

Wenn weisses Licht farbig wird

Die Beleuchtungstechnik befindet sich in einem historischen Umbruch: Die herkömmlichen Glühlampen müssen aufgrund gesetzlicher Vorschriften künftig durch sparsame Kompaktfluoreszenz- und LED-Leuchten ersetzt werden. Das stellt die Messtechnik vor grosse Herausforderungen: Damit die neuen Lichtquellen charakterisiert werden können, braucht es neben den klassischen elektrischen und photometrischen Messgrössen zusätzliche Informationen über Farbtemperatur und Farbwiedergabe. Wie es sich damit verhält und welche Massnahmen das METAS ergriffen hat, um die Beleuchtungsindustrie in messtechnischer Hinsicht wirkungsvoll zu unterstützen, wird hier dargelegt.

PETER BLATTNER

Spektrale Messungen für die Lichttechnik werden in den kommenden Jahren deutlich zunehmen, weil sie einerseits Voraussetzung sind, um die bei farbigen Lichtquellen nötigen Korrekturfaktoren zu bestimmen, und andererseits, damit wichtige farbmetrische Messgrössen wie die Farbwiedergabeindizes direkt bestimmt werden können.

Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges

Weissen elektromagnetische Strahlen eine genügend grosse Leistung auf und liegen ihre Wellenlängen zwischen 360 nm und 830 nm, so stimulieren diese das Auge. Die lichtempfindlichen Elemente der Retina des Auges sind vor allem die *Zäpfchen für das Tagesehen, photopische Beobachter*, und die *Stäbchen für das Nachtsehen, skotopische Beobachter*. Die entsprechenden Wirkungsfunktionen, insbesondere die spektralen Hellempfindlichkeitsgrade für das *photopische Sehen $V(\lambda)$* und das *skotopische Sehen $V'(\lambda)$* , sind bekannt und für einen sogenannten Standardbeobachter normiert.

Jedes photometrische Messgerät muss entweder eine entsprechende *spektrale Empfindlichkeit* aufweisen oder die Strahlung *spektral aufgelöst messen* und daraus die *photometrische*



1 Messen der Lichtstärke einer blauen LED. Neben den drei Referenzphotometern wird auch ein Spektroradiometer zum Messen der spektralen Verteilung der LED eingesetzt. Dadurch können Abweichungen der spektralen Anpassung der Photometer korrigiert und die Messunsicherheit verkleinert werden.

Messgrösse numerisch berechnen können. Wurden in der Vergangenheit hauptsächlich Lichtquellen eingesetzt, die *spektral breitbandig* sind, z. B. herkömmliche Glühlampen, kommen heute vermehrt *schmalbandige Lichtquellen* zum Einsatz, z. B. farbige Leuchtdioden (LED). Diese neuen Lichtquellen stellen in messtechnischer Hinsicht eine grosse Herausforderung dar.

