



**Farbwiedergabe  
für moderne Lichtquellen**

**28**

**LiTG**

**Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V.**



**LiTG Fachgebiet Farben**  
**Farbwiedergabe**  
**für moderne Lichtquellen**  
**28**

Veröffentlichung der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft e.V.

**Diese Publikation wurde vom nachfolgend aufgeführten Autor erstellt:**

PD Dr.-Ing. habil. Peter Bodrogi  
Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh  
Dipl.-Ing. Stefan Brückner  
von der Technischen Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik

**Deutsche Lichttechnische Gesellschaft (LiTG) e.V.**

Burggrafenstraße 6, D-10787 Berlin  
Telefon +49 - (0)30 / 2601-2439  
Telefax +49 - (0)30 / 2601-1255  
E-Mail [info@litg.de](mailto:info@litg.de)

1. Auflage August 2012, ISBN 978-3-927787-30-8  
Nachdruck, elektronische Vervielfältigung oder  
Weitergabe, auch auszugsweise, ist nur mit Geneh-  
migung der LiTG und mit Quellenangabe gestattet

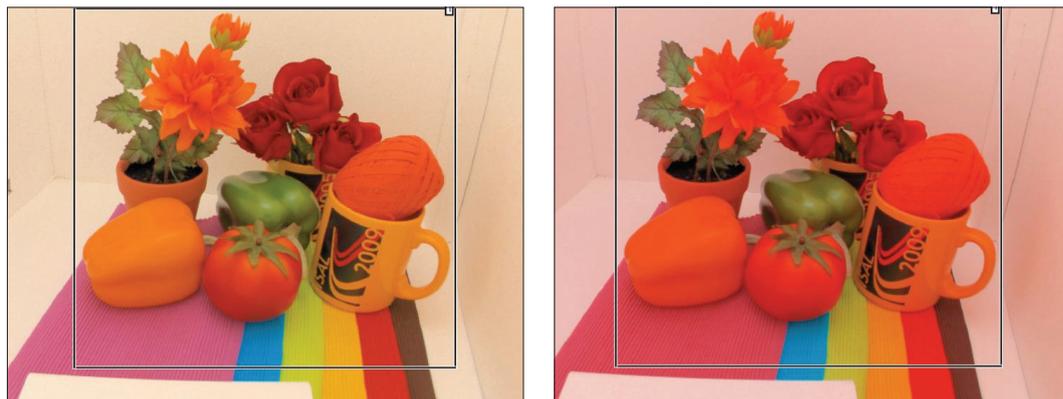
# Inhalt

1	<b>Einführung</b>	<b>6</b>
2	<b>Frühere Farbwiedergabemethoden</b>	<b>7</b>
3	<b>Definition der aktuellen CIE-Methode zur Berechnung des Farbwiedergabeindex</b>	<b>8</b>
4	<b>Defizite der jetzigen Definition des Farbwiedergabeindex</b>	<b>10</b>
5	<b>Lösungsansätze für die Defizite des CIE-Farbwiedergabeindex</b>	<b>12</b>
6	<b>Visuelle Experimente zur Farbqualität der Lichtquellen</b>	<b>16</b>
7	<b>Interpersonelle Streuung der Farbempfindung</b>	<b>17</b>
8	<b>Weitere Maßzahlen zur Beschreibung der Farbqualität der Lichtquellen</b>	<b>18</b>
9	<b>Zusammenfassung</b>	<b>19</b>
10	<b>Literatur</b>	<b>20</b>

# 1 Einführung

Eine wichtige Aufgabe der modernen Beleuchtungsplanung besteht darin, neue Lichtquellen mit einer zur Sehauflage passenden spektralen Verteilung sowie neue Leuchten mit angemessenen räumlichen Lichtstärkeverteilungen zu wählen. Dies muss so geschehen, dass die neuen Beleuchtungssysteme langzeitige Akzeptanz finden [1]. Diese Akzeptanz (oder gute Farbwiedergabe) entsteht vorwiegend auf Basis der Farberinnerung des Benutzers, durch Vergleichen der Farbwahrnehmung der Gegenstände unter Tageslicht oder Glühlampenlicht mit der Wahrnehmung unter den eingesetzten Kunstlichtspektren, siehe Abb. 1. Den Farbwiedergabeeigenschaften kommt bei der Auswahl einer Lichtquelle in der Praxis große Bedeutung zu.

**Abbildung 1:**  
Zur Beurteilung der Farbwiedergabeeigenschaft einer Testlichtquelle vergleicht der Benutzer die Farbwahrnehmung der Gegenstände unter einer Referenzlichtquelle (links) mit der Farbwahrnehmung unter einer Testlichtquelle (rechts). In den meisten Situationen ist die Referenzseite (links) nicht vorhanden und die Beurteilung geschieht auf Basis der Farberinnerung.



Man findet heutzutage viele künstliche Lichtquellen, deren Lichtfarbe dem natürlichen Licht zu einer bestimmten Tageszeit sehr ähnlich ist, bzw. der Lichtfarbe einer Halogenleuchte sehr nahe kommt. Dies bedeutet, dass diese Lichtquellen die „weiße“ Farbwahrnehmung einer neutralweißen Oberflächenfarbe nicht stören, solange die Lichtquelle selbst als Weiß empfunden wird. Probleme mit der Farbwahrnehmung entstehen erst, wenn man farbige Oberflächen beleuchtet, weil im spektralen Strahlungsfluss der Lichtquelle bestimmte Spektralbereiche fehlen bzw. nur niederwertig vorhanden sein können. Eine numerische Bewertung der Wirkung des spektralen Strahlungsflusses auf die wahrgenommene Farbwiedergabeeigenschaft der Lichtquelle liegt zurzeit noch nicht vor. Daher spielen die Thematik Farbwiedergabe allgemein und der bekannte Farbwiedergabeindex nach der Internationalen Beleuchtungskommission (CIE) [2] in der lichttechnischen Forschung eine wichtige Rolle.

Die Farbwiedergabe einer Testlichtquelle ist dann gut, wenn die Erscheinung der reflektierenden Objektfarben unter der Testlichtquelle mit der Farbercheinung unter einer Referenzlichtquelle gut übereinstimmt. Die Übereinstimmung bestimmt der Benutzer visuell, indem er den Vergleich zwischen Test- und Referenzlichtquelle - bewusst oder unbewusst - durchführt [3]. Die Farbwiedergabeeigenschaft wird heute international durch den CIE-Farbwiedergabeindex  $R_a$  [2] beschrieben, siehe Abschnitt 3.

Visuelle Experimente haben gezeigt, dass der CIE-Farbwiedergabeindex moderne Lichtquellen, wie weiße Leuchtdioden mit speziellen spektralen Strahldichtefunktionen, nicht genau beschreibt. Das bestätigte 2007 auch die CIE [4].

Im Folgenden wird auf Defizite aktueller mathematischer Definitionen zur Farbwiedergabe eingegangen. Ebenso werden Lösungsansätze aufgezeigt. Natürlich ist die Anzahl der möglichen mathematischen Methoden zur Berechnung der Farbwiedergabe hoch. Maßgeblich für die Annahme einer Methode sind allerdings die Ergebnisse visueller Experimente. Demgemäß werden die wichtigsten visuellen Experimente zur Farbwiedergabe erörtert, die zur Entwicklung oder zur Validierung der erwähnten Formeln beigetragen haben. Ebenso wird in dieser Schrift die interpersonelle Streuung der wahrgenommenen Farbunterschiede

diskutiert, weil unterschiedliche Versuchspersonen die Erscheinung von Farben und Farbunterschieden unterschiedlich bewerten. Außer der Farbwiedergabe werden am Ende dieser Schrift noch weitere Farbqualitätsparameter wie z.B. die Farbharmonie, die Farbpräferenz oder die Größe des Farbgamut erwähnt. Diese werden nicht durch den Farbwiedergabeindex, sondern durch den sog. Harmoniewiedergabeindex, Farbpräferenzindex oder Farbgamutindex beschrieben. Vor allem der Unterschied zwischen „Farbwiedergabe“ und „Farbpräferenz“ ist bedeutsam. Der Begriff Farbpräferenz bezieht sich auf eine von einem Beobachter bevorzugte Farberscheinung eines farbigen Objekts. Im Gegensatz dazu bedeutet eine exzellente Farbwiedergabe eine gleiche Farberscheinung unter Test- und Referenzlichtquelle. Sie ist also unabhängig von einer Bevorzugung der Farberscheinung durch einen Beobachter.

## 2 Frühere Farbwiedergabemethoden

Die CIE hatte zuerst zur Charakterisierung der Farbwiedergabeeigenschaft einer Lichtquelle eine Spektralbandmethode mit 8 Spektralbändern entwickelt [5]. Dabei hatten die Spektralbänder die folgenden Grenzen: 380- 420 nm, 420-440 nm, 440-460 nm, 460-510 nm, 510-560 nm, 560-610 nm, 610-660 nm sowie 660-760 nm. Die Strahldichten der Testlichtquelle in diesen 8 Spektralbändern wurden mit denen einer Referenzlichtquelle verglichen [6, 7, 8]. Die Gewichtung der einzelnen Spektralbänder und die optimale Wahl der Bandgrenzen wiesen in Verbindung mit Leuchtstofflampen bei Bewertung des Einflusses der Spektrallinien Probleme auf. Die schlechten Ergebnisse im Vergleich zur visuellen Bewertung konnten weder durch die Änderung der Anzahl der Bänder, der Lage der Bandgrenzen, noch durch die Einführung einer Gewichtungsfunktion verbessert werden [9].

