

Metrologie für moderne Lichtquellen: LEDs und OLEDs

Thorsten Gerloff*

* Thorsten Gerloff,
Arbeitsgruppe
„Photometrie“, E-Mail:
thorsten.gerloff@ptb.de

1. Eine einleitende Beschreibung von Glühlampen, LEDs und OLEDs

Der Einsatz *Licht Emittierender Dioden* (LED) in der Allgemeinbeleuchtung hat in den vergangenen Jahren erheblich zugenommen. Ein entscheidender Vorteil der LED gegenüber der traditionellen Glühlampe liegt in ihrer überlegenen Lichtausbeute η_v – dem Verhältnis des emittierten Lichtstroms Φ_v und der aufgenommenen elektrischen Leistung P_{el} , angegeben in Lumen/Watt.

Dieser Vorteil beruht auf den Unterschieden der zugrunde liegenden Technologien der Lichterzeugung beider Lampentypen. Bei einer (Halogen-) Glühlampe wird der Glühfaden durch elektrischen Strom auf Temperaturen um 3000 K aufgeheizt. Obwohl hierbei fast die gesamte elektrische Leistung in Strahlung umgewandelt wird – Verluste durch thermische Konvektion oder Wärmeleitung sind gering – kann das menschliche Auge lediglich einen geringen spektralen Anteil, der ungefähr 5 % der Gesamtstrahlungsleistung ausmacht, wahrnehmen. Der Großteil der Strahlungsleistung liegt im infraroten Spektralbereich und kann nicht für Beleuchtungszwecke genutzt werden. In Bild 1 ist die spektrale Verteilung einer Glühlampe bei einer Temperatur von 2856 K im Spektralbereich

von 300 nm bis 1200 nm dargestellt. Das sichtbare Licht im Spektralbereich zwischen 360 nm und 830 nm ist mit den entsprechenden Spektralfarben hinterlegt. Oberhalb 830 nm beginnt der für das menschliche Auge unsichtbare infrarote Anteil der Strahlung.

Der für photometrische Messungen normativ festgelegte spektrale Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$, also die Hellempfindlichkeit des Auges eines „Normalbeobachters“, ist mit seinem Maximum bei 555 nm schwarz eingezeichnet.

Da die Glühlampe eine *thermische Strahlungsquelle* ist, verschiebt sich mit zunehmender Temperatur die Lage des Strahlungsmaximums entsprechend des *Wienschen Verschiebungsgesetzes* zu kürzeren Wellenlängen. Um die Lichtausbeute von Glühlampen zu erhöhen, müsste man das Strahlungsmaximum durch Temperaturerhöhung in den kurzwelligeren Bereich des sichtbaren Lichts verschieben. Die Maximaltemperatur ist jedoch bei Glühfäden aus Wolfram auf etwa 3000 K begrenzt – bei höheren Temperaturen nimmt die Lebensdauer drastisch ab.

Das Funktionsprinzip einer LED-Lichtquelle basiert auf dem Phänomen der Elektrolumineszenz. Der prinzipielle Aufbau einer LED ähnelt einer pn-Halbleiterdiode. Durch Anlegen einer Gleichspannung rekombinieren Ladungsträger in der p-n-Grenzschicht der Leuchtdiode unter Emission von Strahlung. Durch gezielte Auswahl der verwendeten Halbleitermaterialien und ihrer Dotierung wird deren Bandlücke und somit die Farbe des emittierten Lichtes bestimmt. Im Jahr 1992 gelang der Durchbruch in der Entwicklung hocheffizienter blauer LEDs, die den Einsatz von LEDs zur Allgemeinbeleuchtung erst ermöglichen. Die zugrunde liegenden Forschungsarbeiten wurden 2014 mit dem Nobelpreis für Physik gewürdigt [1].

Eine schmalbandige Lichtemission ist charakteristisch für LEDs. Dementsprechend verfügt ihr Licht über eine hohe Farbsättigung. Durch die Bedeckung des LED-Chips mit breitbandig photolumineszierenden Farbstoffen wird ein Teil der Strahlung in energieärmeres, langwelligeres Licht konvertiert und es entstehen Mischfarben wie

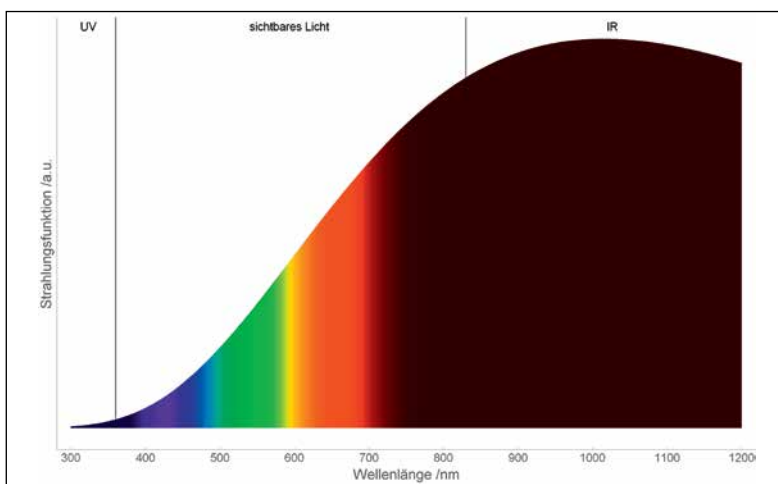


Bild 1:
Spektrale Verteilung einer Glühlampe und spektraler Hellempfindlichkeitsgrad ($V(\lambda)$ -Funktion)



Infokasten LED

Im Folgenden soll ein kleiner Leitfaden gegeben werden, der in allgemeinverständlicher Form die grundlegenden Ideen wichtiger lichttechnischer Größen erläutern soll. Komplexe Details der zugrunde liegenden Normen und Definitionen werden hierbei nicht berücksichtigt!