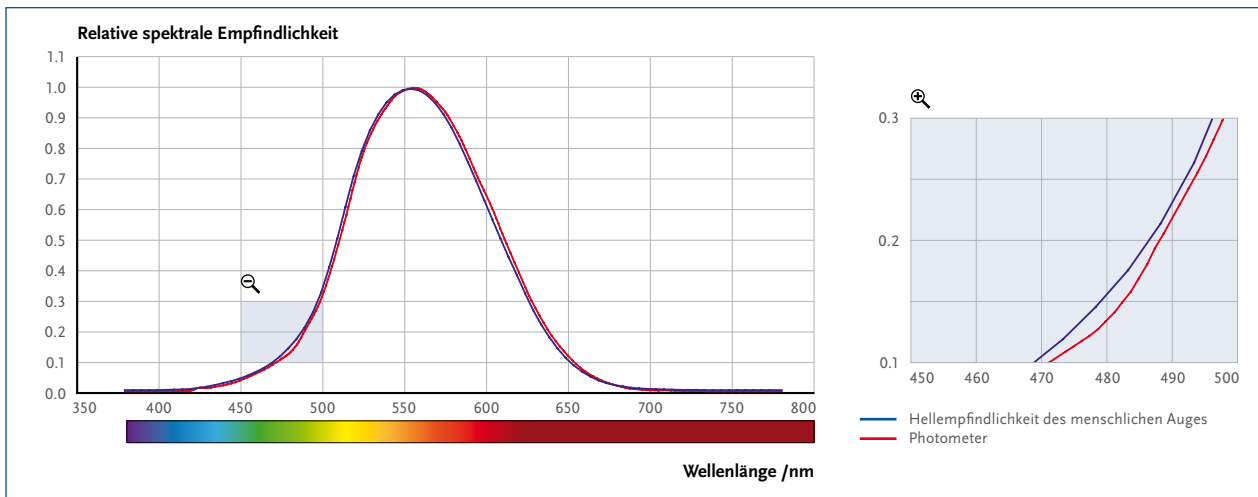
Photometrische Basis des METAS

In der Lichtmesstechnik werden hauptsächlich Luxmeter, Leuchtdichtemesser und Leuchtdichtemesskameras verwendet. Diese photometrischen Messgeräte besitzen spezielle Farbfilter, die dafür sorgen, dass die spektrale Empfindlichkeit der normierten Hellempfindlichkeitskurve des menschlichen Auges $V(\lambda)$ entspricht. Je nach Qualität des Photometers ist die Anpassung sehr genau.

Für normale, weisse Lichtquellen ist die relative Messabweichung auf Grund der spektralen Anpassung für gute Photometer typischerweise kleiner als 1%. Diese spektralintegrierenden Photometer bestimmen die entsprechende Messgrösse direkt, ohne das Licht in ihre Spektralkomponenten aufzuteilen. Die Kalibrierung solcher Messgeräte erfolgt typischerweise in einem Vergleich mit Referenzmessgeräten. Als Lichtquelle wird gemäss den Richtlinien der Internationalen Beleuchtungskommission [1] Glühlicht mit einer Verteilungstemperatur von 2856 K (CIE-Normlichtart A) verwendet.

Kryogenisches Radiometer als Primärnormal

Als photometrische Basis verwendet das METAS eine Gruppe kalibrierter Referenzluxmeter. Deren Empfänger bestehen aus einem Silizium-Trapdetektor mit nahezu 100 % Quantenausbeute, einer Präzisionsblende und einem temperaturstabilisierten Farbfilter für die Anpassung an die $V(\lambda)$ -Kurve. Diese Referenzempfänger sind ihrerseits an die Basis der Radiometrie angeschlossen, die im METAS mit Hilfe eines kryogenischen Radiometers realisiert wird und als Primärrealisierung der optischen Strahlungsmessung dient [2]. Alle benötigten photometrischen Grundgrössen werden von der Photometriebasis, also der Gruppe der Referenzluxmeter, abgeleitet, insbesondere die Lichtstärke (Einheit: Candela, cd), die Leuchtdichte (cd/m^2), der Lichtstrom (Lumen, lm) und die Beleuchtungsstärke (Lux, lx).



2 Spektrale Anpassung eines Photometers an die normierte Hellempfindlichkeitskurve des menschlichen Auges. Bei schmalbandigen Lichtquellen wirken sich Abweichungen sehr stark aus.

Umrechnung radiometrischer in photometrische Messgrößen

Die Umrechnung einer radiometrischen Grösse, z. B. des spektralen Strahlungsflusses $\Phi_z(\lambda)$, in eine photometrische Grösse, z. B. den Lichtstrom Φ_v , erfolgt gemäss

$$\Phi_v = K_m \int_{360 \text{ nm}}^{830 \text{ nm}} \Phi_z(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

wobei $K_m = 683 \text{ lm/W} [V(\lambda = 555 \text{ nm})/V(\lambda = 555.016 \text{ nm})]$.

Die Gleichung (1) basiert direkt auf der Candela-Definition und der dazugehörigen Mise-en-pratique [3]. Der Korrekturfaktor $V(\lambda = 555 \text{ nm})/V(\lambda = 555.016 \text{ nm})$ rührt daher, dass das Maximum der Hellempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ bei 555 nm liegt, die Candela aber für eine optische Frequenz von 540 THz definiert ist, die in Standardluft einer Wellenlänge von 555,016 nm entspricht. Für praktische Anwendungen gilt $K_m \cong 683 \text{ lm/W}$.

Die Lichtmessung am METAS im Wandel der Zeit

Die Beleuchtungsindustrie befindet sich auf Grund technologischer Fortschritte und sich ändernder rechtlicher Rahmenbedingungen in einem historischen Umbruch: In zunehmendem Mass werden Glühbirnen durch Kompaktfluoreszenz- und LED-Leuchten ersetzt, die dank interessanten geometrischen und spektralen Eigenschaften eine Vielfalt von Gestaltungsmöglichkeiten bieten.

Damit die neuartigen Lichtquellen charakterisiert werden können, braucht es neben den photometrischen Messgrößen zusätzliche Parameter. Die neue EG-Verordnung 244/2009 über die Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Haushaltslampen [4] und auch das Minergielabel für LED-Leuchten [5] verlangen neben den elektrischen und photometrischen Angaben zusätzliche Informationen über Farbtemperatur und Farbwiedergabe. Zudem werden vermehrt Luxmeter und Leuchtdichtemesser für das Messen farbiger Strahlung herangezogen. Weiter gibt es neustens auch farbige Lichtstärke-

und Leuchtdichtenormale. Diese rasante Entwicklung hat wesentliche Konsequenzen für die Metrologie.

