Auf der Suche nach dem neuen Lichtmass aller Dinge

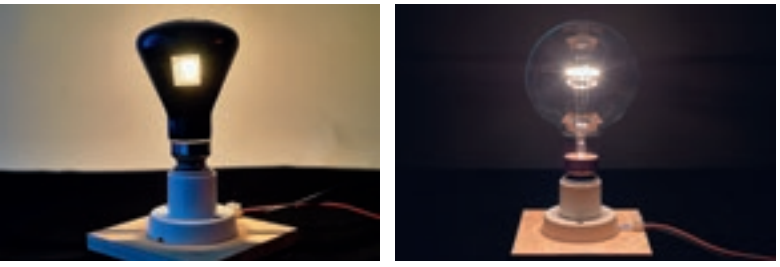
Weltweit werden in den Lichtmesslabors spezielle Glühlampen als Referenznormale eingesetzt. Die technologischen Veränderungen im Bereich Licht gehen an den nationalen Metrologieinstituten nicht spurlos vorbei und es muss auf längere Sicht nach neuen Alternativen gesucht werden. Genau das ist das Ziel des EMPIR-Forschungsprojekts «PhotoLED», an dem das Labor Optik des METAS massgebend mitgewirkt hat.

Florian Stuker und Peter Blattner

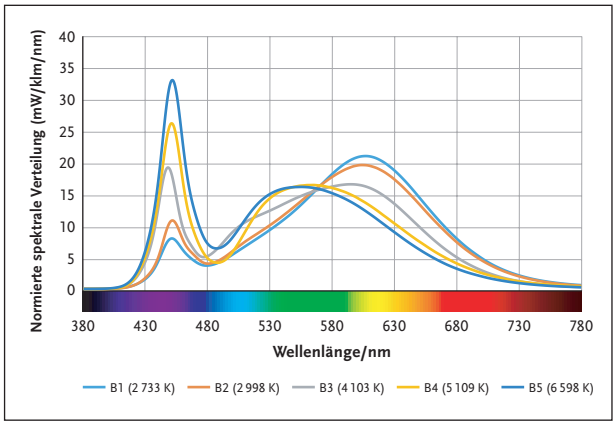
Im Bereich der Lichtmesstechnik spielen Glühlampen nach wie vor eine wichtige Rolle, da sie als Referenznormale eingesetzt werden. So werden Photometer (Luxmeter und Leuchtedichtemesser) mittels Glühlampenlicht mit gegebener ähnlichster Farbtemperatur kalibriert. Glühlampen bestehen im Wesentlichen aus einem Wolframdraht, der durch den elektrischen Strom erhitzt wird und bei genügend hoher Temperatur sichtbares Licht abstrahlt. Das einfache physikalische Prinzip hat viele metrologische Vorteile: Da es sich im Grunde um einen Wärmestrahler oder Schwarzkörperstrahler handelt, ist das abgestrahlte Spektrum breitbandig und kontinuierlich. Glühlampen sind nicht sehr empfindlich auf die Umgebungstemperatur und erreichen bereits nach kurzer Zeit einen stabilen Zustand. Für den Betrieb der Lampen braucht es keine zusätzliche Elektronik, es genügt, diese mit einem konstanten Gleichstrom zu betreiben. Glühlampen zeigen praktisch keine Alterung in der Zeit, in der sie nicht verwendet werden. Wenn sie eingesetzt werden, folgt die Lichtstromänderung aufgrund des langsam abdampfenden Wolframs klaren Gesetzmässigkeiten. Der Alterungsprozess kann minimiert werden, wenn die Normallampen möglichst nur für kurze Zeit im Einsatz sind. So besitzt das Optiklabor am METAS einen Satz von Lampen, die über 30 Jahre alt sind und mit einer durchschnittlichen Brenndauer von 20 Minuten pro Jahr sich um weniger als 0.05 % verändert haben. Grösster Nachteil von Normalglühlampen ist ihre Empfindlichkeit auf mechanische Stösse und Vibrationen. Normallampen werden daher meist von Hand transportiert und reisen bei internationalen Messvergleichen im Handgepäck. Die technologischen Entwicklungen im Bereich der Beleuchtung gehen aber nicht spurlos an der Photometrie vorbei: Aufgrund gesetzlicher Vorgaben an die Energieeffizienz oder die Lichtausbeute, d.h. die generierte Lichtmenge im Verhältnis zur benötigten elektrischen Leistung, dürfen die wenig effizienten Glühlampen nicht mehr auf den Markt gebracht werden. Sie wurden praktisch vollständig durch LED-Lampen und Leuchten ersetzt. Die Lichtausbeute von modernen LED-Lampen ist ungefähr um einen Faktor 10 höher als bei entsprechenden Glühlampen. Noch ist die Entwicklung nicht abgeschlossen und es wird erwartet, dass sich die Effizienz in naher Zukunft nochmals um rund 30 % erhöhen wird, bevor sich diese aufgrund physikalischer Grenzen nicht mehr weiter steigern lässt.