Lichtausbeute einer Strahlungsquelle η_v

Die Lichtausbeute einer Strahlungsquelle gibt das Verhältnis aus ausgestrahltem Lichtstrom und aufgenommener elektrischer Leistung an. Die Einheit ist *Lumen/Watt* (lm/W). Je höher die Lichtausbeute ist, umso energieeffizienter ist die Beleuchtung. Glühlampen besitzen Lichtausbeuten zwischen 10 und 20 lm/W.

Lichtstrom Φ_v

Der Lichtstrom berücksichtigt den Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ des Auges und gibt die in alle Raumrichtungen abgegebene „Lichtleistung“ einer Lampe an. Der Lichtstrom enthält keine Information darüber, wie die Lampe das Licht im Raum verteilt. Der Lichtstrom gibt an, wie hell ein beleuchteter Raum dem Menschen erscheint.

Spektraler Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$

Der exakt definierte spektrale Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ ist eine Bewertungsfunktion für elektromagnetische Strahlung. Hiermit wird der „Helligkeitseindruck eines menschlichen Durchschnittsauges“ berechnet. Dies ermöglicht den objektiven Vergleich von Lichtquellen mit physikalischen Messmethoden. Subjektive Wahrnehmungen einzelner Menschen können damit nicht exakt wiedergegeben werden.

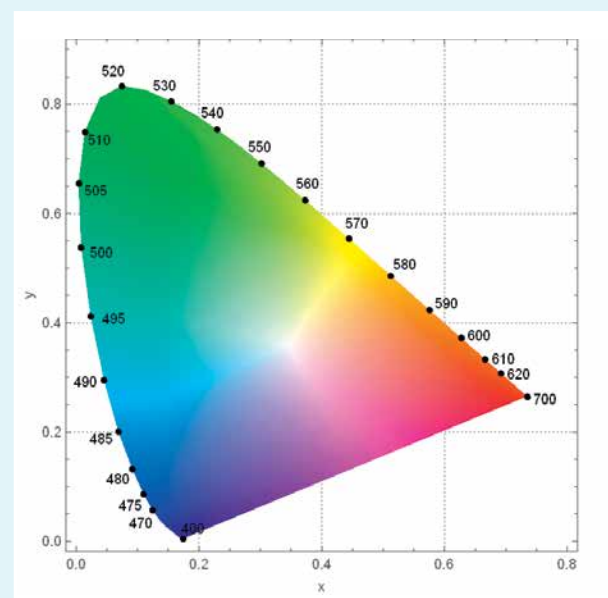
Ähnlichste Farbtemperatur T_N

Es gibt unterschiedliche Farbtemperaturen in der Photometrie. Verhältnis- und Verteilungstemperatur sind nur bei thermischen Strahlern wie der Glühlampe anwendbar. Nur die ähnlichste Farbtemperatur (englisch *Correlated Colour Temperature*, CCT) lässt sich für Lichtquellen mit beliebiger spektraler Zusammensetzung berechnen, sofern die Normfarbwertanteile ähnlich einem thermischen Strahler sind. Die ähnlichste Farbtemperatur wird in der Einheit *Kelvin* (K) angegeben. Sie gibt an, ob das Licht warmweiß (ca. 3000 K), neutralweiß (ca. 4500 K) oder tageslichtweiß (>5500 K) erscheint.

Normfarbwertanteile (x, y)

Für die Angabe von Farbe gibt es neben dem spektralen Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ noch weitere definierte Bewertungsfunktionen. Hiermit lässt sich die Farbwahrnehmung eines fiktive Normalbeobachters aus der gemessenen spektralen Verteilung des Lichts durch Angabe von nur zwei Werten (x und y) angeben. Diese Werte geben die Koordinaten auf der Normfarbtafel (s. Abbildung) an.

Normfarbtafel



Farbwiedergabeindex R_a

Der Farbwiedergabeindex ist eine Kennzahl für Lichtquellen, der bewertet die Qualität der Farbwiedergabe. Je höher der Wert, desto besser ist die Farbwiedergabe. Der Maximalwert liegt bei 100. Werte zwischen 90 und 100 geben eine ausgezeichnete Farbwiedergabe an. Werte unter 80 sind für viele Anwendungen nicht ausreichend.

Pastellfarbtöne oder auch weißes Licht.

In Bild 2 sind die spektralen Verteilungen einer LED mit und ohne Leuchtstoff abgebildet. In der linken Abbildung erkennt man die schmalbandige blaue Emission des LED-Chips. In der rechten Abbildung wird ein Teil dieser Strahlung durch einen Leuchtstoff in längerwelliges Licht konvertiert und die Mischfarbe erscheint weiß.