Korrekturfaktoren für photometrische Messungen

Bei Quellen, die spektral schmalbandiges Licht emittieren, wirken sich kleine Abweichungen der spektralen Empfindlichkeit des Photometers zur $V(\lambda)$ -Kurve viel grösser aus als bei Quellen, die breitbandiges, weisses Licht aussenden. Das Diagramm 2 zeigt die relative spektrale Empfindlichkeit eines sehr gut angepassten Photometers. Für eine weisse Quelle wäre die Abweichung auf Grund der spektralen Fehlanpassung kleiner als 1 %. Würde die Beleuchtungsstärke einer blaugrünen LED in einem bestimmten Abstand und einer Richtung mit dem Photometer gemessen, entstünde auf Grund der spektralen Fehlanpassung ein Messfehler von mehr als 10 %.

Damit dieser Fehler korrigiert und die Messunsicherheit bestimmt werden kann, müssen die spektralen Eigenschaften des Photometers und der Lichtquelle bekannt sein. Die Photometrie farbiger Lichtquellen stützt sich somit auf radiometrisch gemessene Korrekturfaktoren ab. Insbesondere müssen die relative spektrale Verteilung der zu messenden Lichtquelle $S_Z(\lambda)$ und die relative spektrale Empfindlichkeit des Photometers $S_{rel}(\lambda)$ bekannt sein. Der Korrekturfaktor für die spektrale Fehlanpassung F_Z , gelegentlich auch *Spectral Mismatch Correction Factor (SMCF)* genannt, ist gegeben durch

$$F_Z = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_A(\lambda) \cdot s_{rel}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_Z(\lambda) \cdot s_{rel}(\lambda) d\lambda} \bigg/ \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_A(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_Z(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

wobei $S_A(\lambda)$ die spektrale Verteilung der Lichtquelle ist, die für die Kalibrierung des Photometers verwendet wurde. Die Integrationsgrenzen λ_{\min} und λ_{\max} in Gleichung (2) entsprechen den Grenzwellenlängen des empfindlichen Bereichs des Photometers.

Mess- und Kalibrierdienstleistungen des METAS

Das METAS verfügt über die Einrichtungen und Verfahren, um diese Korrekturfaktoren bestimmen zu können und gibt diese in Mess- und Kalibrierdienstleistungen weiter. Die vorhandene Rückverfolgbarkeitskette und die in den vergangenen Jahren aufgebauten Messplätze sind in Illustration 3 dargestellt. Im Wesentlichen gibt es zwei Möglichkeiten, ein Photometer in Bezug auf farbige Lichtquellen zu kalibrieren:

- Entweder wird das Messgerät direkt mit Hilfe der gewünschten Quelle kalibriert; hierzu ist es erforderlich, das Spektrum der Lichtquelle zu messen und den Korrekturfaktor gemäss Gleichung (2) für die Referenzphotometer des METAS zu berechnen. Der Kunde erhält einen Korrekturfaktor für genau diese Lichtquelle.
- Alternativ dazu werden die spektrale Empfindlichkeit des Photometers des Kunden bestimmt und die Korrekturfaktoren für beliebige Spektren gemäss Gleichung (2) berechnet. Um diese Korrekturfaktoren berechnen zu können, ist es Voraussetzung, dass der Kunde seine Lampenspektren genügend genau kennt. Die benötigten Schritte für das Kalibrieren der Lichtstärke eines farbigen Lichtstärkenormal sind in Illustration 4 zusammengefasst.

Komplexe Charakterisierung von Spektroradiometern

In gewissen Fällen genügt es, die photometrischen Messgrössen direkt auf Grund von Spektralmessungen unter Anwendung der Gleichung (1) zu bestimmen. Im Allgemeinen sind Spektroradiometer aber komplexe Messgeräte, die eine wesentlich höhere Messunsicherheit aufweisen, eine geringere Empfindlichkeit haben und längere Messzeiten erfordern als einfache Photometer. Die Charakterisierung von Spektroradiometern in Bezug auf Streulicht und spektraler Bandpassfunktion ist komplex und benötigt eine umfangreiche Infrastruktur, z. B. eine durchstimmbare Laserquelle [6]. Absolute photometrische Messwerte mit kleinsten Messunsicherheiten werden mit Hilfe spektral korrigierter Photometer erzielt.