Es werde LED-Licht

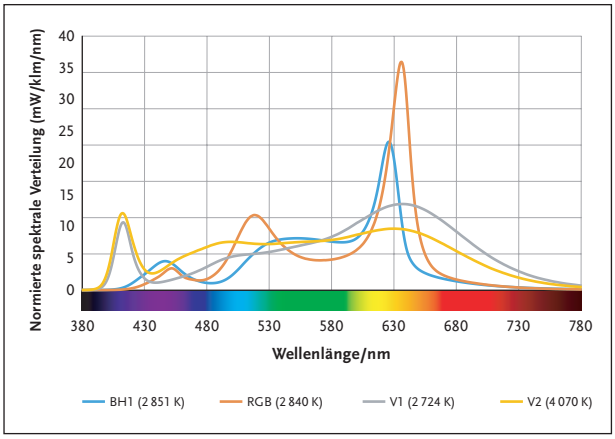
Durch das Glühlampenverbot verschwindet eine ganze Industrie und mit ihr auch das nötige Fachwissen und die benötigten Maschinen, um Normalglühlampen herstellen zu können. Auf längere Sicht heisst dies, dass die nationalen Metrologieinstitute, aber auch Kalibrier- und Prüflabors Alternativen zu den Glühlampen finden müssen. Genau das war eines der



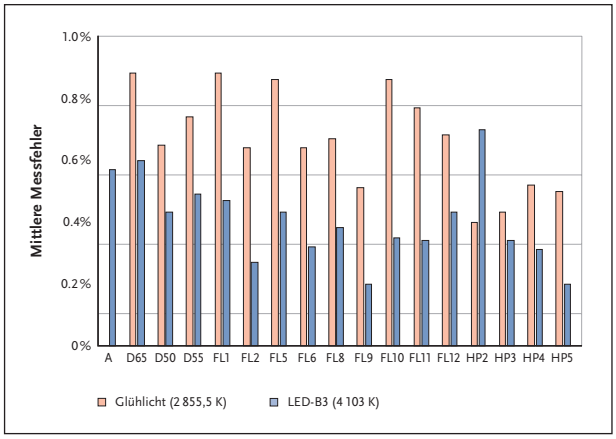
1: **Wi 41/G und Polaron:** Das METAS verfügt über mehrere Sätze von Normalglühlampen: Für die Messgrösse «Lichtstärke», d.h. die Lichtmenge. welche in eine bestimmte Richtung in einen Einheitsraumwinkel abgestrahlt wird, werden Lampen des Typs Wi 41/G eingesetzt. Bei einer Farbtemperatur von 2 855.5 K besitzen sie eine Lichtstärke von rund 270 cd. Für die Messgrösse «Lichtstrom», d.h. die Gesamtlichtmenge, welche eine Lichtquelle in alle Richtungen abstrahlt, werden Lampen des Typs Polaron LF200W eingesetzt. Bei einer Farbtemperatur von 2 855.5 K besitzen sie einen Lichtstrom von rund 2 000 lm.



2: **LED Spektren (klassisch):** Ausgewählte, typische, weisse LED-Spektren basierend auf einem Phosphor, der durch eine blaue LED angeregt wird. In Klammern sind die ähnlichsten Farbtemperaturen der LEDs angegeben.



3: **LED Spektren (speziell):** Ausgewählte, typische, weisse LED-Spektren basierend auf verschiedenen Technologien. BH1: hybride LED, basierend auf einem Phosphor, der durch eine blaue LED angeregt wird und zusätzlich eine rote LED enthält, RGB: weisses LED-Spektrum welches zusammengesetzt wird durch eine rote, grüne und blaue LED, V1 und V2: Spektren basierend auf einem Phosphor, der durch eine violette LED angeregt wird. In Klammern sind die ähnlichsten Farbtemperaturen der LEDs angegeben.