Dementsprechend empfahl die CIE, alternative Beschreibungsmethoden der Farbwiedergabe zu untersuchen, die für alle Lichtquellen gelten [10, 11]. Als alternative Methode erschien die Methode der Farbverschiebungen verschiedener Testobjekte (d.h. reflektierender Oberflächen) geeignet. Dabei werden Veränderungen in der Farberscheinung beim Umschalten zwischen Referenz- und Testlichtquelle ausgewertet. Dieses Prinzip bildet bis heute die Grundlage aller Farbwiedergabemethoden. Die Methode und deren Probleme, wie die Beschreibung der chromatischen Adaptation oder die visuelle Gleichabständigkeit des Farbenraumes wurden von zahlreichen Autoren untersucht [12, 13, 14].

Aufgrund dieser Studien gab die CIE der Methode der Farbverschiebungen der Testobjekte Priorität gegenüber der Spektralbandmethode. Es wurde (zumindest für die damaligen Lichtquellen) gezeigt, dass eine verhältnismäßig kleine Anzahl der Testfarben (von 8 bis 15) genügt, um die Farbwiedergabe der Testlichtquelle zu charakterisieren, und dass nur die gleichmäßige Verteilung der Testfarben im Farbraum wichtig ist [9, 15, 16, 17]. Die erste Version der Methode wurde präsentiert [18] und später in einer CIE-Publikation (erste Edition) zusammengefasst [19]. Das wichtigste Ergebnis der Methode stellt eine reelle Zahl dar, die aus dem spektralen Strahlungsfluss der Testlichtquelle berechnet wird und die Farbwiedergabe der Testlichtquelle charakterisiert. Diese Zahl ist der sogenannte generelle CIE-Farbwiedergabeindex ( $R_a$ ).

Offene Fragen der ersten Edition betrafen die Möglichkeiten zur Vereinfachung der Methode, eine bessere Beschreibung der chromatischen Adaptation und das Einbeziehen von fluoreszierenden Farben. Die zweite Edition der CIE-Publikation über die Farbwiedergabe [20] veränderte nur die Formel zur Nachbildung der chromatischen Adaptation [21, 22]. Diese Verbesserung gilt allerdings nur für kleine Unterschiede der Farbörter von Test- und Referenzlichtquelle, die in der Methode durch eine schmale Toleranzgrenze bei der Auswahl der Referenzlichtquelle garantiert wird [20]. In der dritten, aktuellen Edition [2] wurden nur Druckfehler korrigiert, wobei die technischen Empfehlungen der zweiten Edition unverändert blieben.

### 3 Definition der aktuellen CIE-Methode zur Berechnung des Farbwiedergabeindex

Die ausführliche Beschreibung sowie die numerischen Werte der aktuellen CIE-Methode zur Berechnung des Farbwiedergabeindex können der entsprechenden CIE-Publikation [2] entnommen werden. Hier werden - zur Erläuterung der Methode - lediglich die wichtigsten Schritte (1 bis 7) zusammengefasst, siehe auch Abb. 2.

1. Es wird eine Referenzlichtquelle gewählt, die die gleiche ähnlichste Farbtemperatur ( $T_{cp}$ ; engl.: „Correlated Colour Temperature“, Abkürzung: CCT) wie die Testlichtquelle hat. Beträgt  $T_{cp}$  der Testlichtquelle weniger als 5000K, dann wird die Schwarzkörperstrahlung der gleichen Farbtemperatur als Referenzlichtart verwendet. Beträgt die ähnlichste Farbtemperatur der Testlichtquelle 5000K oder mehr, dann wird eine Tageslichtphase mit gleichem  $T_{cp}$  als Referenzlichtart verwendet. Dabei darf der Farbunterschied DC im  $u, v$ -Farbdiagramm maximal  $5,4 \cdot 10^{-3}$  betragen.
2. 14 Farbmuster des Munsell-Farbatlas wurden als Testfarben (test colour samples, TCS) gewählt. Die ersten 8 TCS dienen zur Berechnung des allgemeinen Farbwiedergabeindex ( $R_a$ ). Die letzten 6 TCS werden für ergänzende Betrachtungen in Form der sogenannten speziellen Farbwiedergabeindizes hinzugezogen.
3. Die CIE 1931 Normfarbwerte X, Y, Z werden für die 14 TCS unter der Testlichtquelle und der Referenzlichtquelle berechnet und in CIE 1960 UCS-Koordinaten ( $u, v$ ) sowie in den CIE 1964  $U^*, V^*, W^*$ -Farbraum transformiert.
4. Die Farbart der Testlichtquelle wird mit einer von Kries-Transformation in die Farbart der Referenzlichtquelle transformiert [21].
5. Die 14 CIE 1964 Farbabstände werden für die 14 TCS ( $DE_i, i=1 \dots 14$ ) zwischen den  $U^*, V^*, W^*$ -Werten unter der Testlichtquelle und der Referenzlichtquelle berechnet.
6. Für jedes TCS wird mit der Gleichung  $R_i = (100 - 4,6 DE_i)$  ein spezieller Farbwiedergabeindex berechnet ( $i=1 \dots 14$ ).
7. Der allgemeine Farbwiedergabeindex ( $R_a$ ) wird als arithmetischer Mittelwert der ersten 8 speziellen Farbwiedergabeindizes definiert.

