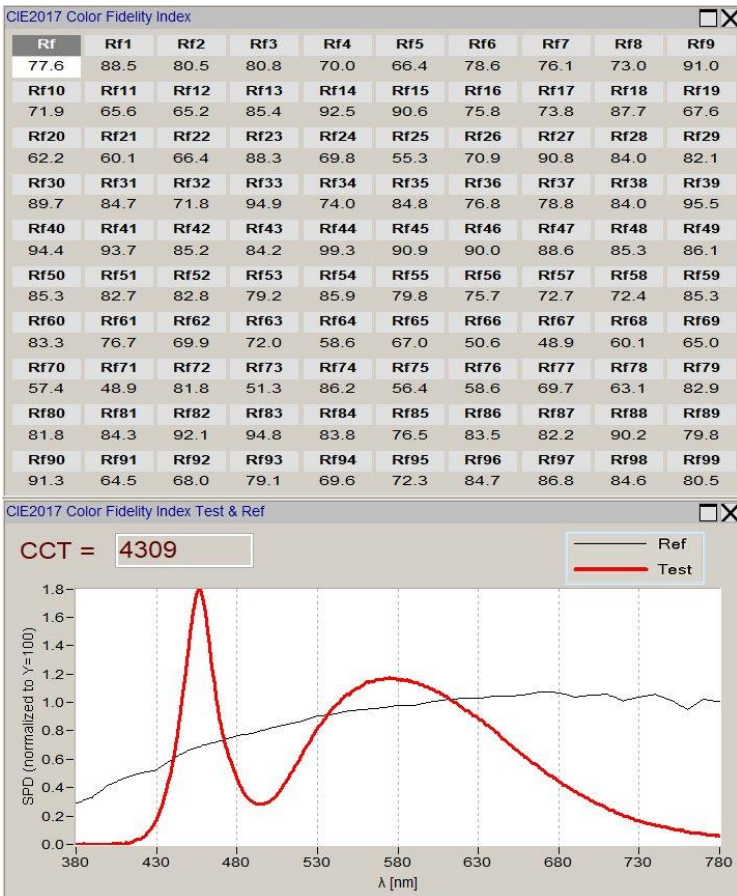


Bild 11. CIE 2017 Farbtreuindex der weißen LED

Beim bisher verwendeten LED-Spektrum beträgt der R_f -Wert ca. 78.

Zusammenfassend zu den verschiedenen Berechnungsmethoden lässt sich Folgendes sagen:

Ausschlaggebend für die Akzeptanz einer Methode sind die Ergebnisse visueller Vergleichsexperimente. Bisher hat sich trotz vieler diesbezüglicher Versuche allerdings kein eindeutiger Favorit herausgebildet. Es ist zu beobachten, daß geographisch und bezüglich der Art der Anwendung unterschiedliche Methoden bevorzugt werden.

Es lässt sich jedoch feststellen, daß Berechnungsverfahren, die auf CIECAM02 beruhen (wie CRI-CAM02UCS, TM-30-15 und CIE 2017) am besten den visuellen Eindruck wiedergeben. Ebenso wird die Erweiterung der Probenzahl auf 99 und deren Aufteilung in Kategorien bevorzugt, da dadurch die möglichen Fälle aus der realen Welt besser berücksichtigt werden. Eine Ergänzung der eigentlichen Maßzahl zur Farbwiedergabe um einen Wert zur Größe des durch die Lichtquelle abgedeckten Farbraumes (Farbraumindex) scheint sich ebenfalls durchzusetzen. Obwohl noch keine größeren Untersuchungen nach seinem Erscheinen bekannt wurden, scheint der CIE 2017 Farbtreuindex für Forschungszwecke sinnvoll zu sein. Vermutlich wird aber der klassische Farbwiedergabeindex in der Industrie nicht so schnell verdrängt werden.

3 Literatur:

- [1] Fairman, H.S. et. Al.: How the CIE 1931 Color-Matching Functions were derived from Wright-Guild Data. Color research and application. 22(1) 1997, p. 11 – 23
- [2] Service, P.: The Wright-Guild Experiments and the Development of the CIE 1931 RGB and XYZ Color Spaces. http://philservice.typepad.com/Wright-Guild_and_CIE_RGB_and_XYZ.pages.pdf
- [3] <http://www.cvrl.org>

- [4] Polster, S.: Neue Spektralwertfunktionen für die korrekte Bewertung von LED-Spektren und Einführung eines Metamerie-Index für Beobachterfeldunabhängigkeit. Der andere Verlag 2014
- [5] CIE 170-1:2006, -2:2015: Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes
- [6] Csuti, P., Schanda, J.: A Better Description of Metameric Experience of LED Clusters. CIE Meeting Budapest: Light and Lighting Conference with Special Emphasis on LEDs and Solid State Lighting. 2009
- [7] Bacharach, L., Görlich, S.: Improvement of monitor calibration using other than CIE 1931 Color Matching Functions. Lux Europa 2017. To be published
- [8] CIE 13.3: 1995: Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources
- [9] Farbwiedergabe für moderne Lichtquellen. LiTG Publikation 28
- [10] TM-30-15. IES Method for Evaluating Light Source Color Rendition. IES 2015
- [11] CIE 2017 Colour Fidelity Index for accurate scientific use. CIE 224:2017