Dreibereichs-Farbmessgeräte mit spektralintegrierenden Messempfängern

Differenzierter ist die Situation für relative Messgrössen: Farbwertanteile und ähnlichste Farbtemperaturen können mit Dreibereichs-Farbmessgeräten bestimmt werden. Diese Messgeräte bestehen aus drei spektralintegrierenden Messempfängern, die an die jeweiligen Spektralwertfunktionen (Colour-matching functions) angepasst sind. Aus den drei Farbwerten X , Y und Z werden durch Normierung die Farbwertanteile (Farbkoordinaten) x und y bestimmt:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}, y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (3)$$

Beim Messen der Farbwerte stellen sich ähnliche Probleme wie beim Photometer: Werden spektral schmalbandige Lichtquellen gemessen, ist es erforderlich, die einzelnen Farbwerte individuell zu korrigieren. Nur so ergeben sich die kleinstmöglichen Messunsicherheiten.

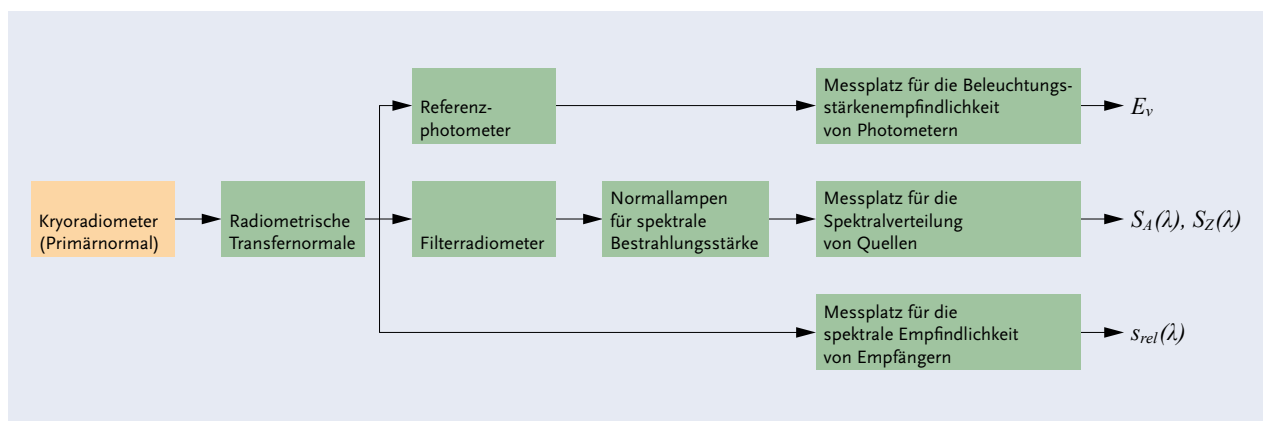
Ähnlichste Farbtemperatur

Aus den Farbwertanteilen lässt sich direkt die ähnlichste Farbtemperatur bestimmen, nämlich die Temperatur eines Planckschen Strahlers (idealer Wärmestraher), der bei festgelegten Beobachtungsbedingungen die gleiche Farbwiedergabe hervorruft wie die zu prüfende Lichtquelle. Weisse Lichtquellen werden auf Grund ihrer ähnlichsten Farbtemperatur in drei Bereiche unterteilt:

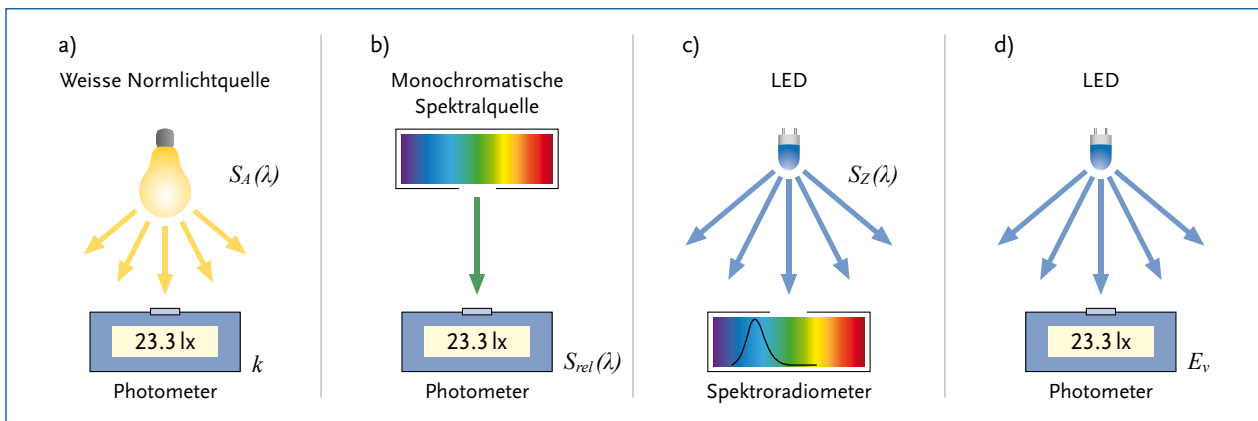
- *warmweiss* für eine ähnlichste Farbtemperatur < 3300 K;
- *neutralweiss* für den Bereich 3300 K bis 5300 K und
- *tageslichtweiss* für eine ähnlichste Farbtemperatur > 5300 K.