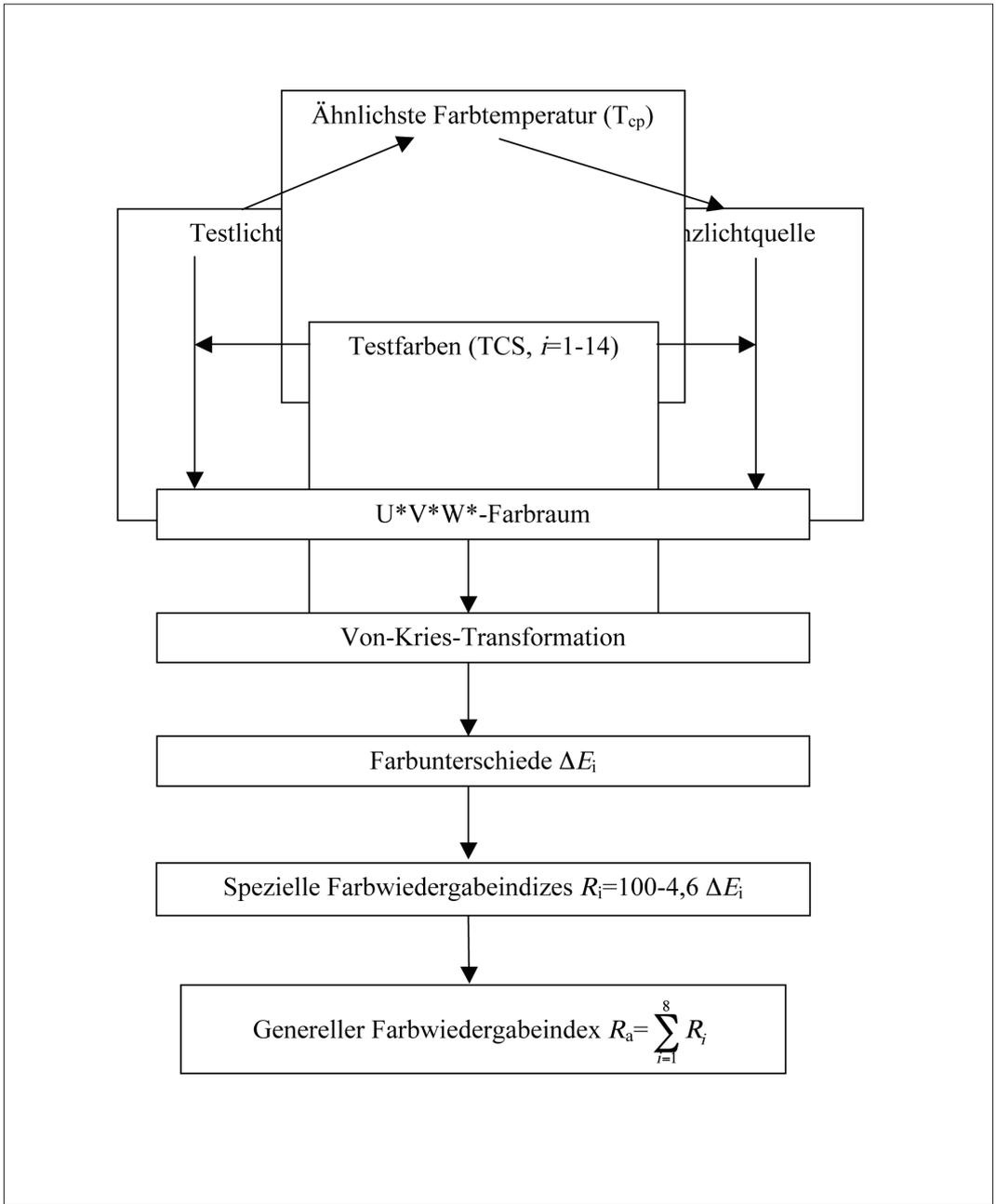
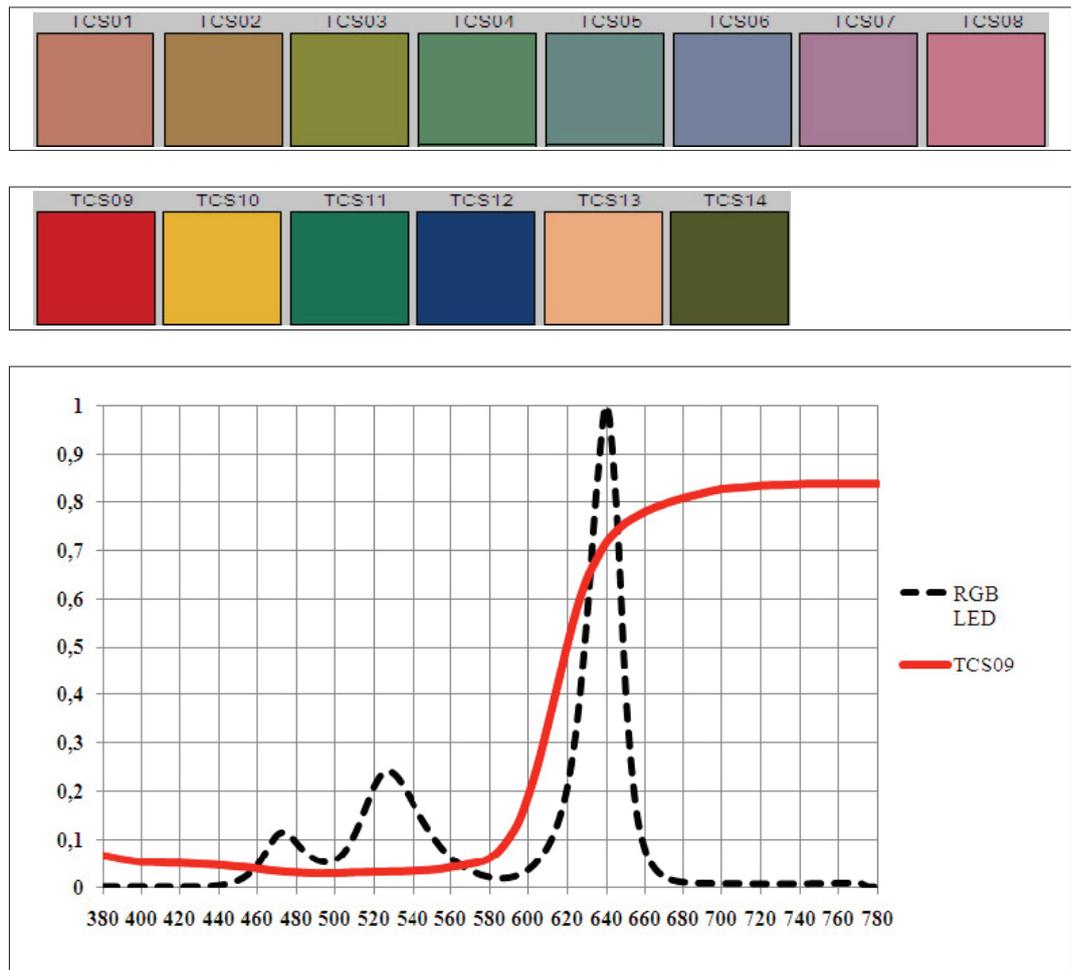


Abbildung 2:  
 Flussdiagramm zur  
 Veranschaulichung  
 der Berechnung des  
 CIE-Farbwiedergabe-  
 index [2]

## 4 Defizite der jetzigen Definition des Farbwiedergabeindex

Visuelle Experimente der Farbwiedergabe (siehe Abschnitt 6) haben gezeigt, dass der CIE-Farbwiedergabeindex (d.h. der Wert von  $R_a$ ) die wahrgenommene Farbwiedergabeeigenschaft der Lichtquellen nicht einwandfrei beschreibt, d.h., die Rangordnung der Lichtquellen nach Farbwiedergabe oft falsch voraussagt. Dieses Defizit ist besonders dann bemerkenswert, wenn vor allem RGB-LED-Lichtquellen oder auch leuchtstoffkonvertierte Leuchtdioden im Zusammenhang mit anderen Lichtquellen bewertet werden. Die Ursachen der Defizite der Anwendung des  $R_a$ -Wertes (vor allem im Zusammenhang mit Leuchtdioden) wurden bereits identifiziert [23] und können wie folgt zusammengefasst werden (1 bis 7):

**Abbildung 3:** Auswahl der Testfarben (TCS) in der CIE-Farbwiedergabemethode [2]. Oben (Quelle: NIST, USA): die ungesättigten Testfarben TCS01-TCS08, die zur Berechnung des generellen Farbwiedergabeindex herangezogen werden; Mitte (Quelle: NIST, USA): die gesättigten Testfarben TCS09-TCS14; unten: Wechselwirkung eines RGB-LED-Spektrums mit TCS09 (zur Erläuterung s. Text)



**1. Auswahl der Testfarben (TCS):** Die ersten 8 TCS sind ungesättigt und die Wechselwirkung der LED-Spektren mit gesättigten Objektfarben (z.B. mit gesättigtem Rot) ergibt eine Farberscheinung, die mit den ersten 8 TCS nicht beschreibbar ist, s. Abb. 3.

Aus dem Beispiel in Abb. 3 (unten) geht hervor, dass das rote Maximum (bei 640 nm) der RGB-LED-Lichtquelle ( $T_{op}=2690K$ ) das gesättigte Rot der Testfarbe TCS09 erheblich bekräftigt, darum beträgt der Wert von  $R_g$  in diesem Beispiel -180. Diesen Effekt kann der Wert des generellen Farbwiedergabeindex (in diesem Beispiel  $R_a=17$ ) nicht beschreiben, weil er ausschließlich auf den ungesättigten Testfarben (TCS01-TCS08) basiert.

**2. Referenzlichtart:** Die Versuchspersonen favorisieren eine kategoriale Einstufung des wahrgenommenen Weißtons [24]. Außerdem wird die Auswahl der Referenzlichtart beim Übergang vom Planckschen Strahler zu den Tageslichtphasen beim CIE-Farbwiedergabeindex [2] bei 5000K gebrochen, was problematische Berechnungsabläufe hervorruft. Anderer-

seits weist die Farberscheinung einer farbigen Umgebung unter Referenzlichtarten niedrigerer Farbtemperaturen (z.B. ein Planckscher Strahler mit 2000K) visuell einen deutlichen Gelbstich auf, der auf die nicht vollkommene Farbkonstanz des menschlichen Sehsystems unter diesen Bedingungen zurückzuführen ist, s. Abb. 4.



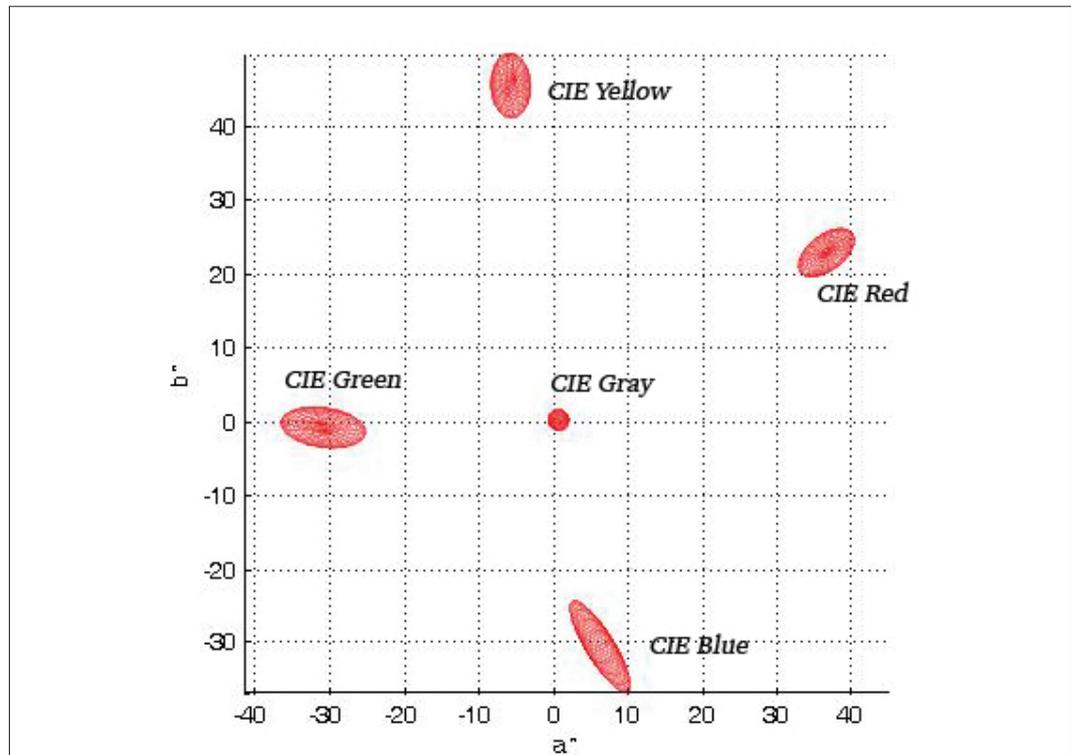
**Abbildung 4:**  
Illustration der  
nicht vollkommenen  
Farbkonstanz:  
Farberscheinung  
eines Stilllebens mit  
farbigen Objekten  
unter niedriger Farb-  
temperatur

### 3. Formeln der chromatischen Adaptation:

Für größere Adaptationsunterschiede, die bei der Erneuerung der Farbwiedergabemethode (s. Abschn. 5) öfters auftreten, beschreibt die von Kries-Transformation die chromatische Adaptation im Allgemeinen sehr schlecht.