4: **Verkleinerung der Messfehler:** Typische Messfehler beim Messen von Lichtquellen mittels eines gut-angepassten Photometers. A: Glühlampenspektrum, Dxx: Tageslichtnormalspektren, FLxx: Fluoreszenzlampenspektren, HPx: Natriumhochdrucklampen. Es sind zwei Fälle aufgezeichnet: Das Photometer wurde mit Glühlicht kalibriert (rot), resp. die Kalibrierung erfolgte mit einem LED B3 Spektrum (blau). Mit Ausnahme von Normlichtart A und Natriumhochdruck HP2 verkleinert sich der Fehler beim Messen von klassischen Leuchtmitteln deutlich.

Ziele des EMPIR-Forschungsprojekts «PhotoLED» [1]. An diesem Projekt beteiligte sich das METAS zusammen mit 17 Partnern, darunter Nationale Metrologieinstitute und Messgeräte- und LED-Lampenhersteller aus ganz Europa. Das Projekt war in verschiedene Arbeitspakete aufgeteilt, die hier auszugsweise vorgestellt werden.

Im ersten Arbeitspaket ging es um die Definition eines neuen Referenzspektrums, das in Zukunft für die Kalibrierung von Photometern eingesetzt werden könnte. Dabei erhofft man sich, einen interessanten Nebeneffekt nutzen zu können: Da in der Praxis vermehrt nur noch LED-Lampen eingesetzt werden, macht es durchaus Sinn, zum Kalibrieren der Messgeräte auch ein LED-Spektrum zu verwenden. Dadurch verkleinert sich potenziell die Messunsicherheit gemäss dem metrologischen Grundprinzip: Je näher die Kalibrierbedingungen eines Messgerätes den Messbedingungen entsprechen, d.h. wie das Gerät später in der Mess- und Prüfaufgabe eingesetzt wird, desto kleiner sind die zu erwartenden Messunsicherheiten in der praktischen Anwendung. Die kritische Frage bei der Wahl eines Referenzspektrums ist, welches LED-Spektrum das «bestgeeignete» ist. In einem ersten Schritt wurde daher eine Vielzahl von gemessenen weissen LED-Spektren gesammelt und nach Farbtemperatur gemäss einem Standard gruppiert. Für jede Farbtemperaturgruppe (2 800 K, 3 000 K, 3 500 K…) und LED-Technologie (Phosphor mit blauer Anregung, Phosphor mit violetter Anregung und RGB) wurden jeweils die 5 repräsentativsten Spektren ausgewählt und gemittelt. Dank der mathematischen Mittelung entsteht ein künstliches Spektrum, dass aber keiner konkreten LED-Lampe direkt entspricht. Damit verhindert man eine Bevorzugung eines spezifischen LED-Herstellers. Das genaue Verfahren ist in der wissenschaftlichen Veröffentlichung beschrieben, die ausgewählten Spektren sind in den Abbildungen 2 und 3 dargestellt [2]. Diese können nun als Referenzspektren für farbmetrische und photometrische Untersuchungen verwendet werden [3]. Die benötigten Vorarbeiten sind durch das «PhotoLED»-Projekt somit abgeschlossen. Durch die Bildung eines neuen technischen Komitees (CIE TC2-92 «LED-Reference Spectrum for Photometer Calibration»), mit Beteiligung einiger Projektpartner, fliessen diese ersten Projekt-Resultate und dessen Erkenntnisse in die internationale Normierung ein. Das Komitee hat sich auf das Referenzspektrum LED-B3 mit einer ähnlichen Farbtemperatur von 4 103 K geeinigt. Es konnte gezeigt werden, dass dadurch die Messunsicherheit in den meisten Fällen um rund 30 % verkleinert werden kann (s. Abb. 4). Dieser Vorschlag des technischen Komitees muss aber noch durch die Mitgliedsstaaten der CIE bestätigt werden. Darin geht es aber nicht nur um die Definition eines geeigneten Spektrums, sondern auch um das Erarbeiten einer Metrik zur Quantifizierung der Abweichung eines reellen Spektrums zum gewählten Referenzspektrum. Es geht schliesslich darum abzuschätzen, wie genau das Referenzspektrum durch ein reelles LED-Spektrum nachgebildet werden muss, um hinreichend kleine Messfehler zu erhalten. Damit lässt sich auch ungefähr abschätzen, wie gross der Aufwand zur Selektion der geeigneten LED sein wird; dieser wird sich im Preis von LED-Normallampen niederschlagen.