Der Vorteil einer LED gegenüber einer Glühlampe bezüglich der Lichtausbeute ist offensichtlich: Es wird – von unvermeidbarer thermischer Verlustleistung abgesehen – nur Strahlung im sichtbaren Wellenlängenbereich emittiert. Darüber hinaus ist die Farbe des Lichts von LEDs durch Kombination verschiedener Leuchtstoffe und LEDs nahezu beliebig einstellbar und man ist nicht auf ähnlichste Farbtemperaturen von ca. 3000 K, wie bei der Glühlampe, begrenzt.

Allerdings gibt es auch Nachteile gegenüber dem Licht einer Glühlampe: Dem typischen Spektrum einer LED-Lichtquelle fehlen im Gegensatz zu Sonnenlicht oder Glühlampenlicht einzelne Spektralfarben. Dies macht sich negativ bei der Qualität der Farbwiedergabe bemerkbar.

Die Farbe des emittierten Lichts einer LED lässt sich durch additive Farbmischung sehr ähnlich zu Sonnenlicht oder auch Glühlampenlicht einstellen. Wenn jedoch Objekte mit Licht beleuchtet werden, kommt es auch auf die spektrale Zusammensetzung des Lichts an. Nehmen wir einen Blumenstrauß aus roten Rosen, der im Tageslicht steht. Im Sonnenlicht sind alle Spektralfarben vorhanden und diese beleuchten die Rosen. Die roten Blütenblätter absorbieren einige spektrale Anteile des Lichts und reflektieren im Wesentlichen rotes Licht, welches in das Auge des Betrachters fällt. Wenn die Rosen von einer anderen Lichtquelle beleuchtet werden, in der die roten Spektralanteile zumindest teilweise fehlen, können diese nicht reflektiert werden und die Farben der Rosen erscheinen unnatürlich.

Dies ist von weitreichender Bedeutung für die Wahl einer geeigneten Lichtquelle, da wir einen Kompromiss aus Licht mit guter Farbwiedergabe und hoher Lichtausbeute schließen müssen. Licht mit hoher Farbwiedergabe setzt sich aus möglichst vielen Spektralfarben zusammen und Lichtquellen mit hoher Lichtausbeute sollten nur Spektralfarben beinhalten, für die das menschliche Auge besonders empfindlich ist. In den Außenbezirken vieler Städte werden zur Nachtbeleuchtung der Gehwege häufig Natriumdampflampen mit orangefarbenem Licht eingesetzt. Die Lichtausbeute dieser Lampen ist mit etwa 150 lm/W außerordentlich hoch, da das menschliche Auge in diesem Spektralbereich sehr empfindlich ist. Diese Beleuchtung ist jedoch ungeeignet, um Farben natürlich wiederzugeben. Aufgrund des Aufbaus des menschlichen Auges ist es also nicht möglich, eine Beleuchtung mit sehr hoher Qualität der Farbwiedergabe bei gleichzeitig sehr hoher Lichtausbeute zu realisieren.

Weißer LEDs zur Allgemeinbeleuchtung nutzen in der Regel Leuchtstoffe, die teilweise qualitativ hochwertige Farbwiedergabeeigenschaften besitzen. Eine weitere Methode zur Erzeugung von weißem Licht ist das Mischen von rotem, grünem und blauem Licht (RGB-Verfahren), welches die Grundlage jedes Displays ist. Hierbei sind neben weißem Licht auch andere Lichtfarben möglich – die Farbwiedergabeeigenschaften sind allerdings schlecht. Für die Endverbraucher sind in der Regel die Farbwiedergabeeigenschaften von Lichtquellen als R_a -Werte auf der Verpackung angegeben.

Organische Licht Emittierende Dioden (OLED) sind eine junge Beleuchtungstechnologie, die noch keinen Zugang zum Massenmarkt erhalten hat. Die weltweit erste kommerzielle OLED-Leuchte wurde 2008 vertrieben. Der für den Nutzer wesentliche Unterschied zwischen OLEDs und LEDs besteht im Aufbau. Der leuchtende Kristall