**4. Farbraum und Farbabstandsformeln:** Die Korrelation zwischen den im  $U^*V^*W^*$ -Farbraum berechneten Farbunterschieden ( $DE_{calc}$ ) und den wahrgenommenen Farbunterschieden ( $DE_{vis}$ ) ist niedrig. Ein solcher Farbraum wird als „visuell nicht gleichabständig“ bezeichnet. In einem gleichabständigen Farbraum sollen sich alle Testfarben  $T$ , die einen konstanten wahrgenommenen Farbunterschied ( $DE_{vis}$ ) zwischen  $T$  und einer festgelegten Referenzfarbe  $R$  aufweisen, auf einer Kugelfläche befinden, deren Mittelpunkt die Referenzfarbe  $R$  bildet. Außerdem soll der Kugeldurchmesser für alle Referenzfarben im gesamten Farbraum konstant sein. Statt der oben erwähnten Kugelflächen ergeben sich im  $U^*V^*W^*$ -Farbraum Ellipsoide, deren Halbachsen je nach Referenzfarbe variieren. Zur Veranschaulichung eines nicht gleichabständigen Farbraumes wird hier das Beispiel der sogenannten Toleranzellipsoide herangezogen, die in Abb. 5 auf die CIELAB  $a^*-b^*$ -Ebene projiziert gezeigt werden. Die Farben, die sich auf der Oberfläche dieser Toleranzellipsoide befinden, stellen einen für 50% aller Versuchspersonen tolerierbaren Farbunterschied im Vergleich mit der Farbe des Mittelpunktes dar [25].

Abbildung 5:  
Auf die CIELAB  $a^*$ - $b^*$ -  
Ebene projizierte Toleranzellipsoide [25].



Aus Abbildung 5 geht hervor, dass die visuell ermittelten Toleranzellipsoide stark von der Farbart des Mittelpunktes abhängen. Somit ist der CIELAB-Farbraum visuell nicht gleichabständig.

**5. Arithmetischer Mittelwert:** Eine einzige Zahl (d.h. eine lineare Transformation des Durchschnitts der Farbabstände der acht ungesättigten Testfarben zwischen Test- und Referenzlichtquelle) kann die möglichen Farbverschiebungen für alle in einer modernen visuellen Umgebung relevanten spektralen Reflektanzfunktionen (inkl. gesättigte Objektfarben) nicht beschreiben. Dieser Effekt ist besonders für neuartige (gesättigte) Pigmente in Kombination mit neuartigen Lichtquellspektren (z.B. Leuchtdiodenspektren) signifikant, vgl. mit Abb. 3.

**6. Interpretation der  $R_a$ -Skala:** Es ist schwierig, die Werte der  $R_a$ -Skala (z.B.  $R_a=83$ ) als visuelles Gütemerkmal der Farberscheinung zu interpretieren, ähnlich wie die Deutung der Unterschiede der  $R_a$ -Skala (z.B.  $DR_a=3$ ).

**7. Farbqualität:** Die wahrgenommene Farbqualität hat außer der Farbwiedergabe noch weitere visuelle Aspekte oder Eigenschaften, wie Farbgamut, Farbharmonie oder Farbpräferenz. Bestimmte Eigenschaften korrelieren mit dem Wert von  $R_a$  in den visuellen Experimenten nur geringfügig oder gar nicht [26, 27].

## 5 Lösungsansätze für die Defizite des CIE-Farbwiedergabeindex

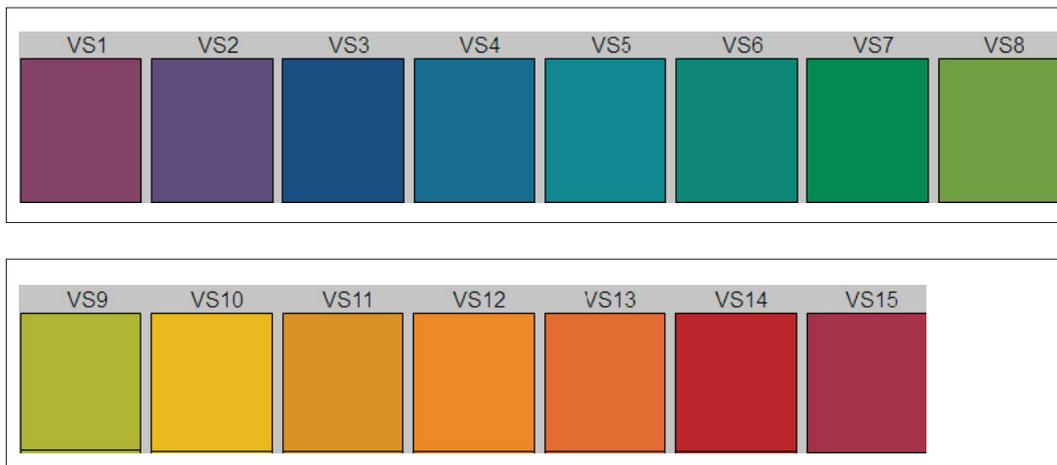
Verbesserungsmöglichkeiten wurden schon 1991 von der CIE in Betracht gezogen, als die technische Arbeitsgruppe Farbwiedergabe (TC 1-33) gegründet und dadurch 1999 eine neue Berechnungsmethode ( $R96_a$ ) vorgeschlagen wurde [28]. In dieser international nicht eingeführten Methode wurden die folgenden Lösungsansätze für die im Abschn. 4 beschriebenen Defizite des CIE-Farbwiedergabeindex empfohlen:

1. Die Testfarben (TCS) werden von der MacBeth ColorChecker®-Farbtafel übernommen, die sowohl gesättigte als auch ungesättigte Farben sowie wichtige Gedächtnisfarben enthält.

2. Statt der kontinuierlichen Menge der Referenzlichtarten (Planckscher Strahler und Tageslichtphasen) wird mit nur noch 6 bestimmten Referenzlichtarten gearbeitet (d.h. D65, D50, P4200, P3450, P2950 sowie P2700, wobei P einen Planckschen Strahler mit der darauf folgenden Farbtemperatur bedeutet) [24].
3. Als Formel für die chromatische Adaptation wird statt der von Kries-Transformation die CIE-Adaptationsformel [29] eingesetzt.
4. Die Testfarben werden sowohl unter der Test-, als auch unter der Referenzlichtquelle nach D65 transformiert. Danach wird zur Berechnung der Farbabstände der CIELAB-Farbraum verwendet, da dieser unter D65 weitgehend getestet wurde.

Außer der oben geschilderten R96<sub>a</sub>-Methode wurden kürzlich international etliche neue Farbwiedergabeindizes vorgeschlagen. Im Folgenden werden einige ausgewählte Methoden zusammengefasst.

**CQS:** Die Methode des National Institute of Standards and Technology (NIST, USA) arbeitet mit der sog. CQS-Farbqualitätsskala (Version 7.1) [30] im CIELAB-Farbraum. Statt der CIE-Testfarben verwendet die CQS-Methode fünfzehn speziell ausgewählte Farben aus dem Munsell-Farbsystem (VS1-VS15), s. Abb. 6.



