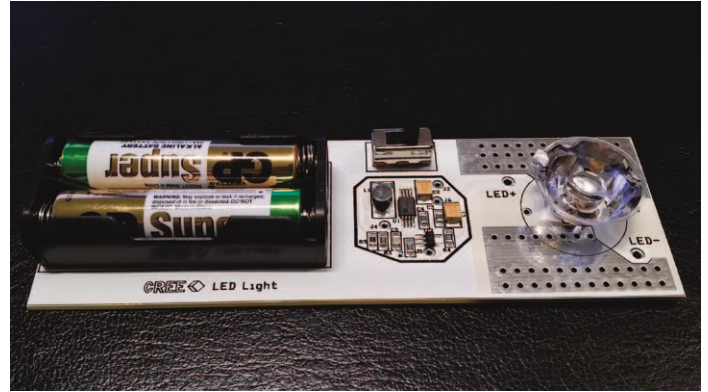
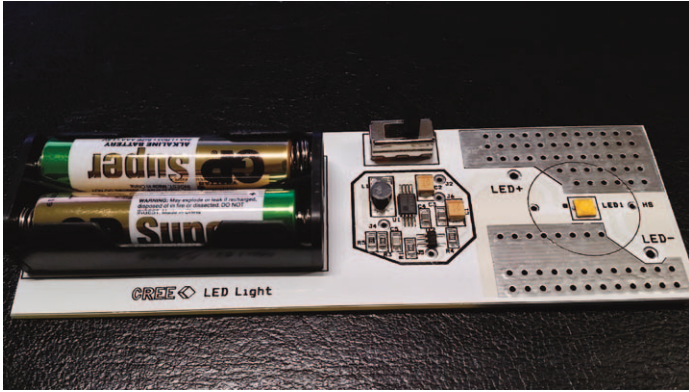


Wie wichtig sind lichttechnische Kennwerte?

Farbtemperatur, Farbkonsistenz, MacAdam, SDCM



Verwendung eines LED-Demo-Boards von Cree und einer Optik der Fa. Carclo

Licht ist nicht gleich Licht: Neben der Helligkeit kommt es z.B. auch auf die Farbkonsistenz, bewertet durch MacAdam, an. Zur Zeit der Glühlampe spielte maximal die Ausführung „matt“ oder „klar“ sowie die elektrische Leistung eine maßgebliche Rolle für ein einheitliches Erscheinungsbild dieser Lichtquellen. Doch schon die Leuchtstoffröhre musste näher spezifiziert werden. (In Angaben wie 840 waren der CRI und die Farbtemperatur versteckt.)

Seit September 2013 fordert die EU-Kommission von Lampen- und Leuchtenherstellern eine umfangreiche Kennzeichnung der Leuchtmittel und Leuchten. Neben den reinen elektrischen Angaben werden lichttechnische Angaben gefordert bzw. müssen Kriterien eingehalten werden. Lichttechnische Angaben – das sind insbesondere der Farbwiedergabeindex CRI und die Farbtemperatur bzw.

CCT (Correlated Color Temperatur). Diese müssen explizit genannt werden. Zudem gilt, dass der Farbort (Position im Farbdigramm, Bild 1) sich nur innerhalb kleiner Grenzen bewegen darf, um Streuungen im Erscheinungsbild zu begrenzen (EU-Forderung: SDCM <7). Dies und die damit verbundenen Zusammenhänge zu veranschaulichen ist Ziel dieses Artikels.