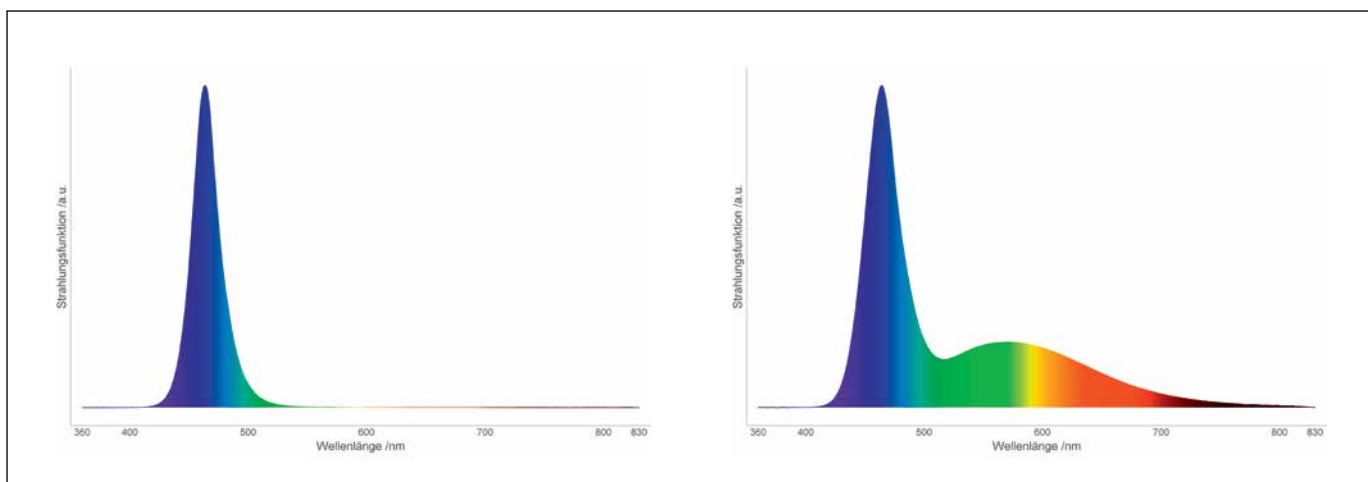


Bild 2: Spektrale Verteilung einer blauen LED (links) und einer weißen LED (rechts), bei der ein Teil des blauen Lichts zu gelbem Licht konvertiert wurde

anorganischer LEDs besitzt eine maximale Kantenlänge von etwa einem Millimeter. Bei OLEDs wird das Licht in großflächigen, amorphen organischen Schichten erzeugt. Momentan sind OLEDs mit leuchtenden Flächen von bis zu $20 \times 20 \text{ cm}^2$ erhältlich. Das Licht wird ähnlich wie bei LEDs durch Ladungsträgerrekombination unter Auftreten von Elektrolumineszenz erzeugt. Dabei ist das Emissionsspektrum der verwendeten organischen Emittiermaterialien wesentlich breitbandiger als das einer LED (vgl. Bild 3). Daher wird das weiße Licht von OLEDs in der Regel durch Verwendung von roten, grünen und blauen Emittiermaterialien erzeugt, ohne dass die Farbwiedergabeeigenschaften sehr stark darunter leiden.

2. Entwicklung von (O)LED-Transfernormalen in der PTB

Eine der Kernaufgaben der PTB ist die Weitergabe der gesetzlichen Einheiten. Bis zum heutigen Tage bieten Transferrnormale in Form von speziellen Glühlampen die besten Eigenschaften, um als Maßverkörperung der Einheiten Candela oder Lumen zu dienen. Da der Anwender in der Regel jedoch die Substitutionsmethode bei seinen Messungen anwendet, um notwendige Korrekturen auf ein Minimum zu reduzieren (Gleiches mit Gleichem vergleichen), sind auch Transferrnormale auf Basis der LED-Technologie von Interesse.

Bereits in den 80er-Jahren des vergangenen Jahrhunderts wurden LEDs in der PTB kalibriert. Diese waren für Beleuchtungszwecke noch ungeeignet und dienten lediglich als Signallampen. Zeitgleich wurden die ersten PTB-LED-Transferrnormale entwickelt, deren optische Eigenschaften durch thermische Regelung des LED-Chips stabilisiert wurden. Die mechanische Ausrichtung der LEDs leistet aufgrund des typischerweise stark gerichteten Abstrahlprofils der LEDs einen großen Beitrag auf die Messunsicherheit. Daher werden die LEDs seit

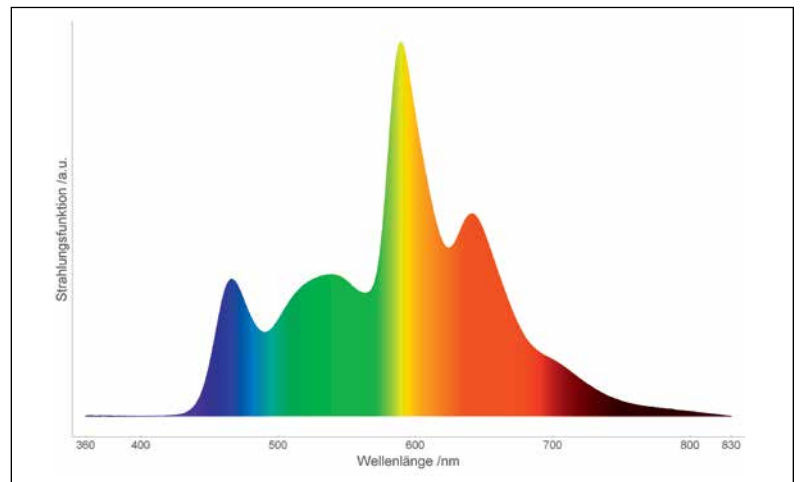


Bild 3:
Exemplarische spektrale Verteilung einer weißen OLED

2002 in ein rotationssymmetrisches, robustes VA-Stahl-Gehäuse eingebaut, welches sich sehr reproduzierbar ausrichten lässt (vgl. Bild 4).

Diese Transferrnormale werden unter Konstant-Strom-Bedingungen und – durch gezieltes Aufheizen des LED-Chips durch den Heizwiderstand – unter Konstant-Spannung-Bedingungen betrieben. Aufgrund der halbleitenden Eigenschaften sinkt mit steigender Temperatur die Betriebsspannung und sowohl der Lichtstrom als auch die Peakwellenlänge des emittierten Lichts verändert sich. Die Sollspannung wird auf einen Wert festgelegt, der unterhalb der Gleichgewichtsspannung durch Eigenerwärmung im Betrieb ohne Heizwiderstand bei einer Umgebungstemperatur von etwa 35 °C liegt. Somit ist auch ein Einsatz der Transferrnormale in Laboren ohne Klimatisierung möglich.

