

METROLOGISCHE RÜCKFÜHRBARKEIT BEI (O)LEDS

DIE NEUE WÄHRUNG DER LICHTMESSTECHNIK

Der Übergang von Glühlampen zu (O)LEDs als dominante Lichtquellen für Beleuchtung stellt die Lichtmesstechnik vor neue Herausforderungen. (O)LEDs besitzen eine gänzlich andere und viel größere Variation in ihren spektralen Verteilungen, für deren Messung Kalibrierungen mit Normlichtart A nicht optimal sind. Für (O)LED Messungen kommt daher der metrologischen Rückführbarkeit besondere Bedeutung für die Interpretation der Messergebnisse zu.

Aufgabe der Lichtmesstechnik oder Photometrie (von altgriechisch $\Phi\omega\varsigma$ *phos* »Licht« und $\mu\epsilon\tau\rho\epsilon\acute{\iota}\nu$ *metrein* »messen«) ist die quantitative Vermessung des physiologischen Eindrucks der Wahrnehmung elektromagnetischer Strahlung im Wellenlängenbereich von 360 bis 830 nm über das menschliche Auge durch die Bestimmung photometrischer Messgrößen X_v :

$$X_v = K_{cd} \cdot \int_{360nm}^{830nm} X_e(\lambda, \dots) w_x(\lambda) d\lambda$$

$X_e(\lambda)$ ist hierbei die spektrale Dichte einer radiometrischen Basisgröße X_e (z. B. der Leistung in Watt oder der Bestrahlungsstärke in W/m^2). Die Gewichtungsfunktion $w_x(\lambda)$ beschreibt die wellenlängenabhängige Absorption durch das Auge. Die wichtigsten Gewichtungsfunktionen sind die drei sogenannten color matching functions \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} . Sie sind den Absorptionskurven der drei im Auge für die Farbwahrnehmung verantwortlichen Zelltypen für einen per Konvention festgelegten »Normalbeobachter« nachempfunden [1]. \bar{y} entspricht der $V(\lambda)$ -Kurve für die Helligkeitsempfindlichkeit des Auges bei guter Beleuchtung [2]. Die sich mit \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} aus Gleichung 1 ergebenden photometrischen Werte sind die Tristimulus-Werte X , Y , Z [3]. Die Konstante $K_{cd} = 638 \text{ lm/W}$ definiert die photometrische Einheit.

Ein vollständiges Messergebnis für die Messgrößen X_v besteht, wie bei jeder anderen Messung, aus drei Komponenten: numerischer Messwert, Einheit und Messunsicherheit. Die Einheit und der zugehörige

numerische Messwert ergeben sich aus der Kalibrierung, die jeder Ausgabe des Messsystems, wie einem Photostrom oder den ADU-Counts eines CCD-Detektors, über den Vergleich mit einer geeigneten Referenz einen Schätzwert für den Wert der Messgröße zuordnet. Die Messunsicherheit macht eine quantitative Aussage über die Verlässlichkeit des Messwertes als Schätzwert für den tatsächlichen Wert der Messgröße.

SI-EINHEITEN SCHAFFEN UNABHÄNGIGKEIT VON DER REALISIERUNG

Rückführbare Messergebnisse werden zumeist in SI-Einheiten angegeben [4]. Seine historischen Wurzeln hat es in dem Vertragswerk der Meterkonvention (Abb. 2). Seit seiner Revision im Jahr 2019 definiert das SI-System sieben Basiseinheiten auf Basis von sieben Naturkonstanten, deren Werte entweder fundamentale physikalische Zusammenhänge wie die Lichtgeschwindigkeit c widerspiegeln, oder durch Konvention festgelegt wurden.

Alle photometrischen Einheiten sind im SI-System durch das photometrische Strahlungsäquivalent $K_{cd} = 638 \text{ lm/W}$ definiert. Die zugehörige Basiseinheit im SI-System ist die Einheit für die Lichtstärke, die Candela:

$$1 \text{ cd} = 1 \frac{\text{lm}}{\text{sr}} = \frac{K_{cd} \cdot \text{W}}{683 \text{ sr}}$$

Der numerische Zahlenwert von K_{cd} ergibt sich aus der Forderung nach Konsistenz mit historischen Definitionen der Candela. Die Definition der SI-Einheiten über fundamentale Konstanten macht sie unabhängig von der Frage ihrer konkreten Realisierung. Damit sind viele verschiedene,

möglicherweise auf ganz verschiedenen Prinzipien beruhende Darstellungen einer SI-Einheit denkbar.