Die Farbtemperatur

Erhitzt man einen metallischen Körper, z.B. den Glühdraht einer Glühlampe, so erhält man abhängig von der Drahttemperatur unterschiedlich „warmes“ Licht. Bei noch niedrigeren Temperaturen von z.B. 1700 °C (= 1973 K) entsteht warmweißes (orang-rotes) Licht. Je heißer der Draht, desto bläulicher und kaltweißes das Licht. (Eine 25-W-Glühlampe erscheint wärmer, rötlicher als eine 100-W-Glühlampe.) Je höher die Temperatur des sog. thermischen Strahlers, desto „kälter“ die Lichtfarbe. Nein, das ist kein Widerspruch! In der Theorie versteht sich der metallische Körper als „schwarzer“ oder „Planckscher Strahler“ und weicht natürlich von dem Glühdraht etwas ab. Mehr dazu auf den angegebenen Wiki-Seiten. Die in Bild erkennbare Kurve (Black-Body-Kurve) bildet die Farborte eines schwarzen Strahlers in Abhängigkeit der Farbtemperatur ab.

temperatur des Leuchtmittels vollkommen unabhängig von der Farbtemperatur. Daher hat man die Correlated Color Temperatur eingeführt. Sie beschreibt einen vergleichbaren Wert. Dabei sollte der Farbort möglichst auch auf der obigen schwarzen Kurve liegen. Dies ist aber per Definition nicht nötig. So können Leuchtmittel identische Farbtemperatur haben, jedoch mal oberhalb oder unterhalb

der Black-Body-Kurve liegen. Diese Unterschiede können definitiv vom Auge wahrgenommen werden. Identische Farbtemperaturen bedeuten also nicht zwingend identische Lichtfarben.

Zu MacAdam

Sind Farbtemperatur, Helligkeit und Farbwiedergabe-Index gleich, so kann sich der Farbort dennoch unterscheiden.

Autor



Tom Reichelt
Inhaber des LED Shop
LEDclusive.de sowie tätig
als LED-Projektberater und
Referent.

Die ähnlichste Farbtemperatur (CCT)

Bei Leuchtstoffröhren, Energiesparlampen und LEDs ist die Betriebs-

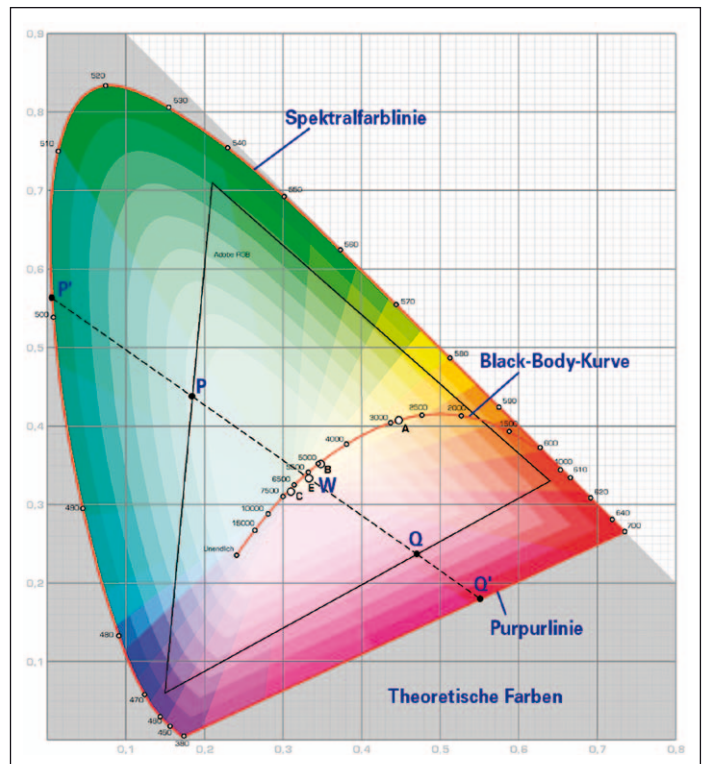


Bild 1: CIE1931-Normfarbtafel. Abbildung aller Farben in einem Koordinatensystem. Die Koordinaten des Farbortes spezifizieren die Lichtquelle (Quelle: Wikipedia)