Für LEDs mit höheren Leistungen wurde im Jahr 2011 ein weiterer Prototyp eines Transferrnormals vorgestellt (vgl. Bild 5). Da die hier verwendeten LEDs eine höhere Leistungsaufnahme besitzen, werden sie wärmer. Das reduziert die Lebensdauer und Reproduzierbarkeit der photometrischen

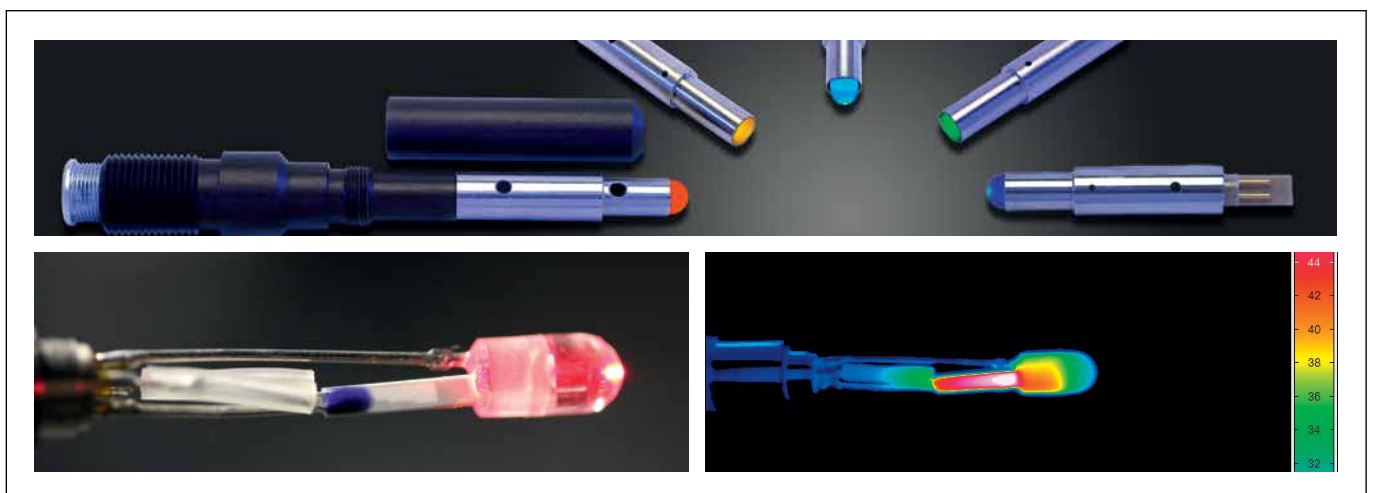


Bild 4:
Temperaturgeregeltes LED-Transferrnormal auf Basis von Kleinleistungs-LEDs mit Lichtströmen von bis zu 10 Lumen.

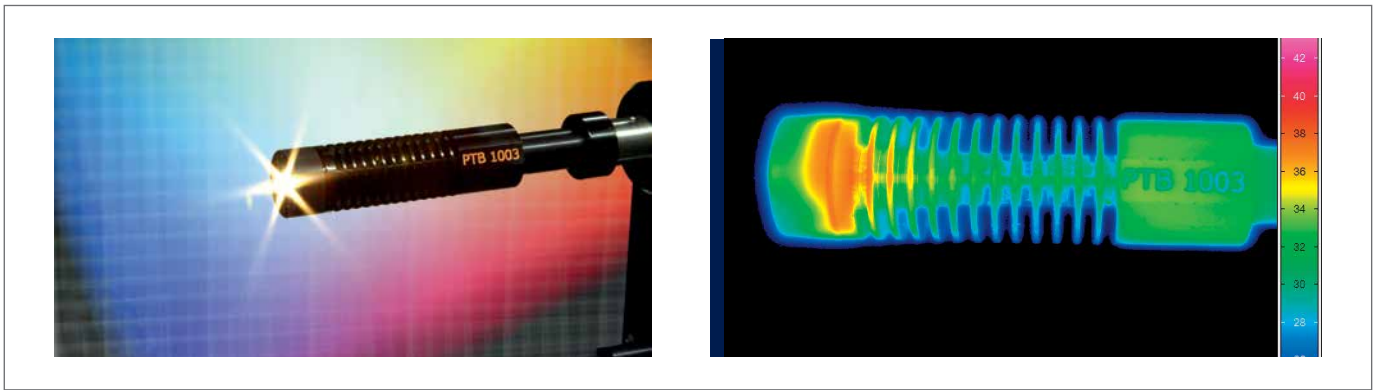


Bild 5: Temperaturgeregeltes LED-Transfernormal auf Basis von Hochleistungs-LEDs mit Lichtströmen von bis zu 100 Lumen. Im rechten Bild ist die Temperaturverteilung in Grad Celsius während des Betriebs abgebildet.