Farbwiedergabeindizes

Gewisse Messgrössen können nicht oder nur mit hohem Aufwand durch spektralintegrierende Messgeräte bestimmt werden. Ein wichtiges Beispiel sind die Farbwiedergabeindizes. Weisse Lichtquellen können zwar gut mit Hilfe der ähnlichsten Farbtemperatur definiert werden. Mit deren Angabe allein ist aber eine Quelle nicht vollständig charakterisiert.



3 Rückverfolgbarkeitskette des METAS für das Messen farbiger Lichtquellen: Neben der Beleuchtungsstärke E_v , muss die relative spektrale Verteilung $s_{rel}(\lambda)$ der Kalibrierlampe $S_A(\lambda)$ und der zu messenden Lichtquelle $S_Z(\lambda)$ sowie die relative spektrale Empfindlichkeit des Photometers $s_{rel}(\lambda)$ bekannt sein.



4 Das Kalibrieren der Lichtstärke eines farbigen Lichtstärkennormal im METAS beinhaltet verschiedene Schritte: a) ein Photometer wird mit Hilfe einer weissen Normlichtquelle kalibriert; b) eine monochromatische Lichtquelle wird zum Bestimmen der relativen spektralen Empfindlichkeit des Photometers verwendet; c) die relative spektrale Verteilung der farbigen Lichtquelle wird mittels Spektroradiometer bestimmt; d) die Beleuchtungsstärke des Lichtstärkennormal wird gemessen und die Anzeige mittels Korrekturfaktor korrigiert.

Zwei weisse Lichtquellen können beim direkten Blick in die Quelle die gleiche Farbe aufweisen, das von einer Oberfläche (z. B. Kleiderstoff) reflektierte Licht kann jedoch farblich als sehr verschieden empfunden werden. Der Grund dafür ist, dass die spektrale Zusammensetzung des Lichts der Quelle verschieden sein kann, auch wenn die Farbe der Quelle gleich erscheint (Metamerie).

Wird das Licht von einer farbigen Fläche reflektiert, werden die verschiedenen spektralen Anteile des Lichts ungleich gewichtet zurückgeworfen und es erfolgt eine farbliche Verschiebung. Die Qualität der Farbwiedergabe kann mit Hilfe der CIE-Farbwiedergabeindizes errechnet werden. Grundgrößen sind die spektrale Verteilung der Lichtquelle und der spektrale Reflexionsgrad einer Anzahl von Normfarben.

Herausforderung Messunsicherheit

Ein besondere Herausforderung ist das Bestimmen der Messunsicherheit von Messgrößen, die aus Spektralwerten abgeleitet werden: Neben den üblichen Anteilen, die durch die Rückverfolgbarkeitskette, die Messbedingungen und die statistischen Variationen entstehen, müssen auch Unsicherheiten in der Wellenlängenskala berücksichtigt werden. Dabei spielen mögliche Wellenlängenkorrelationen eine zentrale Rolle.

In der Praxis wird die Wellenlängenskala von Spektroradiometern und Monochromatoren typischerweise mit Hilfe von Niederdruck-Entladungslampen, z. B. Quecksilber, kalibriert, die ein diskretes Wellenlängenspektrum besitzen. Die Wellenlängen $\lambda_{e,i}$ dieser atomaren Emissionslinien sind sehr gut bekannt: $U(\lambda_{e,i}) < 1$ pm. Trotzdem kann durch eine nicht homogene Ausleuchtung der Eintrittsöffnung der Monochromatoren und Spektroradiometer ein grosser Wellenlängenoffset entstehen, das heisst sämtliche Wellenlängen sind um einen bestimmten Betrag verschoben. Diese Korrelationen sind bei der Messunsicherheitsberechnung von abgeleiteten Messgrößen zu berücksichtigen.

Korrelationen können aber auch direkt durch die Definition der Messgrößen entstehen. Die Farbkoordinaten (x, y) sind durch die Gleichung (3) miteinander verbunden. Diese Korrelation der Messgrößen ist in Illustration 5 dargestellt. Im unkorrelierten Fall, z. B. bei weissen und grünen LED, sind die Vertrauensbereiche kreisförmig. Je höher die Korrelation ist, desto elliptischer wird der Vertrauensbereich.