LED-Licht realisieren

Eine weitere Aufgabe des «PhotoLED»-Projektes war die praktische Realisierung von LED-Normallampen, die dem gewählten Referenzspektrum am besten entsprechen. Dabei müssen verschiedene Rahmenbedingungen berücksichtigt werden: Da sich die Eigenschaften der LED-Lampen mit der Chiptemperatur ändern, muss diese aktiv geregelt werden. Dies erlaubt auch eine Verkürzung der Stabilisierungszeit auf wenige Minuten. Die Bauform sollte kompakt und die Abstrahlung möglichst homogen sein, mit klarer geometrischer Ausrich-

5: **Lichtstärkenormal der PTB:** LED-Lichtstärkenormallampe, die durch die PTB im Rahmen des «PhotoLED»-Projektes entwickelt und durch die Projektpartner charakterisiert wurde. Der Ring auf dem Gehäuse dient der Definition der Referenzebene. Im Gehäuse befindet sich ein Peltierelement zur aktiven Temperaturregelung der LED-Platine. Auf der Rückseite befinden sich die Anschlüsse für die Speisung und die Kommunikation.

6: **LED-Karussell:** Verschiedenfarbige und weisse LED-Arrays auf einem Drehtisch.

tungsmöglichkeit. Abbildung 5 zeigt eine Lichtstärkenormallampe, die durch die PTB realisiert und von den Projektpartnern charakterisiert wurde. Die Lampe wurde so dimensioniert, dass ihre Lichtstärke ungefähr der Lichtstärke der bestehenden Lichtstärkenormallampen (Typ Wi 41/G) entspricht. Die im Pflichtenheft vorgegebenen Anforderungen wurden teilweise deutlich übertroffen. So variiert die Lichtstärke der Lampe über eine Zeitdauer von 60 h weniger als 0.01 %.

LED-Karussell im Lichtmesslabor für die Kalibrierung

Das METAS bietet bereits jetzt Kalibrierungen von Luxmetern in Bezug auf verschiedene Lampenspektren an. Um diese Kalibrierungen effizient durchführen zu können, wurde vor kurzem ein vollautomatisierter Messplatz aufgebaut. Auf einem Drehtisch sind verschiedene Hochleistungs-LED montiert (LED-Karussell, Abb. 6). Es stehen eine Vielzahl von farbigen und weissen LEDs zur Verfügung. Auf einem zweiten Drehtisch befinden sich die Referenzphotometer und die Prüflinge. Für jede LED wird nun ein Vergleich zwischen den Referenzphotometern und den Prüflingen durchgeführt. Im Gegensatz zu den LED-Lichtstärkenormallampen, die im «PhotoLED»-Projekt entwickelt wurden, spielt beim LED-Karussell die Langzeitstabilität der LEDs eine untergeordnete Rolle. Es genügt daher, dass sie auf Kühlkörper montiert sind, die auf der Rückseite über einen kleinen Ventilator verfügen und dadurch passiv thermisch stabilisiert werden. Sobald sich die CIE auf ein Referenzspektrum offiziell geeinigt hat, wird auch das METAS entsprechende Kalibrierungen anbieten. Es wird sich zeigen, wie lange es dauern wird, bis sich LED-Normallampen durchsetzen. Eine Unklarheit besteht bezüglich dem Langzeitverhalten der neuartigen LED-Normallampen: Bedingt durch die Komplexität, die Vielzahl von elektronischen Komponenten, aber auch durch die sensible Phosphorschicht auf den LEDs ist eine Alterung auch ohne Benutzung nicht auszuschliessen. Weiter werden die Fertigungstechnologien für LED-Chips stets weiterentwickelt und es stellt sich daher die Frage, ob eine reproduzierbare Fertigung von LED-Normallampen mit gleichbleibenden Eigenschaften längerfristig gewährleistet werden kann. Es ist daher absehbar, dass Glühlampen auch in den nächsten Jahren das Lichtmass aller Dinge sein werden, die LED-Normallampen aber als Ergänzung durchaus Sinn machen, denn sie erlauben, wie im «PhotoLED»-Projekt gezeigt wurde, eine deutliche Verbesserung der Messunsicherheit.

Referenz:

[1] www.photoled.aalto.fi

[2] Kokka et al. «Development of white LED illuminants for colorimetry and recommendation of white LED reference spectrum for photometry», Metrologia 55 (2018) 5 26–534, https://doi.org/10.1088/1681-7575/aacae7

[3] CIE Publikation 015-2018, «Colorimetry», 4. Ausgabe, CIE Wien, ISBN: 978-3-902842-13-8, http://doi.org/10.25039/TR.015.2018

Kontakt:
Dr. Florian Stuker
Labor Optik
florian.stuker@metas.ch
+41 58 387 01 20

Dr. Peter Blattner
Laborleiter Optik
peter.blattner@metas.ch
+41 58 387 03 40

À la recherche de la nouvelle référence ultime en photométrie

Les laboratoires de photométrie du monde entier utilisent des ampoules à incandescence spéciales servant d'étalons de référence. L'interdiction des ampoules à incandescence entraîne aussi la disparition de toute une industrie pouvant fabriquer des ampoules à incandescence étalons. Il est donc de bon aloi d'avoir recours à l'avenir également à un spectre de LED pour l'étalonnage. Mais à quoi ressemble le spectre de référence qui pourrait servir à l'étalonnage de photomètres?