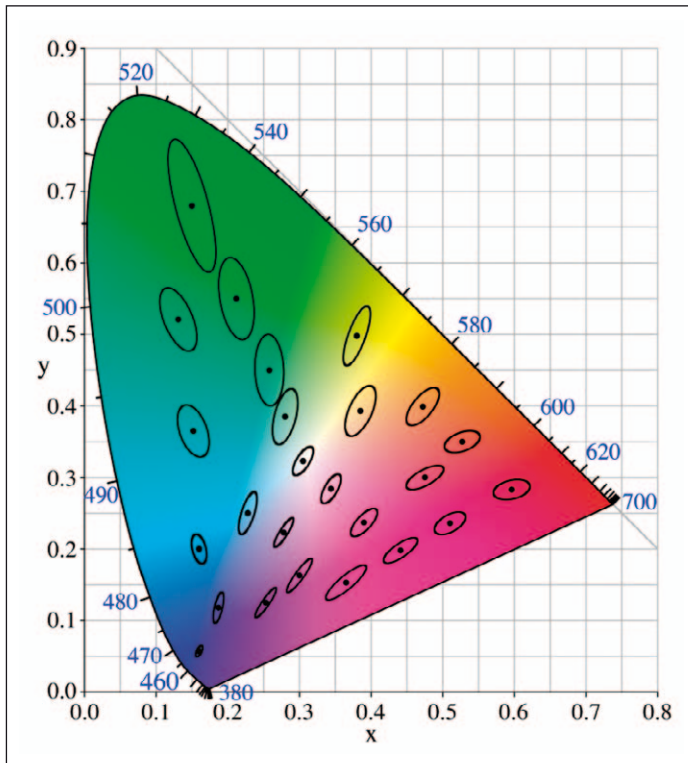


Bild 2: MacAdam-Ellipsen, zur Veranschaulichung vergrößert

den. Dies hatte David Lewis MacAdam 1942 erkannt und umfangreiche Forschungen betrieben. Herausgekommen sind die MacAdam-Ellipsen. MacAdam hatte seinerzeit erkannt, dass identische Änderungen hinsichtlich Abstand im Farbort unterschiedlich vom Menschen wahrgenommen wurden. Bzw. umgekehrt die Wahrnehmung identischer Farbreste liegt nicht kreisförmig, sondern auf unterschiedlich großen Ellipsen.

Bild 2 zeigt diese innerhalb des CIE9131-Diagramms. Diese Messreihe wurde von MacAdam nur mit einem Probanden durchgeführt. Doch was, wenn nun mehrere Probanden zur Bewertung herangezogen werden? Wie viele von 100 würden in Abhängigkeit der Ellipsengröße eine Abweichung erkennen? Eine Statistik musste her-

Die SDCM (Standard Deviation of Colour Matching)

Zur Wahrscheinlichkeitsberechnung wird häufig die Gaußsche Verteilungskurve mit ihren Standardabweichungen benutzt. So bedeutet eine Abweichung von 1 Sigma eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 68,3%. Auf dieser theoretischen Basis wurden mehrere Ellipsen ermittelt (Bild 3). Das bedeutet: Farbortunterschiede, welche inner-

halb 1-SDCM (bzw. der 1-MacAdam-Ellipse) liegen, können nur besonders gut Sehende – das sind 68,3 von 100 Probanden – wahrnehmen. Die Ellipse 3-SDCM ist größer, d.h., Unterschiede sind leichter zu erkennen. Hierin können 99,7% der Probanden Farbortunterschiede erkennen. Wer also bei einer Abweichung von ± 7 Sigma (entsprechend 7-SDCM) immer noch keine Unterschiede erkennen kann, dürfte als farbenblind eingestuft werden. Qualitätsbewusste Leuchtenhersteller achten darauf, dass die Streuung ihrer LED-Lampen 5-SDCM nicht überschreitet. Dies ist ein wichtiges Qualitätsmerkmal und passt auch zur Forderung der EU-Kommission. Diese fordert, dass die Standardabweichung 6-SDCM für LED-Produkte nicht überschritten werden darf. Im Lichte des gerade Dargestellten ist dies keine beeindruckende Forderung. Doch es wird wohl noch einige Zeit dauern, bis die LED-Hersteller sich innerhalb 3-SDCM bei akzeptablen Preisen bewegen.