**Abbildung 6:** Testfarben der CQS-Methode (NIST, USA, Version 7.1), VS1-VS15 [30]

Der CIE-Farbwiedergabeindex bewertet u.a. solche Testlichtquellen negativ, die die Sättigung der Objektfarbe – im Vergleich zur Referenzlichtquelle – erhöhen. Um die allgemeine Präferenz der Beobachter für gesättigtere Farben zu berücksichtigen, wird die Erhöhung der Sättigung in der CQS-Methode nicht negativ bewertet. In dieser Hinsicht ist die CQS-Metrik (Version 7.1) keine wahre Farbwiedergabeskala, sondern eine kombinierte Farbpräferenz-Farbwiedergabemetrik [31]. Testlichtquellen extremer ähnlichster Farbtemperatur werden schlechter bewertet, als bei der CIE-Methode [2]. Zur Durchschnittsbildung der CIELAB-Farbunterschiede der fünfzehn Testfarben ( $\Delta E_{ab,i}^*$ ) wird der quadratische Mittelwert (RMS) statt des arithmetischen Mittelwertes der CIE-Methode eingesetzt:

$$\Delta E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} (\Delta E_{ab,i}^*)^2}$$

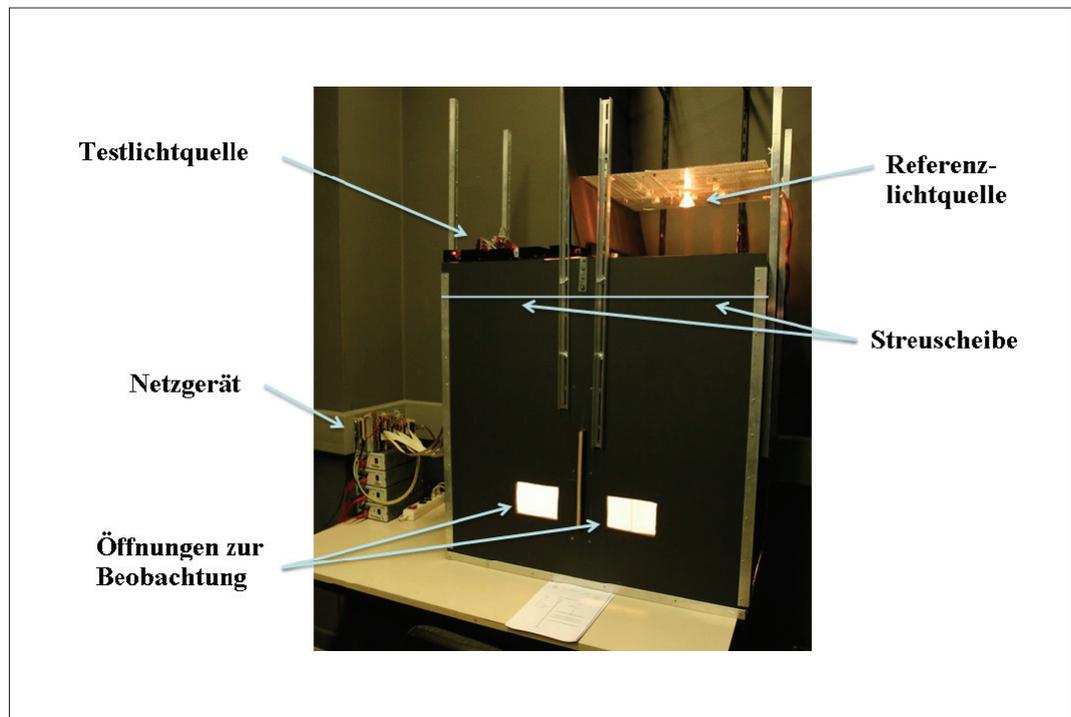
**SBI:** Der an der Technischen Universität Ilmenau entwickelte subjektive Bewertungsindex SBI fasst den subjektiven Eindruck der Beobachter über die verschiedenen Aspekte der wahrgenommenen Farbqualität in einer einzigen subjektiven Maßzahl (SBI) zusammen [32]. Zur Berechnung des SBI einer Testlichtquelle müssen immer menschliche Beobachter herangezogen werden, die die folgenden Fragen beantworten: Änderung in Helligkeit, Leuchtkraft,

Reinheit, Kräftigkeit, Buntton, Gefallen und Natürlichkeit einer Testfarbe in Bezug auf die Farberscheinung unter der Referenzlichtquelle. Der Wert des SBI ergibt sich aus den Antworten der Versuchspersonen.

**CRI-CAM02UCS:** Der an der Universität Leeds (Großbritannien) entwickelte Farbwiedergabeindex [33] wendet einen neuen, empfindungsgemäß gleichabständigen Farbraum (sog. CAM02-UCS) an [34], in dem die Farbunterschiede zwischen der Farberscheinung der Testfarben unter den Test- und Referenzlichtquellen berechnet werden. Dabei werden die gleiche Referenzlichtquelle wie in der CIE-Methode [2] sowie die ersten 8 CIE-Testfarben [2] eingesetzt. Da die Veränderung der Adaptationsverhältnisse im CIECAM02-Farbmodell [35] grundsätzlich eingebaut ist, sind CIECAM02-basierte Farbabstandsformeln oder gleichabständige Farbräume zur Beschreibung der Wahrnehmung von Farbabständen unter den verschiedenen Adaptationsleuchtdichten und –Farbarten sehr gut geeignet.

**RCRI:** Die Überlegenheit des CAM02-UCS-Farbraumes wurde (unabhängig von den Studien an der Universität Leeds) mit Hilfe einer Doppelkammer-Anordnung (s. Abb. 7) an der Technischen Universität Darmstadt ebenfalls bestätigt [36].

**Abbildung 7:** Doppelkammer-Beobachtungskasten zur visuellen Skalierung der wahrgenommenen Farbunterschiede ( $DE_{vis}$ ) der gleichen zwei Farbmuster, einmal unter der Testlichtquelle (in der linken Kammer) und der Referenzlichtquelle (in der rechten Kammer).



Daher basiert der von der Technischen Universität Darmstadt entwickelte neue Ratingskala-Index (RCRI) [36] auf den Farbabständen, die in diesem neuen CAM02-UCS-Farbraum berechnet werden. In der RCRI-Methode werden die Farbabstände rechnerisch in Kategorien (sog. ordinale Ratings) mit dem Übereinstimmungsgrad der Farberscheinung einer Testfarbe unter den Test- und Referenzlichtquellen eingestuft. Hat der berechnete CAM02-UCS-Farbabstand einer Testfarbe einen sehr kleinen (sehr großen) Wert, erhält diese Testfarbe das Rating „sehr gut“ („sehr schlecht“). Ähnlich kann jedem der 17 RCRI-Testfarben auch ein zwischenliegendes Rating, d.h. „gut“, „tolerierbar“, oder „nicht annehmbar“ zugeordnet werden. Die 17 RCRI-Testfarben wurden z. T. von der MacBeth ColorChecker®-Farbtafel und z. T. von den CQS-Testfarben gewählt [30], s. Abb. 8.

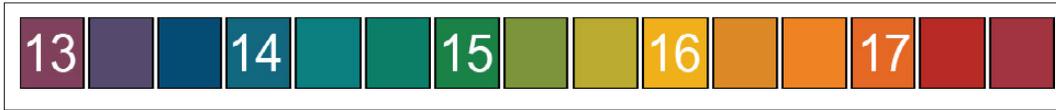


Abbildung 8:  
Die 17 RCRI-Testfarben [36], die z. T. von der MacBeth ColorChecker®-Farbtafel (oben) und z. T. vom Satz der CQS-Testfarben (unten) ausgewählt wurden

Die RCRI-Methode arbeitet mit der gleichen Referenzlichtquelle, wie die CIE-Methode [2]. Der Wert des RCRI berechnet sich als eine Transformation der Anzahl der „sehr guten“ und „guten“ Ratings unter den 17 Testfarben. Somit hat der Index eine anschauliche Bedeutung für den Benutzer darüber, wie viele Testfarben in guter oder sehr guter Übereinstimmung mit der Farberscheinung unter der Referenzlichtquelle stehen.

**Farbqualitätsindex nach Gedächtnisfarben ( $S_a$ ):** Dieser Index ist keine echte Farbwiedergabe-skala, sondern eine Metrik, die die Ähnlichkeit der Farberscheinung zehn oft gesehener Objekte unter der Testlichtquelle zu deren Gedächtnisfarben beschreibt [37]. Die Methode arbeitet ohne Referenzlichtquelle. Der Maximalwert des Index  $S_a$  (=1,000) bedeutet, dass die Testlichtquelle die Farberscheinung des Objektes so wiedergibt, wie es die Beobachter nach ihrem Langzeit-Farbgedächtnis erwarten. Der allgemeine Index  $S_a$  bildet sich als geometrischer Mittelwert der speziellen Indizes der zehn Objekte.

Tabelle 1 fasst die oben vorgestellten neuen Lösungsansätze für die Defizite des CIE-Farbwiedergabeindex zusammen.