Bild 6: Temperaturgeregeltes LED-Transfernormal auf Basis von Höchstleistungs-LEDs mit Lichtströmen von bis zu 2500 Lumen



Bild 7: Temperaturgeregeltes OLED-Transfernormal auf Basis kommerziell erhältlicher OLEDs

Größen deutlich. Daher müssen sie gekühlt werden. Hierfür kommt bei diesen Normalen ein Peltier-Element zum Einsatz, welches geregelt Wärme in einen dahinterliegenden Kühlkörper leitet und hierdurch das emittierte Licht stabilisiert. Diese Transfernormale zeichnen sich durch ein geringes

Gewicht bei einer Länge von ca. 100 mm und einem Durchmesser von etwa 20 mm aus. Allerdings ist die Verwendung von LEDs mit sehr hohen Leistungen nicht möglich, da die Abwärme lediglich passiv an den Raum abgegeben wird. Eine detaillierte Beschreibung der Eigenschaften dieses Transfernormals wurde 2012 veröffentlicht [2]

Für die thermische Stabilisierung von LEDs mit sehr hohen Leistungen wurde ein weiteres Transfernormal unter Einsatz von Peltier-Elementen, Heatpipes und aktivem Kühlsystem in der PTB entwickelt (vgl. Bild 6).

Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts OLED100.eu wurde in der PTB weiterhin das weltweit erste Transfernormal unter Einsatz einer organischen Leuchtdiode entwickelt (vgl. Bild 7). Dieses Normal wurde für den Einsatz in einer Ulbricht-Kugel konzipiert und in ein mattes Aluminiumgehäuse eingebaut. Eine Besonderheit dieses Normals ist die Stand-Alone-Versorgungseinheit, die ohne Rechner o. ä. sämtliche relevanten elektrischen und thermischen Größen regelt und auf einem USB-Stick speichert.

3. LED-Messtechnik in der PTB

Neben LED-Transfernormalen mit guter Reproduzierbarkeit ist eine hochentwickelte Messtechnik für deren Kalibrierung mit minimaler Messunsicherheit erforderlich.

Die photometrische Beschreibung von LEDs erfolgt durch Angabe ihrer Lichtstärke I_{LED} mit der Einheit Candela und ihrem Lichtstrom Φ_{LED} mit der Einheit Lumen. Diese Größen werden in der PTB unter Verwendung rückgeführter Photometer bestimmt. Hierfür wird die Beleuchtungsstärke E_{LED} unter definierten geometrischen Bedingungen für alle Abstrahlrichtungen der LED mit einem Goniophotometer gemessen.

Für die Bestimmung der colorimetrischen Werte kommen Spektralmeter zum Einsatz. Hiermit werden spektrale Bestrahlungsstärken gemessen und daraus die abgeleiteten colorime-

trischen Kenngrößen, wie z. B. die *Normfarbwertanteile* (x, y), bei weißen LEDs die ähnlichste Farbtemperatur T_N mit der Einheit Kelvin und bei farbigen LEDs die *dominante Wellenlänge* λ_{dom} , berechnet. Grundlegende Informationen und Definitionen über die photometrischen und colorimetrischen Größen und deren Messung sind in [3], [4] und [5] zu finden.

In Bild 8 ist der Aufbau des LED-Messplatzes an der PTB zu sehen. Für die Bestimmung der Messgrößen in alle räumlichen Abstrahlwinkel wird die LED durch ein Goniophotometer bewegt.

Die LED wird in horizontaler Betriebslage zentrisch normal zur Referenzebene des Photometerkopfes ausgerichtet. Ein Translationstisch ermöglicht dabei eine Variation des Abstandes d zwischen Photometer und LED. Eine horizontale Rotationsachse (φ -Achse) und eine senkrechte Rotationsachse (ϑ -Achse), die sich an der LED-Spitze im rechten Winkel schneiden, erlauben durch Drehung der LED eine Bestimmung der Beleuchtungsstärke E_{LED} in alle Raumrichtungen. Beide Rotationsachsen werden während der Messung zeitgleich bewegt. Hierdurch bewegt sich die relative Position der lichtempfindlichen Empfängeröffnung bezüglich des Schnittpunkts beider Drehachsen auf der Oberfläche einer virtuellen Kugel entlang einer Spiralbahn von „Pol zu Pol“ dieser Kugel.

Die Bestimmung des Lichtstroms Φ_{LED} erfolgt analog der Beschreibung in dem Kapitel *Kurze Geschichte der Goniophotometrie in der PTB*. Der wesentliche Unterschied zu goniophotometrischen Messungen an Glühlampen besteht darin, dass bei LED-Messungen die Lichtquelle typischerweise bewegt werden kann, ohne dass sich ihre optischen Eigenschaften ändern. Aufgrund des stetig wachsenden Bedarfs an rückgeführten Kalibrierungen von High-Power-LEDs sind Masse und Abmessungen der Transferrnormale erheblich gestiegen. Daher wurde der Messplatz 2015 um ein weiteres Goniophotometer für schwere und große Objekte erweitert (vgl. Bild 9).

Neben den photometrischen Empfängern befinden sich auch Einkoppeloptiken für Spektラルradiometer auf dem drehbaren Empfängerkarussell. Alle Empfänger lassen sich hiermit automatisch während einer Messung zu den LEDs ausrichten. Vor jeder LED-Kalibrierung werden die Spektラルradiometer bezüglich Ihrer spektralen Empfindlichkeit und Wellenlänge kalibriert. Die entsprechenden Normallampen befinden sich neben dem Empfängerkarussell (vgl. Bild 10) und ermöglichen so ebenfalls eine automatisierte Messung.