METROLOGISCHE RÜCKFÜHRBARKEIT IN DER PRAXIS

Die Weitergabe der SI-Einheiten erfolgt durch Kalibrierungen, beruht also auf einer Kette von Messungen. Lässt sich diese Kette in eindeutiger Weise bis zu einer primären Darstellung der SI-Einheiten zurückverfolgen, spricht man von der »(metrologischen) Rückführbarkeit« einer Messung. Von zentraler Bedeutung für die metrologische Rückführbarkeit sind die bei jeder Messung auftretenden Messunsicherheiten (vgl. Infokasten Messunsicherheit). Sie bilden die Glieder der »Kette« und stellen so eine nachvollziehbare Verbindung zu den primären Darstellungen der SI-Einheiten her. Sie beschreiben quantitativ, wie groß die Messunsicherheit für eine Messung an jedem Punkt der Kette ist. Die Messunsicherheiten bestimmen im Bild der Kette also, wie lang und flexibel die Kalibrierkette bis zu jedem Punkt ist. Ein komplexes Netzwerk von Organisationen, Verträgen und Normen sorgt für eine international einheitliche Umsetzung der metrologischen Rückführbarkeit auf das SI-Einheitensystem und schafft so erst eine praktisch nutzbare Realisierung des SI-Systems (Abb. 2). Nationale staatliche Metrologie-Institute stellen primäre Realisierungen der Einheiten zur Verfügung, die jeweils einen möglichen Anfang einer metrologischen Rückführbarkeitskette bilden. Durch Vergleichsmessungen wird sichergestellt, dass sich die verschiedenen primären Realisierungen ähnlich genug sind und dass von einem einheitlichen Einheitensystem gesprochen werden kann.

Ausgehend von den primären Realisierungen werden die Einheiten über verschiedene Kalibrierketten weiterverteilt. Damit dieser Prozess verlässlich und einheitlich abläuft und ein Anwender am Ende die Rückführbarkeit seiner Messergebnisse prüfen kann, wird der Prozess der Weitergabe durch zusätzliche internationale Normen geregelt. Die wichtigste dieser Normen ist die ISO/IEC 17025 »Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien« [6]. Dienstleister, die sich nach dieser Norm akkreditieren lassen, unterwerfen sich einer regelmäßigen unabhängigen Prüfung ihrer Kompetenz zur Durchführung akkreditierter Prüf- und Kalibrierverfahren und verpflichten sich gegenüber ihren Kunden, die Ergebnisse ihrer Prüfungen bzw. Kalibrierungen nach den Kriterien der Norm in Prüf- oder Kalibrierscheinen zu dokumentieren. Insbesondere wird durch das jeweilige Zertifikat die metrologische Rückführbarkeit auf eine der primären Realisierungen der SI-Einheiten dokumentiert und garantiert. Ein nach ISO/IEC 17025 ausgestelltes Prüf- oder Kalibrierzertifikat ist heute der am meisten, und oft einzige, akzeptierte Nachweis der metrologischen Rückführbarkeit.

KALIBRIERVERFAHREN UND ÄHNLICHKEITSPRINZIP

Für die Kalibrierung von Messgeräten und Quellen gibt es in der Lichtmesstechnik zwei grundlegende Verfahren: Bei der direkten Kalibrierung wird ein Detektor mit einer Referenzquelle kalibriert oder eine Quelle mit einem Referenzdetektor. Bei der indirekten Kalibrierung nach der Substitutionsmethode wird ein Detektor mit einem anderen Detektor über den Vergleich der Signale bei Messungen an derselben Lichtquelle, dem TransfERNormal, kalibriert. Auch für die Kalibrierung von Lichtquellen ►