Methode	Beschreibung	Vorteile	Nachteile
CQS	Kombinierter Farbwiedergabe- und Präferenzindex	Berücksichtigt die Farbpräferenz	Verfälscht die objektive Bewertung der Farbwiedergabe
SBI	Beschreibt viele Aspekte der Farbqualität	Fasst viele Aspekte der Farbqualität zusammen	Keine Berechnungsmethode. Die Methode benötigt Testpersonen
CRI-CA-M02UCS	Echter Farbwiedergabeindex	Basiert auf einem erprobt gleichabständigen, adaptionsfähigen Farbraum (CIECAM02-UCS)	In der Originalmethode nur 8 Testfarben
RCRI	Auf einer Ordinalskala basierender Index	Basiert auf dem CIECAM02-UCS Farbraum. Semantische Ratings zur einfachen Deutung für Nichtexperten	Der Index liefert diskontinuierliche Werte
$S_a$	Gedächtnisfarben-Wiedergabeindex	Korreliert sehr gut mit der Farbpräferenz eigenschaft	Kein echter Farbwiedergabeindex

Tabelle 1:  
Neue Lösungsansätze für die Defizite des CIE-Farbwiedergabeindex (Auswahl)

## 6 Visuelle Experimente zur Farbqualität der Lichtquellen

In den Jahren 2000-2010 wurden zahlreiche visuelle Experimente zur Farbqualität von Lichtquellen durchgeführt. Hier werden nur einige ausgewählte Studien beschrieben. Diese Experimente bezogen sich z.T. auf die Farbwiedergabeeigenschaft der Lichtquellen, wobei die Versuchspersonen die Farberscheinung zweier identischer Farbmuster unter der Testlichtquelle und unter der Referenzlichtquelle zu vergleichen und den Farbabstand visuell zu bewerten hatten, z.T. aber auch auf weitere Aspekte der Farbqualität der Lichtquellen, wie die Farbpräferenz oder die Wahrnehmbarkeit kleiner Farbunterschiede.

Die Versuchspersonen bewerteten die Attraktivität, die Natürlichkeit sowie die sog. Angemessenheit verschiedener Obst- und Gemüsefarben unter verschiedenen Mischungen von LED-Lichtquellen im Vergleich zu konventionellen Lichtquellen [38]. Es wurde festgestellt, dass der CIE-Farbwiedergabeindex [2] mit den subjektiven Urteilen der Versuchspersonen nicht gut korrelierte [39]. Die Attraktivität hingegen konnte mit dem sog. Gamutflächenindex GAI [40] gut beschrieben werden. Bestimmte LED-Mischungen hatten eine bessere Angemessenheit und Attraktivität, als Halogenleuchtstofflampen oder Leuchtstofflampen. In einer weiteren LED-basierten Arbeit korrelierte die Wahrnehmbarkeit kleiner Farbunterschiede unter verschiedenen LED-Lichtquellen gut [41] mit dem CIE-Farbwiedergabeindex.

In einem anderen visuellen Experiment wurde [33] die Farbwiedergabe unter Leuchtdioden sowie konventionellen Lichtquellen untersucht. Die visuellen Ergebnisse konnten mit dem CIE-Farbwiedergabeindex [2] nicht zufriedenstellend beschrieben werden. Die visuellen Ergebnisse konnten am besten mit den berechneten Farbabständen im CAM02-UCS-Farbraum [34] beschrieben werden, im Vergleich zu CIE  $U^*V^*W^*$ , CIELAB, CIEDE2000 sowie zum Farbraum des CIECAM02-Modells.

Die spektralen Reflexionsgradfunktionen einer natürlichen farbigen Szene wurden – mit Hilfe einer multispektralen Kamera – orts aufgelöst aufgenommen. Damit wurde die Szene für verschiedene LED-Lichtquellen (9 RGB LED sowie 1 Leuchtstoff-LED) an einem CRT-Bildschirm simuliert [42]. Die Versuchspersonen mussten die Szene unter jeder Lichtquelle auf 18 semantischen Skalen (z.B. hohe-niedrige Farbtreue, warm-kalt, gesättigt-ungesättigt, schön-hässlich, und ähnliche Paare) bewerten. Eine Faktorenanalyse wies auf zwei wichtige Faktoren hin, Sättigung und Farbtreue. Farbtreue korrelierte mit dem CIE-Farbwiedergabeindex zufriedenstellend im Gegensatz zu Sättigung, die eine niedrige Korrelation aufwies.

Eine weitere Studie beschäftigte sich ebenfalls mit der Korrelation visueller Farbwiedergabergebnisse mit dem CIE-Farbwiedergabeindex, sowie dessen Verbesserungen [43]. Drei Farbtemperaturen wurden untersucht: warmweiß, „cool white“ sowie Tageslicht. Die visuell ermittelten Farbabstände der LED-Lichtquellen korrelierten mit der Farbdifferenzformel der CIE-Farbwiedergabemethode schlecht, was durch die Einsetzung des CIECAM02-Farbraumes wesentlich verbessert werden konnte.

Wie im Abschnitt 5 schon erwähnt, wird die Erhöhung der Sättigung einer Testfarbe unter der Testlichtquelle im Vergleich zur Referenzlichtquelle in der CQS-Methode [30] nicht negativ bewertet. Das ist der sog. Sättigungsfaktor in der CQS-Methode. Zur Validierung des Sättigungsfaktors wurde das sog. „NIST Spectrally Tunable Lighting Facility“, d.h. die NIST- Beleuchtungsanlage mit spektral einstellbarem Licht, ein wahrer Raum, wo annähernd jedes Lichtquellenspektrum simuliert werden kann, aufgebaut [44, 45], und damit visuelle Farbpräferenz-Experimente durchgeführt. Verschiedene Spektren weißer LEDs mit  $R_a$ -Werten zwischen 70 und 95 und mit zwei ähnlichsten Farbtemperaturen (3000K und 4000K) wurden simuliert, die die Sättigung der Objektfarben (echtes Obst, künstliche Blumen, Lebensmittel, eigener Hautton) entweder erhöhten oder verminderten. Die Testpersonen verglichen das Gefallen der Objektfarben unter den verschiedenen Testlichtquellen.

Es wurde festgestellt [44, 45], dass die CQS-Skala die ermittelten visuellen Farbpräferenz-Ergebnisse besser beschreibt, als der CIE-Farbwiedergabeindex, der – per Definition - keine Farbpräferenz-Metrik beinhaltet. Bei der aktuellen Erneuerung des Farbwiedergabeindex in der Arbeitsgruppe TC 1-69 der CIE ist es umstritten, ob der neue, von der CIE empfohlene primäre Index die Farbpräferenzeigenschaft beinhalten soll. Ein solcher Index wäre ein kombinierter Farbpräferenz- und Farbwiedergabeindex, wie die CQS-Metrik [31, 30]. Laut Meinung der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft (LiTG) soll der neue Index weiterhin ausschließlich die Farbwiedergabeeigenschaft beschreiben.

In einem weiteren Experiment [27] bewerteten die Versuchspersonen die Natürlichkeit und die sog. Lebhaftigkeit einer Anordnung farbiger Objekte (echtes Obst, Gemüse und die MacBeth ColorChecker®-Farbtafel) unter 6 Lichtquellen (3 warmweiße um 3000K sowie 3 „cool white“ Lichtquellen um 4600K) mit jeweils hohem CIE-Farbwiedergabeindex ( $R_a$ ) und niedrigem Gamutflächenindex GAI [40], niedrigem  $R_a$  und hohem GAI, sowie hohem  $R_a$  und hohem GAI. Die höchste visuelle Natürlichkeit hatten die Lichtquellen mit hohem  $R_a$  und hohem GAI; ein hoher Wert von  $R_a$  allein führte nicht zur hohen visuellen Natürlichkeit. Die höchste visuelle Lebhaftigkeit erreichten die Lichtquellen mit niedrigem  $R_a$  und hohem GAI.

Es kann zusammenfassend festgestellt werden, dass sich - in den visuellen Experimenten zur Farbwiedergabe - die CIECAM02-basierten Berechnungsverfahren am besten bewährten. Außer der Farbwiedergabe wurden weitere Eigenschaften der Farbqualität der Lichtquellen experimentell erfasst (wie z.B. die Größe des Farbgamut), die mit der Farbwiedergabe schlecht korrelierten und deren mathematische Beschreibung unterschiedliche Metriken voraussetzt.

## 7 Interpersonelle Streuung der Farbempfindung

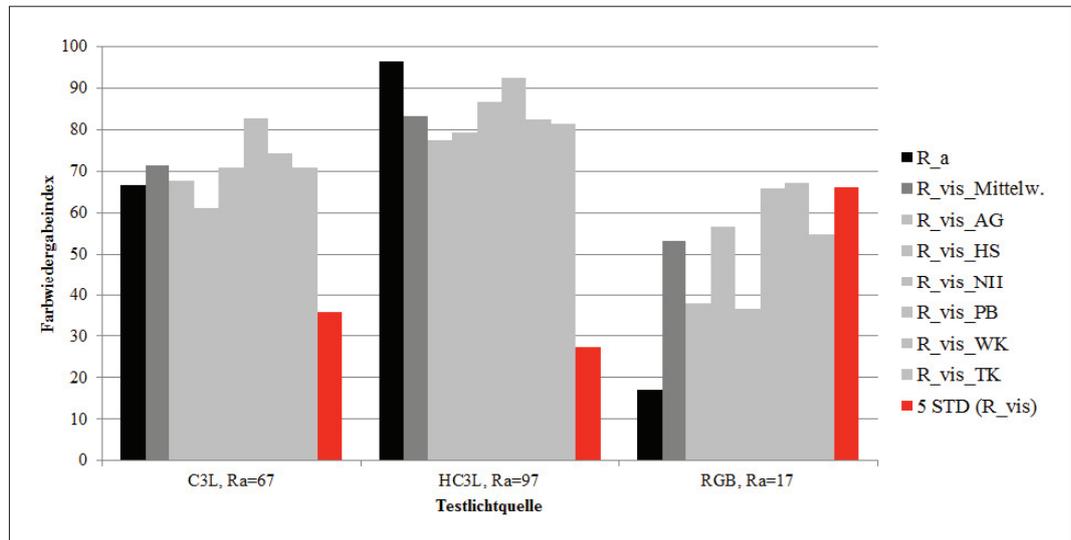
Es wurde nachgewiesen, dass die Farbqualität einer von der Testlichtquelle beleuchteten Szene von jedem Beobachter individuell beurteilt wird. Grund dafür ist die große Variabilität des Farbensehens, vor allem die Wahrnehmung der Farbunterschiede [36, 46] sowie der Farbkognition. Bisher wurde nur der Fall des durchschnittlichen normalen Farbensehens erarbeitet, weil der Zusammenhang zwischen Änderungen des normalen Farbensehens und der Farbwiedergabe ein vielschichtiges Problem darstellt.