Den spektralen Messungen an LEDs kommt neben der Notwendigkeit für die Bestimmung colorimetrischer Kennzahlen noch eine besondere Bedeutung für die photometrischen Messun-

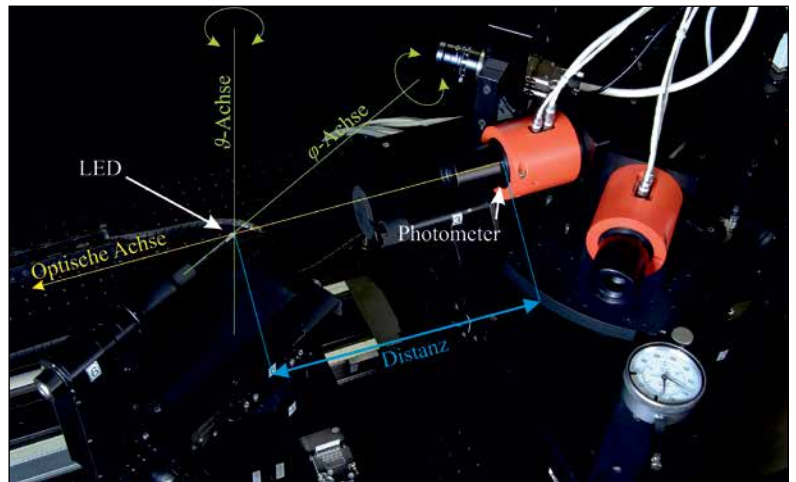


Bild 8: Goniophotometer für photometrische Messungen an Kleinleistungs-LEDs

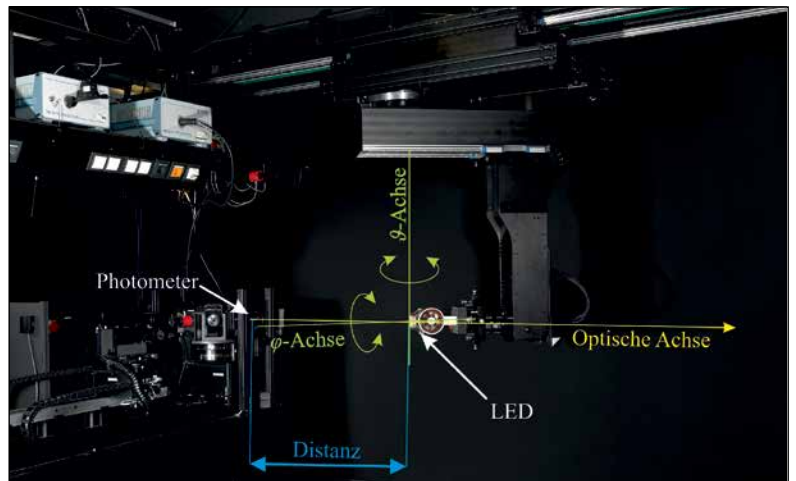


Bild 9: Goniophotometer für photometrische Messungen an Hochleistungs-LEDs

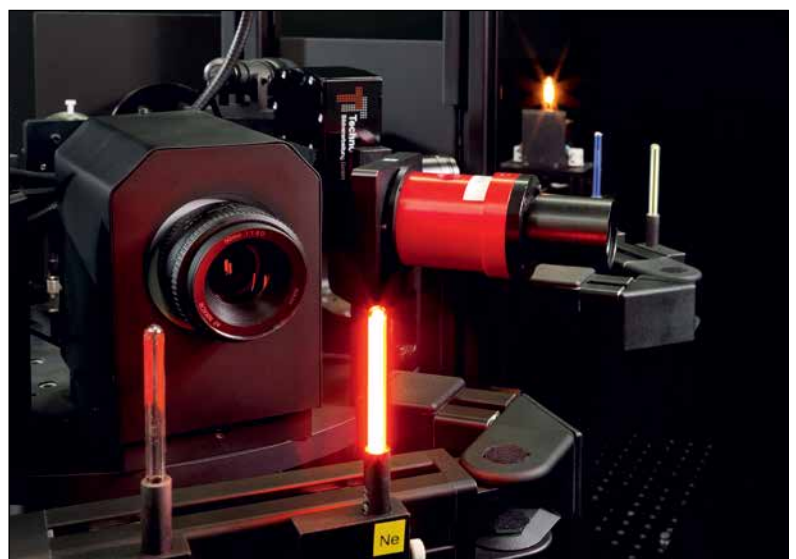


Bild 10: Entladungslampen mit verschiedenen Gasfüllungen dienen der Wellenlängenkalibrierung der Spektrometer. Im Hintergrund ist eine Bestrahlungsstärke-Normalampe für die spektrale Empfindlichkeitskalibrierung zu sehen.

gen zu: Wie in der Einleitung erklärt, unterscheiden sich die spektralen Verteilungen von LEDs und Glühlampen deutlich voneinander. Photometerköpfe bestehen in der Regel aus einer Silizium-Photodiode, deren spektrale Empfindlichkeit durch den Einsatz von Glasfiltern möglichst gut an den Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ angepasst wird. Aufgrund internationaler Standardisierung wird die photometrische Empfindlichkeit von Photometerköpfen fast ausschließlich für Normlichtart A kalibriert. In der Praxis werden hierfür Glühlampen mit einer Verteilungstemperatur von 2856 K verwendet. Wenn man ein solches Photometer für Messungen an anderen Glühlampen verwendet, sind die spektralen Verteilungen meist so ähnlich, dass nur geringe oder gar vernachlässigbare Korrekturen aufgrund der spektralen Fehlanpassung, also der Abweichung der realen spektralen Empfindlichkeit des Photometers von dem Hellempfindlichkeitsgrad, notwendig sind. Wenn man ein solches Photometer jedoch bei LEDs, insbesondere farbigen LEDs, einsetzt, können die Abweichungen aufgrund der spektralen Fehlanpassung sehr groß werden (>10 % für hochwertige Photometerköpfe sind möglich).