MacAdam und die Farbtemperatur

MacAdam hatte 25 Ellipsen definiert, sechs davon entlang der Planckschen Kurve, und dies jeweils in der Nähe

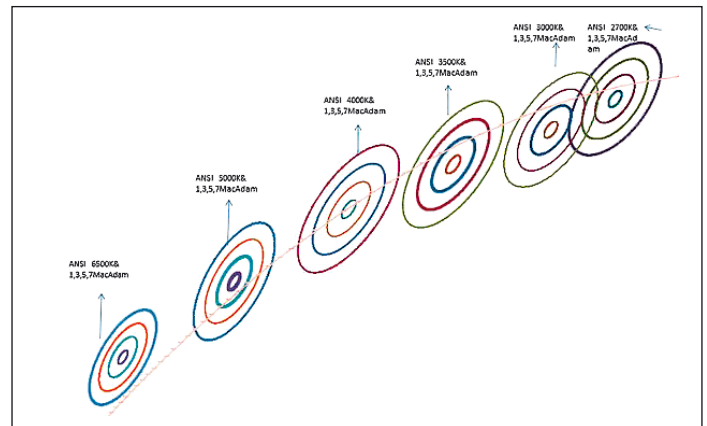


Bild 3: Sechs MacAdam-Ellipsen entlang der Black-Body-Line. ± 1 (2, 3) Sigma Abweichung entspricht 68,3 (95,5, 99,7) %

der Farbtemperaturen 2700, 3000, 3500, 4000, 5000 und 6500 K (Bild 3). Abhängig von der Größe der Ellipsen, sprich Standardabweichung (SDCM), wird auch ein entsprechender Farbtemperaturbereich überstrichen. Die Tabelle zeigt die Abweichungen der Farbtemperatur am Beispiel der Ellipse für 3000 K. Somit ist bei 4-SDCM eine Farbtemperatur-Abweichungen von ± 100 K möglich. Der erfahrene Lichtexperte weiß, dass 200 K Unterschied insbesondere bei Warmweiß gut mit dem Auge erkennbar sind. Und dabei muss der Farbort nicht mal zwingend auf der Black-Body-Line liegen. (Das tun sowieso auch nur die wenigsten MacAdam-Ellipsen.)

Seltene Veränderung des Farborts

Sie sehen: Nichts ist, wie es mal war oder sein sollte. Moderne Leuchtmittel sind tückischer als gedacht. Diese Erkenntnis veranlasste beispielsweise dazu, Einflüsse auf die Lichtqualität und somit auch auf die die Nachhaltigkeit von MacAdam-Angaben zu überprüfen.

Wir machten einen Versuch unter Verwendung des mobilen Spektrophotometers Lighting Passport von Asensek. Dabei wurde ein Lichtspektrometer-Sensor über Bluetooth mit einem Smartphone gekoppelt, auf dem eine spezielle App lief. Verwendung fand ein LED-Demo-Board von Cree und eine Optik der Fa. Carclo. Das Aufmacherfoto zeigt diese Versuchsanordnung. Bei den Messungen wurde der Spektrometer-Sensor jeweils ca. 5 cm oberhalb der LED Cree XPE bzw. Optik positioniert. Zur Erhöhung der Aussagefähigkeit erfolgten je fünf Messungen. Wie eindeutig in Bild 4 zu erkennen,

liegen die ersten fünf Messpunkte innerhalb der 3-MacAdam-Ellipse, berühren die Plancksche Kurve und zeigen eine Farbtemperatur von verlässlichen 3000 K. Die Messungen 6 bis 10 mit Optik dagegen zeigen, dass die Linse den Farbort Richtung 7-MacAdam geschoben sowie eine Veränderung der Farbtemperatur nach ca. 3075 K bewirkt hat. Zudem liegt der Farbort nun unterhalb der Planckschen Linie. Fazit: Nicht die LED, sondern die Optik ist schuld!

Zusammenfassung

Wer misst misst Mist – und das scheint sinngemäß auch für Lichtmessungen zu gelten. Haben die MacAdam-Ellipsen wirklich so eine hohe Bedeutung? Schließlich werden die Farborte der LEDs über ANSI-Binnings bereits schon ausreichend spezifiziert. 7-SDCM entspricht etwa einem ANSI-Bin. Diese werden in weitere vier bzw. 16 Bins unterteilt. Es sollte genügen, diese Bins einzuhalten.