Um diese Variabilität zu quantifizieren, wurde auf Grund der durchschnittlichen wahrgenommenen Farbunterschiede  $DE_{vis,i}$  der 17 RCRI-Testfarben ( $i=1 \dots 17$ , s. Abb. 8) im Doppelkammer-Beobachtungskasten (Abb. 7) für jeden Beobachter mit normalem Farbensehen für drei Testlichtquellen (zwei weiße leuchtstoffkonvertierte LED-Lichtquellen, C3L und HC3L, sowie eine RGB-LED-Lichtquelle) ein visueller Farbwiedergabeindex individuell ermittelt [47]:

$$R_{vis} = 100 - 0,5038 \sum_{i=1}^{17} \Delta E_{vis,i}$$

Der Faktor 0,5038 normiert die  $R_{vis}$ -Skala. Mit diesem Faktor ergab sich im Experiment [47] im Durchschnitt  $R_{vis} = R_a = 64$  für den Fall einer warmweißen Leuchtstofflampe. Der Index  $R_{vis}$  zeigte – in Abhängigkeit von der Testlichtquelle – eine signifikante Variabilität unter den Versuchspersonen, die mit Hilfe der Standardabweichung (STD) der Antworten der Beobachter unter der jeweiligen Testlichtquelle beschrieben wurde. Abbildung 9 zeigt die individuellen  $R_{vis}$ -Indizes der sechs Beobachter sowie deren Mittelwert und Standardabweichung, im Vergleich mit dem CIE-Farbwiedergabeindex  $R_a$ .

**Abbildung 9:** Interpersonelle Streuung der Farbwiedergabe. Individuelle  $R_{vis}$ -Indizes der sechs Versuchspersonen AG, HS, NH, PB, WK und TK, sowie deren Mittelwert und das Fünffache der Standardabweichung (5 STD), im Vergleich mit dem CIE-Farbwiedergabeindex  $R_a$ . Verwendet wurden drei Testlichtquellen mit der gleichen ähnlichsten Farbtemperatur von 2700K: C3L:  $R_a=67$ , HC3L:  $R_a=97$  sowie RGB:  $R_a=17$ .



Aus Abb. 9 geht hervor, dass die weißen leuchtstoffkonvertierten LED-Lichtquellen (C3L und HC3L) – im Vergleich zu der RGB LED-Lichtquelle (RGB) – eine kleinere STD aufweisen. Die Bedeutung dieses STD-Wertes, der also die interindividuelle Variabilität der visuellen Farbwiedergabeeigenschaft der Lichtquelle beschreibt, besteht darin, dass eine für einen Standardbeobachter optimierte Lichtquelle mit einem höheren STD-Wert für eine große Gruppe der Beobachter keine gute visuelle Farbwiedergabe bietet. Bisher wurde eine solche Streuungsmetrik für die Farbwiedergabe noch nicht vorgeschlagen.

## 8 Weitere Maßzahlen zur Beschreibung der Farbqualität der Lichtquellen

In den obigen Abschnitten wurde schon darauf hingewiesen, dass - außer der Farbwiedergabe - noch weitere psychologische Dimensionen (d.h. visuelle Aspekte) der Farbqualität der Lichtquellen existieren [26]. Diese schließen die Farbharmonie, die Wahrnehmbarkeit kleiner Farbunterschiede, die Farbpräferenz, sowie die sogenannte optische Klarheit ein, die durch unterschiedliche Maßzahlen (Harmoniewiedergabeindex HRI, Farbdifferenzindex CDI, Farbpräferenzindex CPI oder Farbgamutindex GAI) beschrieben werden können. Eine

**Abbildung 10:** Beispiel für einen sogenannten Stilleben-Aufbau (oder Table-top) mit mehreren farbigen Objekten zur Untersuchung der verschiedenen visuellen Eigenschaften der Farbqualität einer Testlichtquelle



vollständige Charakterisierung der Farbqualität einer Testlichtquelle benötigt den kompletten Satz dieser Maßzahlen. Die Definition dieser Maßzahlen setzt weitere visuelle Untersuchungen voraus, die mit realen Szenen, z. B. mit sogenannten Stilleben-Anordnungen und ganzen Räumen mit zahlreichen wahren farbigen Objekten durchzuführen sind, s. Abb. 10.

## 10 Literatur

- [1] Khanh TQ, Grechana N, Über Untersuchungen der Farbwiedergabeeigenschaften von Lichtquellen auf der Basis der Farbdifferenz-Evaluierung, Licht 7-8/2007, pp. 554-559, 2007.
- [2] Commission Internationale de l'Éclairage, Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources, Publ. CIE 13.3-1995, 1995.
- [3] Commission Internationale de l'Éclairage, International Lighting Vocabulary (a joint CIE/IEC Publication), Publ. CIE 17.4-1987, 1987.
- [4] Commission Internationale de l'Éclairage, Colour rendering of white LED light sources, Publ. CIE 177:2007, 2007.
- [5] Commission Internationale de l'Éclairage, CIE Compte Rendue de 11 Session, Paris, 1948.
- [6] Barnes BT, Band system for appraisal of color rendition, J. Opt. Soc. Am. 47/12, pp. 1124-1129, 1957.
- [7] Crawford BH, Measurement of color rendering tolerances, J. Opt. Soc. Am. 49/12, pp. 1147-1156, 1959.
- [8] Crawford BH, Colour-rendering tolerances and the colour-rendering properties of light sources, Trans. Illum. Eng. Soc. 28/2, pp. 50-64, 1963.
- [9] Ouweltjes JL, The specification of colour rendering properties of fluorescent lamps, Farbe 9/4-6, pp. 207-246, 1960.
- [10] Commission Internationale de l'Éclairage, CIE Compte Rendue de 13 Session, Vol. 3. p. 41, Zurich, 1955.
- [11] Commission Internationale de l'Éclairage, CIE Compte Rendue de 14 Session, Vol. A, p. 111, Bruxelles, 1959.
- [12] Helson H, Judd DB, Wilson M, Color rendition with fluorescent sources of illumination, Illum. Eng., 51/4, pp. 329-346, 1956.
- [13] Nickerson D, Measurement and specification of color rendition properties of light sources, Illum. Eng. 53, pp. 77-90, 1958.
- [14] Nickerson D, Light sources and color rendering, J. Opt. Soc. Am. 50/1, pp. 57-69, 1960.
- [15] Nickerson D, Recent work on colour rendering properties of fluorescent lamps, Farbe 9/1-6, pp. 69-74, 1963.
- [16] Henniecke I, Zur Frage der Farbwiedergabe durch Lichtquellen und ihrer Kennzeichnung, Farbe 9/4-6, 1960.
- [17] Münch W, Schultz U, Bestimmung der Farbwiedergabeeigenschaften von Lichtquellen nach einem vereinfachten Testfarbenverfahren, Lichttechnik 15/5, pp. 269-274, 1963.