Für rote LED degeneriert die Ellipse praktisch zu einer Linie; es würde an und für sich reichen, nur eine Koordinate zu spezifizieren. Grund dafür ist, dass die Spektralwertfunktion für den Z-Farbwert im roten Bereich fast null ist und die Gleichung (3) zu einer einfachen Beziehung zwischen x und y führt: $y \cong 1-x$. Die Angabe von Korrelationskoeffizienten bei Farbkoordinaten wird selbst in der einschlägigen Literatur oft unterschlagen.

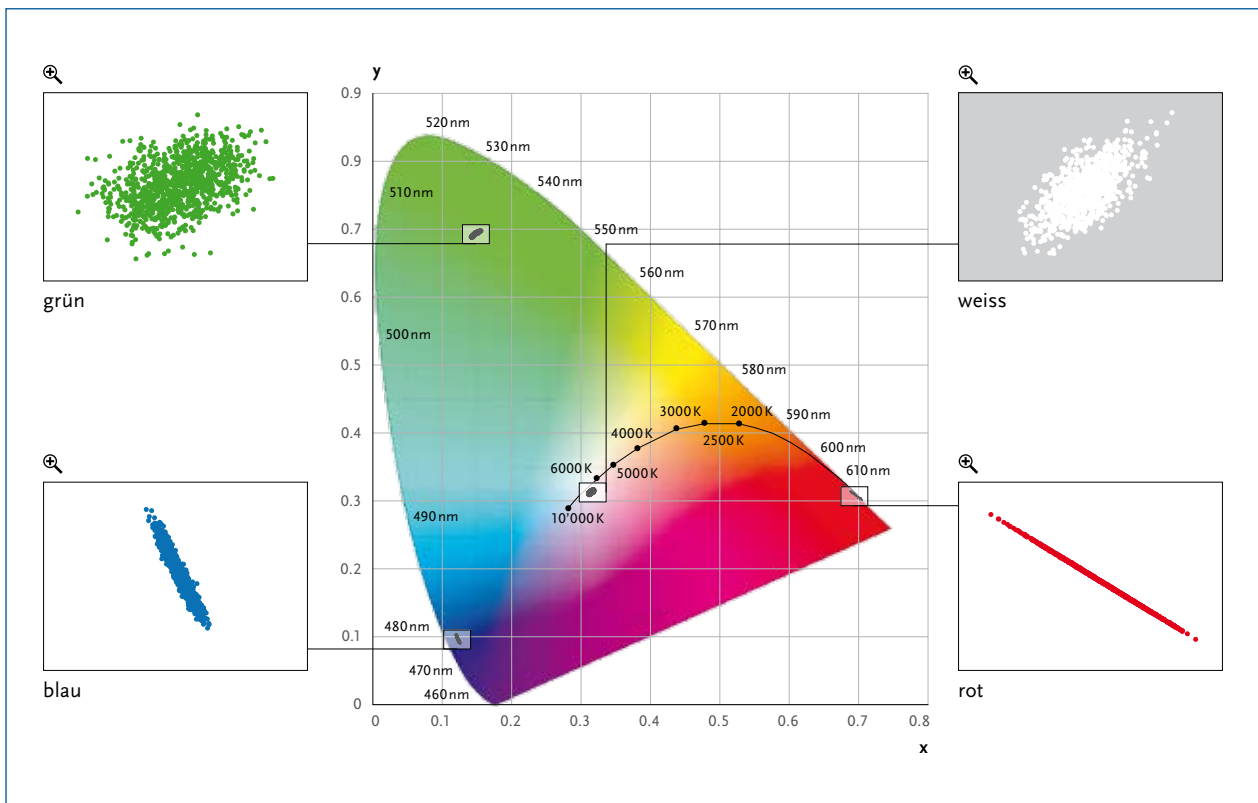
Dämmerungssehen

Je nach Umgebungshelligkeit sind im menschlichen Auge zwei verschiedene Empfänger aktiv: Für das Tagessehen sind vor allem die farbbempfindlichen Zäpfchen aktiv (photopischer Beobachter). Für das Tagessehen wird eine Adaptionsleuchtdichte von mindestens $L_{adapt} > 10$ cd/m² vorausgesetzt. Das Maximum der spektralen Empfindlichkeit für das Tagessehen liegt bei 555 nm.