Mit Kenntnis der relativen spektralen Verteilung der Leuchtdiode $S_{\text{LED}}(\lambda)$ und der relativen spektralen Empfindlichkeit $s_{\text{rel}}(\lambda)$ lässt sich die spektrale Fehlanpassung durch folgenden Korrekturfaktor c_{Spek} korrigieren:

$$c_{\text{Spek}} = \frac{\int V(\lambda) S_{\text{LED}}(\lambda) d\lambda}{\int s_{\text{rel}}(\lambda) S_{\text{LED}}(\lambda) d\lambda} \bigg/ \frac{\int V(\lambda) P(\lambda, T_A) d\lambda}{\int s_{\text{rel}}(\lambda) P(\lambda, T_A) d\lambda}$$

$P(\lambda, T_A)$ beschreibt Lichtart A durch das Plancksche Strahlungsgesetz für $T_A = 2856$ K.

Eine detaillierte Auflistung und Diskussion aller zu berücksichtigenden Details bei Kalibrierungen von LEDs und das dazugehörige Messunsicherheitsbudget soll an dieser Stelle nicht gegeben werden. Interessierte Leser können hierfür Informationen in einer früheren Veröffentlichung [6] oder in den Ergebnissen eines internationalen Vergleichs von LED-Messungen [7] finden.

Fazit und Ausblick

Der Verzicht auf LEDs ist für Beleuchtungsanwendungen nicht mehr vorstellbar. Durch ihre kontinuierliche Weiterentwicklung erobern LEDs immer weitere Anwendungsfelder (z. B. Haushalts-, Straßen- und Automobilbeleuchtung), mit denen der Endkunde in Kontakt kommt. Bei diesen Anwendungen sind die Anforderungen an die Lichtquellen vielfältig und für eine quantitative Beschreibung ihrer Eigenschaften muss auch die Messtechnik entsprechend umfassend und ausgereift sein.

Neben dem allgemeinen Forschungs- und Entwicklungsbedarf für bessere LED-Messverfahren und -geräte, die die Grundlage ihrer technologischen Weiterentwicklung bilden, gibt es eine weitere Herausforderung. Aufgrund der nahezu unbegrenzten Möglichkeiten, eine bestimmte Lichtfarbe durch additive Farbmischung zu erhalten, sind LEDs verschiedener Hersteller mit unterschiedlichen Emissionsspektren aber einer nominell gleichen ähnlichsten Farbtemperatur erhältlich. Dennoch ist teilweise ein Unterschied der Lichtfarbe mit bloßem Auge erkennbar, wenn sich unterschiedliche LEDs nebeneinander befinden.

Es ist ungewöhnlich, dass man ohne technische Hilfsmittel nominell gleiche Lichtfarben faktisch unterscheiden kann. Um die Charakterisierung von LEDs soweit zu verbessern, dass dies nicht mehr möglich ist, ist einerseits eine Reduzierung der Messunsicherheit bei der Bestimmung der Normfarbwertanteile (Lichtfarbe) notwendig. Andererseits muss man sich bewusst machen, dass photometrische und colorimetrische Messverfahren auf rein physikalischen Zusammenhängen basieren. Individuelle menschliche Wahrnehmung und Sehen werden bei photometrischen Messungen nicht berücksichtigt – diese werden durch Festlegung von exakt definierten Wichtungsfunktionen, wie dem Hellempfindlichkeitsgrad für einen fiktiven Normalbeobachter, ausgegrenzt. Diese Wichtungsfunktionen können gegebenenfalls auch noch optimiert werden, um die objektive Beurteilung von Lichtquellen mit physikalischen Messmethoden zu verbessern. Somit gibt es auch in Zukunft noch interdisziplinäre Herausforderungen für die Metrologie moderner Lichtquellen.

Literatur

- [1] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/ (letzter Aufruf: 14.10.2015)
- [2] T. Gerloff, M. Lindemann, S. Shirokov, M. Taddeo, S. Pendsa, A. Sperling; Development of a new high-power LED transfer standard; CIE Proceedings 2012
- [3] CIE S 017/E; 2011; ILV; International Lighting Vocabulary; <http://eilv.cie.co.at/> (letzter Aufruf: 03.12.2015)
- [4] CIE 127; 2007 (2nd edition); Measurement of LEDs
- [5] CIE S 025/E; 2015; Test Method for LED Lamps; LED Luminaires and LED Modules
- [6] M. Lindemann, R. Maass; Photometry and Colorimetry of Reference LEDs by Using a Compact Goniophotometer; MAPAN – Journal of Metrology Society of India; Vol. 24; No. 3; 2009
- [7] www.bipm.org; APMP.PR-S3a (Averaged LED Intensity); APMP.PR-S3b (Total Luminous Flux of LEDs); APMP.PR-S3c (Emitted Colour of LEDs)