- [18] Commission Internationale de l'Éclairage, CIE Compte Rendu de 15. Session, Vienna, Vol. A, pp. 115-159, 1963.
- [19] Commission Internationale de l'Éclairage, Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources, CIE Publication 13 (E-1.3.2), 1<sup>st</sup> ed., 1965.
- [20] Commission Internationale de l'Éclairage, Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources, CIE 13.2-1988, 1988.
- [21] Münch W, Schultz U, Zur Berücksichtigung der Farbumstimmung in der Bewertung der Farbwiedergabe, Farbe 19/1-6, pp. 130-134, 1970.
- [22] Judd DB, Standard response functions for protanopic and deuteranopic vision, J. Opt. Soc. Am. 35/3, pp. 199-220, 1945.
- [23] Bodrogi P, Csuti P, Horváth P, Schanda J, Why does the CIE Colour Rendering Index fail for white RGB LED light sources?. Proc. CIE Expert Symposium on LED Light Sources: Physical Measurement and Visual and Photobiological Assessment, Tokyo, 2004.
- [24] Borbély Á, Sámson Á, Schanda J, The Concept of Correlated Colour Temperature Revisited, Color Res. Appl. 26, pp. 450-457, 2001.
- [25] Fedutina M, Durchführung und Auswertung von Farbdiskriminierungsexperimenten auf einem Flüssigkristallbildschirm, Master Thesis, Betreuer: Philipp Urban, Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren, Technische Universität Darmstadt, 2010.
- [26] Bodrogi P, Brückner S, Khanh TQ, Dimensions of light source colour quality, CGIV 2010, 5<sup>th</sup> European Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision, Joensuu, 14-17 June 2010.
- [27] Rea MS, Freyssinier JP, Color Rendering: Beyond Pride and Prejudice, Color Res. Appl. 35/6, pp. 401-409, 2010.
- [28] Commission Internationale de l'Éclairage, CIE Pub. 135: CIE Collection 1999: Vision and Colour, Physical Measurement of Light and Radiation, 135/2: Colour rendering, closing remarks, 1999.
- [29] Commission Internationale de l'Éclairage, CIE Pub. 109-1994, A Method of Predicting Corresponding Colours under Different Chromatic and Illuminance Adaptations, 1994.
- [30] Davis W, Ohno Y, Color quality scale, Optical Engineering 49/3, 033602, 2010.
- [31] Schanda J, A combined colour preference – colour rendering index, Lighting Res. Technol. 17, pp. 31-34, 1985.
- [32] Jungnitsch K, Bieske K, Vandahl C, Untersuchungen zur Farbwiedergabe in Abhängigkeit vom Lampenspektrum, Tagung Licht 2008, 10.-13. September 2008 Ilmenau, Tagungsband pp. 289-296, 2008.
- [33] Li Ch, Luo MR, Li Ch, Cui G, The CRI-CAM02UCS Colour Rendering Index, Color Res. Appl. Early View, 2011.
- [34] Luo MR, Cui G, Li Ch, Uniform Colour Spaces Based on CIECAM02 Colour Appearance Model, Color Res. Appl. 31, pp. 320-330, 2006.

- [35] Commission Internationale de l'Éclairage, A Colour Appearance Model for Colour Management Systems: CIECAM02, Pub. CIE 159:2004, 2004.
- [36] Bodrogi P, Brückner S, Khanh TQ, Ordinal scale based description of colour rendering, *Color Res. Appl.*, Early View, 2010.
- [37] Smet K, Ryckaert WR, Pointer MR, Deconinck G, Hanselaer P, Color appearance rating of familiar real objects, *Color Res. Appl.* 36/3, pp. 192–200, 2011.
- [38] Jost-Boissard S, Fontoynt M, Blanc-Gonnet J, Perceived lighting quality of LED sources for the presentation of fruit and vegetables, *J. Modern Optics* 56/13, pp. 1420–1432, 2009.
- [39] Boissard S, Fontoynt M, Optimization of LED-based Light Blendings for Object Presentation, *Color Res. Appl.* 34, pp. 310-320, 2009.
- [40] Rea MS, Freyssinier-Nova JP, Color Rendering: A Tale of Two Metrics, *Color Res. Appl.* 33, pp. 192-202, 2008.
- [41] Mahler E, Ezrati JJ, Viénot F, Testing LED Lighting for Colour Discrimination and Colour Rendering, *Color Res. Appl.* 34, pp. 8-17, 2009.
- [42] Nakano Y, Tahara H, Suehara K, Kohda J, Yano T, Application of multispectral camera to color rendering simulator, *Proc. AIC Colour '05*, pp. 1625-1628, 2005.
- [43] Sándor N, Schanda J, Visual colour rendering based on colour difference evaluations, *Lighting Res. Technol.* 38/3, pp. 225-239, 2006.
- [44] Podobedov V, Ohno Y, Miller C, Davis W, Colorimetric control and calibration of NIST spectrally tunable lighting facility, *CIE 2010 Conference on Lighting Quality & Energy Efficiency*, Wien, 14 – 17 März 2010.
- [45] Davis W, Ohno Y, Development of a Color Quality Scale (CQS), *Proc., Sixth International Lighting Research Symposium on Light and Color*, Orlando, FL, February 2006.
- [46] Kuehni RG, Color Difference Formulas: An Unsatisfactory State of Affairs, *Color Res. Appl.* 33, pp. 324-326, 2008.
- [47] Bodrogi P, Brückner S, Khanh TQ, Effect of inter-observer variability of colour vision on the colour quality of modern light sources, *Lux Europa 2009*, Istanbul, 2009.



## Die LiTG ist ...

Die **Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. (LiTG)** mit Sitz in Berlin ist ein eingetragener technisch-wissenschaftlicher Verein und verfolgt gemeinnützige Ziele. Sie geht zurück auf die 1912 in Berlin gegründete Deutsche Beleuchtungstechnische Gesellschaft. Die LiTG gliedert sich in zur Zeit 16 Bezirksvertretungen mit rund 2300 Mitgliedern. Sie wird geleitet durch einen Vorstand und einen Vorstandsrat. Die fachlichen Belange werden im Technisch-Wissenschaftlichen Ausschuss (TWA) behandelt.

Die **LiTG** versteht sich als dynamisches Netzwerk und Wissensplattform für alle Licht-Interessierten zur Verbreitung lichttechnischen Fachwissens. Sie verbindet Wissenschaftler aus Forschung und Lehre, Ingenieure und Techniker aus Entwicklung, Fertigung, Projektierung und Vertrieb, Mitarbeiter aus Bundes- und Landesministerien sowie Kommunalverwaltungen, Architekten, Innenarchitekten, Lichtplaner, Elektrofachplaner, Handwerker, Produktdesigner, Mediziner, Künstler und Studierende aus diesen Bereichen. Zu ihren korporativen Mitgliedern zählen wissenschaftliche Institutionen, Fachverbände und Organisationen, Unternehmen aus allen Bereichen der Lichtindustrie, Stadtverwaltungen, Energieversorger, Architektur-, Ingenieur- und Lichtplanungsbüros.

Die **LiTG** fördert die Lichttechnik in Theorie und Praxis auf regionaler, nationaler und internationaler Ebene. Sie unterstützt sowohl die fachliche Aus- und Weiterbildung als auch die Forschung. Sie bietet ein lokal orientiertes, breitgefächertes Veranstaltungsprogramm aus Vorträgen, Diskussionen, Exkursionen und Besichtigungen, das über innovative lichttechnische Anwendungen, Entwicklungen, Produkte, Dienstleistungen und Forschungsvorhaben informiert und über gültige lichttechnische Vorschriften, Normen und Gesetze aufklärt.

Die **LiTG** beteiligt sich an der Erarbeitung nationaler und internationaler Normen und Vorschriften und kooperiert dazu mit nationalen und internationalen Fachorganisationen (z.B. DIN, CEN, ISO, CIE) sowie den lichttechnischen Gesellschaften aus aller Welt. Sie kooperiert ebenfalls mit dem Deutschen Nationalen

Komitee (DNK) der CIE (Internationale Beleuchtungskommission) und veranstaltet wissenschaftliche Fachtagungen zu aktuellen Themen auf nationaler und internationaler Ebene. Sie pflegt die Zusammenarbeit mit anderen Organisationen und Akteuren auf gemeinsamen Interessengebieten. Durch die enge Zusammenarbeit mit anderen nationalen lichttechnischen Fachverbänden auf internationaler, insbesondere europäischer Ebene soll ein gleicher Erkenntnisstand hergestellt werden, der in weitestgehend übereinstimmende Regeln der Technik umgesetzt werden kann.

Die **LiTG** erstellt und verbreitet Arbeits- und Forschungsergebnisse mit neuesten lichttechnischen Erkenntnissen in Form technisch-wissenschaftlicher Publikationen. Die LiTG-Publikationen stellen auf allgemein verständliche Weise technisch-wissenschaftliche Sachverhalte und Untersuchungsergebnisse dar. Dies wird bei sehr speziellen Fachthemen durch entsprechende Kommentare und Begriffserklärungen unterstützt. Arbeitsschwerpunkte bilden zur Zeit die Themen: **Außen-, Innen- und Fahrzeugbeleuchtung, Energieeffizienz, Biologische Wirkungen, Farbe, Lichtquellen, Messtechnik, Lichtarchitektur, Physiologie und Wahrnehmung sowie Tageslicht.**

Die LiTG-Publikationen erfüllen den Informationsbedarf an allgemeinen und speziellen Themen der angewandten Lichttechnik und angrenzender Gebiete. Sie machen das im Technisch-Wissenschaftlichen Ausschusses der LiTG vorhandene Fachwissen den Anwendern und der Öffentlichkeit zugänglich. Sie sind von Wissenschaftlern und Fachexperten erstellt und frei von kommerziellen Zielen.

### **Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V.**

Burggrafenstraße 6, D-10787 Berlin

Telefon +49 - (0)30 / 2601-2439

Telefax +49 - (0)30 / 2601-1255

E-Mail [info@litg.de](mailto:info@litg.de)

[www.litg.de](http://www.litg.de)