In dunkler Nacht ($L_{adapt} > 0.01$ cd/m²) sind nur die Stäbchen aktiv (skotopischer Beobachter). Die entsprechende Hellempfindlichkeitskurve $V'(\lambda)$ ist in Richtung blau verschoben. Die Helligkeitsempfindung der Stäbchen ist rund zweieinhalb Mal so gross wie die der Zäpfchen (siehe Diagramm 6).

Candela-Definition

Die aktuelle *Mise-en-pratique* der Candela-Definition [3] erlaubt es, die photometrischen Einheiten *Candela*, *Lux* und *Lumen* für beide Beobachter zu verwenden.



5 Typische Vertrauensbereiche der Farbkoordinaten verschieden farbiger LED. Während für weisse und grüne LED die Farbkoordinaten x und y nur schwach korreliert sind, ist bei der roten LED eine starke negative Korrelation vorhanden. Die Punktwolken wurden mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode generiert.

Für photopische und skotopische Messgrössen gilt dieselbe Candela-Definition, da beide den gleichen Konversionsfaktor $K_{cd} = 683 \text{ lm/W}$ benutzen (photometrisches Strahlungsäquivalent bei 540 THz). Aus der Angabe eines Messwertes und der Einheit, z. B. 2 lx, ist nicht ersichtlich, ob es sich um eine photopische oder skotopische Beleuchtungsstärke handelt.

Diese Spezifizierung müsste bei der entsprechenden Messgrösse gemacht werden (z. B. photopische Beleuchtungsstärke). In den meisten Fällen wurde aber in der Vergangenheit nur der photopische Standardbeobachter verwendet und auf eine Präzisierung des Beobachters verzichtet: Sämtliche lichttechnischen Normen und Richtlinien basieren auf der $V(\lambda)$ -Funktion. Selbst in den Zwischenbereichen – beim Dämmerungssehen – wie sie bei der Strassen- und Tunnelbeleuchtung von grosser Bedeutung sind, wurden bisher lediglich photopische Werte verwendet. Auch existieren im Moment auf dem Markt praktisch nur photopisch angepasste Photometer.

Problemfall Strassen-, Platz- und Tunnelbeleuchtung

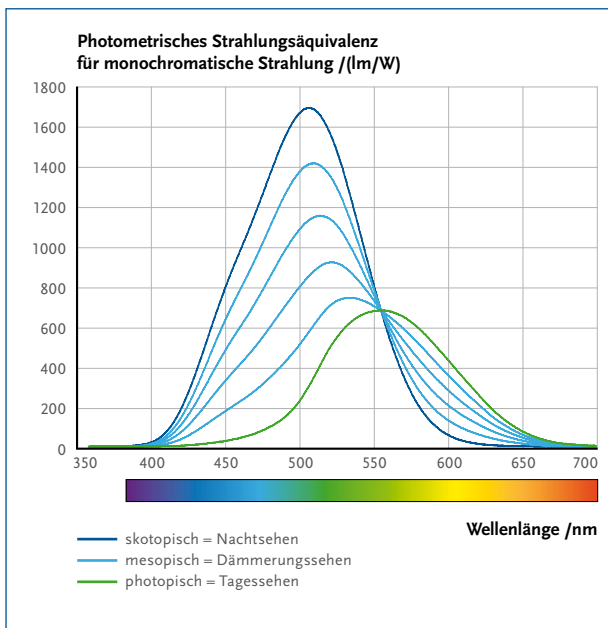
Die Situation könnte sich aber mit der vermehrten Verwendung von LED-Lichtquellen, speziell bei der Beleuchtung von Strassen, Plätzen und Tunneln, ändern. Weisse LED besitzen einen markant höheren Blauanteil als die bisher in der Strassenbeleuchtung üblicherweise eingesetzten, gelben Natrium-Hochdrucklampen. Da sich die Hellempfindung für das Dämmerungssehen (mesopischer Beobachter) ins Blaue verschiebt,

wirken LED-Strassenleuchten bei gleichen Werten der photopischen Messgrössen effizienter als klassische Leuchten.

Das Technische Komitee TC1-58 der Internationalen Beleuchtungskommission (CIE) hat vor Kurzem die wissenschaftlichen Arbeiten für die mesopischen Beobachter abgeschlossen und eine Empfehlung für Hellempfindlichkeitskurven im diesem Bereich veröffentlicht. Im Diagramm 6 ist dargestellt, wie sich die spektrale Hellempfindlichkeit im mesopischen Bereich ändert.

Eine zusätzliche Schwierigkeit besteht darin, dass – je nach Adaptationsleuchtdichte – sich die zu bewertende Hellempfindlichkeitskurve ändert und damit auch der Zahlenwert der zugehörigen photometrischen Messgrösse. Ein Beispiel: Ein wichtiger Parameter der Lichttechnik ist die Lichtausbeute einer Quelle. Sie ist das Verhältnis des (photopischen) Lichtstroms der Quelle zur elektrischen Gesamtleistung der Quelle und wird mit der Einheit Lumen pro Watt (lm/W) ausgedrückt.