Seinerzeit wurden die Referenzorte der MacAdam-Ellipsen willkürlich festgelegt und decken längst nicht alle Farbortbereich ab. So sind inzwischen LEDs mit 2200, 4500 oder 6000 K erhältlich. Diesen ist gar keine MacAdam-Ellipse zuzuordnen. Es sei denn, der Hersteller spezifiziert sich eigene. Doch wie sinnvoll ist das? Gibt es doch kaum eine Leuchte ohne Abdeckscheibe oder Optik. Eine Farbverschiebung der so teuer eingekauften LED ist somit schon vorprogrammiert. Wie steht es mit den entsprechenden Angaben der Optikhersteller bezüglich Einhaltung der Farbkonstanz und Homogenität?

Nicht zu vergessen das Thema Alterung von LEDs und Optiken. Weitere

Einflüsse sind noch Betriebstemperatur und Betriebsstrom der LED. Auch Toleranzen in den Konstantstromquellen führen zu Farbortverschiebungen. Um das vernünftig bewerten zu können, kommt man an mobiler Lichtmesstechnik, wie den Lichtmessgeräten von Asensetek, nicht mehr vorbei. Mit dem zunehmendem Einsatz dieser Gerät wächst das Verständnis für Licht. So können die richtigen Entscheidungen einfacher getroffen und teure Versuche erspart werden.

Quellen im Web:

What's the difference between a 3-SDCM ellipse and a 7-SDCM ellipse? Warum Weiß nicht immer gleich weiß ist. Farbortverschiebung bei LEDs. Farbtemperatur (Wikipedia) Talking Photometry

Ellipse	Abweichung CCT
1-SDCM	±30 K
2-SDCM	±60 K
4-SDCM	±100 K
7-SDCM	±175 K

Tabelle: Abweichungen der Farbtemperatur am Beispiel der Ellipse für 3000 K

■ LEDclusive.de
www.ledclusive.de

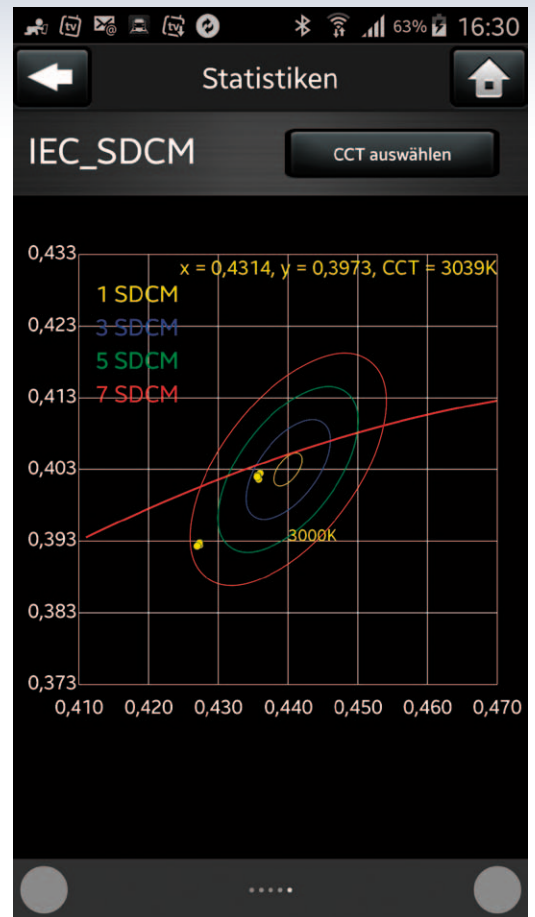


Bild 4+5: Smartphone-Screenshots der Spektrometer-App SGM, rechts die Messergebnis-Ausgabe. Die ersten fünf Messpunkte liegen innerhalb der 3-MacAdam-Ellipse