C'est pour le savoir que, dans un premier temps, de nombreux spectres de LED blanches ont été mesurés puis regroupés selon une méthodologie normalisée dans le cadre du projet «PhotoLED». On a sélectionné les cinq spectres les plus représentatifs, dont on a calculé la moyenne, pour chaque groupe de températures de couleur et pour chaque technologie LED. Les spectres artificiels ainsi obtenus ne correspondent directement à aucune ampoule LED concrète et ne privilégient donc aucun fabricant.

Cela a permis au comité technique récemment constitué (CIE TC2-90 «LED Reference Spectrum for Photometer Calibration») de sélectionner un spectre de référence avec la température de couleur la plus proche. Les premiers résultats du projet sont déjà en route vers une standardisation internationale. Une autre tâche du projet «PhotoLED» était la réalisation pratique d'ampoules étalons LED qui correspondent au mieux au spectre de référence choisi.

METAS propose d'ores et déjà l'étalonnage de luxmètres en rapport avec le spectre d'émission de différentes ampoules. La nouvelle place de mesure entièrement automatisée propose des LED haute performance blanches ou de couleur permettant une exécution efficace des étalonnages.

Alla ricerca di una nuova misura di luminosità di tutte le cose

In tutto il mondo nei laboratori di fotometria come campioni di riferimento vengono utilizzate speciali lampade a incandescenza. A causa del divieto delle lampade a incandescenza scompare un'intera industria in grado di fabbricare lampade a incandescenza di riferimento. In futuro per la taratura sarà pertanto opportuno utilizzare anche uno spettro LED. Ma che aspetto ha lo spettro di riferimento, che potrebbe essere utilizzato per la taratura di fotometri?

In una prima fase nel progetto «PhotoLED» è stato perciò misurato un gran numero di spettri LED bianchi, che sono stati poi raggruppati in base a un metodo standardizzato. Per ogni gruppo di temperatura di colore e per ogni tecnologia LED sono stati in seguito selezionati e mediati i cinque spettri più rappresentativi. In questo modo si creano spettri artificiali, che non corrispondono direttamente a nessuna lampada LED concreta e non favoriscono quindi nessun fabbricante.

Ciò ha consentito al comitato tecnico (CIE TC2-92 «LED-Reference Spectrum for Photometer Calibration») di recente formazione di selezionare uno spettro di riferimento con la temperatura di colore più simile. I primi risultati del progetto sono già stati integrati nella normazione internazionale. Un altro compito del progetto «PhotoLED» era la realizzazione pratica di lampade LED di riferimento corrispondenti meglio allo spettro di riferimento selezionato.

Il METAS offre già ora tarature di luxmetri in relazione a diversi spettri delle lampade. La nuova stazione di misura completamente automatizzata offre LED colorati e bianchi ad alte prestazioni per eseguire tarature in modo efficiente.

In search of the new universal lighting standard

In photometric laboratories all over the world, special incandescent lamps are used as reference standards. As a result of the ban on incandescent lamps, an entire industry devoted to the production of conventional incandescent lamps is also disappearing. It would therefore make good sense to use an LED spectrum for calibration in future, too. But what would be the shape of the reference spectrum that could be used for the calibration of photometers?

As a first step therefore, in the project «PhotoLED», a large number of white LED spectra were measured and grouped according to a standardised method. The five most representative spectra were selected and averaged for each colour temperature group and LED technology. This results in artificial spectra that do not directly correspond to any specific LED lamp and thus do not tend to favour particular manufacturers.

This activity has enabled the newly formed technical committee (CIE TC2-92 «LED-Reference Spectrum for Photometer Calibration») to select a reference spectrum with the most closely matching colour temperature. The first project results are already finding their way into the international standardisation. Another task of the «PhotoLED» project was the practical realisation of LED standard lamps that most closely correspond to the selected reference spectrum.

METAS is already offering luxmeter calibration with respect to different lamp spectra. The new fully-automated measuring station provides coloured and white high-power LEDs with which to be able to carry out calibrations efficiently.