Im mesopischen Bereich würde eine Strassenleuchte nun nicht mehr einen einzigen lm/W -Wert besitzen, sondern mehrere: Abhängig von der Adaptationsleuchtdichte würde sich dieser Wert nämlich ändern. Aufgrund einer Messung der spektralen Verteilung kann die Lichtausbeute für jede Adaptionsleuchtdichte berechnet werden. Inwieweit sich der mesopische Standardbeobachter in die Praxis umsetzen lässt und durch



6 Hellempfindlichkeit für verschiedene Adaptationsniveaus des menschlichen Auges.

Vom 30. bis 31. August 2010 wird im Bundesamt für Metrologie (METAS) in Bern-Wabern das *Tutorial and Expert Symposium* zum Thema *Spectral and imaging methods for photometry and radiometry* durchgeführt. Es steht unter dem Patronat der Internationalen Beleuchtungskommission (CIE) und der Schweizer Licht Gesellschaft (SLG). Am ersten Tag werden Experten der Photometrie und Radiometrie aus dem In- und Ausland über den Stand der Lichtmesstechnik referieren. Am zweiten Tag findet ein wissenschaftliches Symposium zu den folgenden Themen statt:

- spektrale und räumliche Korrekturmethode (Streu-licht, Bandpassfunktion, räumliche und Winkel-Auflösung);
- Photometrie von organischen Leuchtdioden (OLED), Hochleistungs-Leuchtdioden (LED) und Festkörperbeleuchtungen (Solid-state-Lighting-Produkte); angesprochen werden insbesondere auch Aspekte der Energieersparnis;
- Photometrie und Radiometrie zirkadianer und mesopischer Messgrößen;
- Lichtquellen mit programmierbaren Spektralverteilungen inklusive durchstimmbare monochromatische Quellen;
- Leuchtdichtemesskameras;
- Messunsicherheiten bei spektralen, räumlichen und winkelabhängigen Messgrößen.

7 Einzelheiten über das internationale Symposium zum Thema Spektral-messungen in Photometrie und Radiometrie sind über www.d2symp.ch erhältlich.

nationale Normen übernommen wird, ist im Moment offen. Voraussetzung wäre eine Überarbeitung der *Mise-en-pratique* der Candela-Definition.

Der biodynamischen Beleuchtung gehört die Zukunft

Ein interessantes, aktuelles Forschungsgebiet ist der Einfluss von Licht auf den zirkadianen Rhythmus (Tagesverlauf des Menschen, Chronobiologie). Verantwortlich für diesen Einfluss sind vor Kurzem entdeckte, nicht visuelle Empfänger auf der Netzhaut des menschlichen Auges, sogenannte *Intrinsically photosensitive retinal ganglion cells (ipRGCs)*, die hauptsächlich im Blauen empfindlich sind.

Künftige ergonomische Beleuchtungseinrichtungen, sogenannte biodynamische Beleuchtungen, werden variable Lichtspektren generieren und somit gezielt Einfluss auf die Stimmung und den Tagesrhythmus nehmen. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die spektrale Wirkungsfunktion genügend genau bekannt ist und entsprechende Messgeräte zur Quantifizierung erhältlich sind.

Die Bedeutung spektraler Messungen im Bereich *Photometrie* wird in den nächsten Jahren deutlich zunehmen. Einerseits sind sie Voraussetzung, um die bei farbigen Lichtquellen nötigen Korrekturfaktoren zu bestimmen, andererseits können auch wichtige farbmtrische Messgrößen direkt bestimmt werden (Farbwiedergabeindizes).

Referenzen

- [1] Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), www.cie.co.at.
- [2] Peter Blattner: Neue optische Strahlungsmessbasis am METAS, METinfo, Vol. 12, Nr. 2, pp. 4–9, 2005.
- [3] BIPM Monograph: Principles Governing Photometry, Metrologia 19, 97–101, 1983.
- [4] Verordnung 244/2009 der EG über die Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Haushalts-lampen.
- [5] Peter Blattner, Hans Lehmann: Minergiestandard prüfen, METinfo, Vol. 15, Nr. 1, pp. 24–25, 2008.
- [6] Peter Blattner: Achtung: Laserstrahlung!, METinfo, Vol. 16, Nr. 3, pp. 7–13, 2009.



Dr. Peter Blattner, Laborleiter *Optik*, Direktwahl +41 31 32 33 340, peter.blattner@metas.ch.