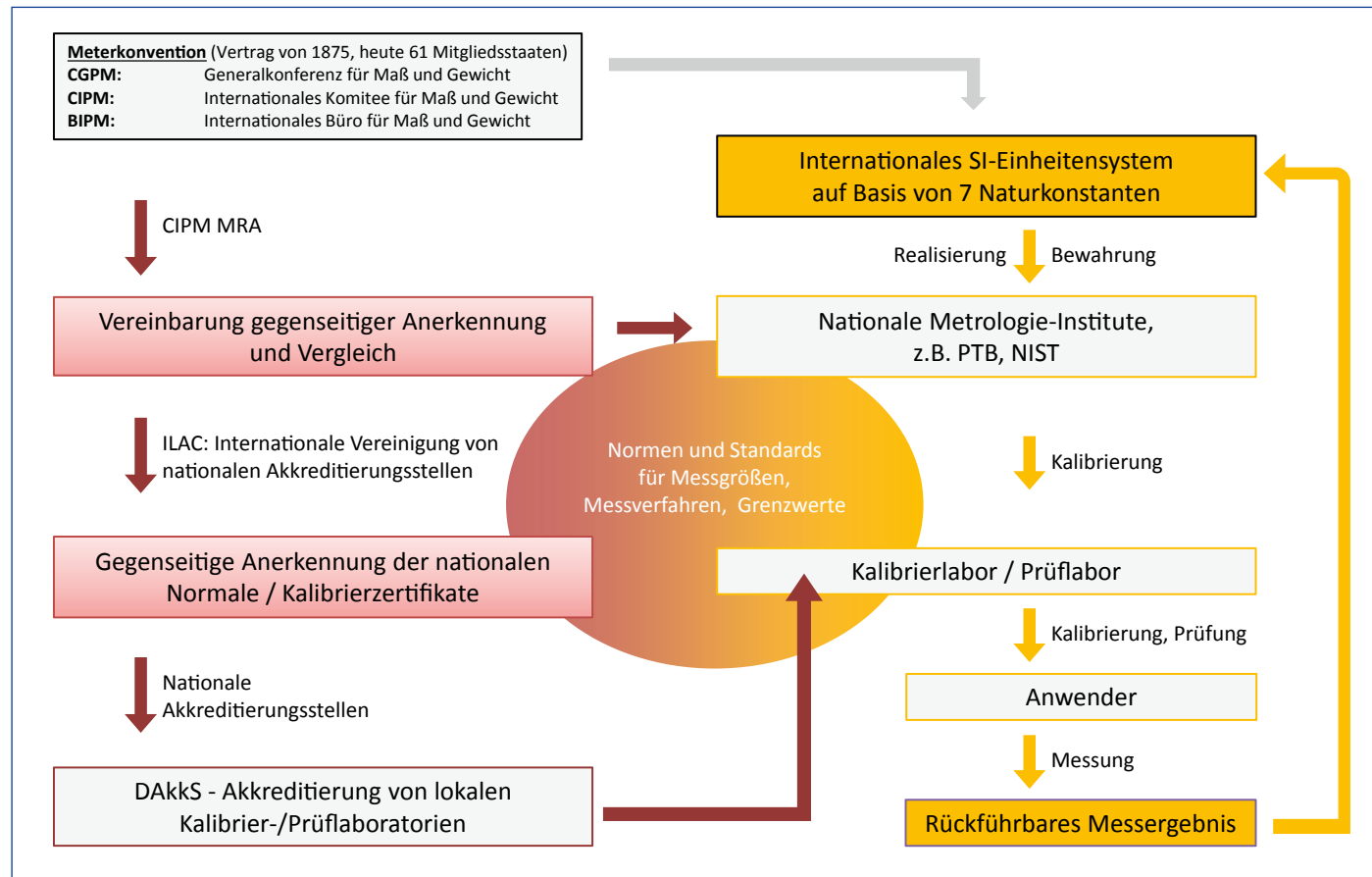


Abb. 2: Schematische Darstellung der praktischen Umsetzung der metrologischen Rückführbarkeit von Messergebnissen in der Lichtmesstechnik im Rahmen des SI-Systems.

lässt sich die Substitutionsmethode nach dem gleichen Prinzip anwenden. Das Transfornormal ist in diesem Fall ein geeigneter Detektor (vgl. Infokasten Funktionsprinzipien).

Unabhängig von der Art der Kalibrierung gilt ein »Ähnlichkeitsprinzip«. Je ähnlicher Kalibriergegenstand und Referenz bei der Substitutionsmethode und/oder Referenz und Testgegenstände in der geplanten Anwendung sind, desto kleiner werden i. a. die Messunsicherheiten in der Anwendung sein.

In der Lichtmesstechnik werden seit ihren Anfängen sowohl für die Weitergabe der Einheiten als auch für die Kalibrierung von Detektorsystemen fast ausschließlich Referenzlichtquellen, insbesondere Glühlampen, verwendet. Die spektrale Verteilung der verwendeten Referenzlampen entspricht dabei in den meisten Anwendungen näherungsweise der eines Planck'schen Strahlers der Temperatur 2.856 K, der »Normlichtart A« (standard illuminant A, [9]). Der auch normativ starke Bezug der Photometrie auf Normlichtart A war ein Vorteil in Zeiten, in denen Glühlampen die dominante Beleuchtungsquelle darstellten. Das Ähnlichkeitsprinzip wurde für die meisten Anwendungen über die ganze Kalibrierkette eingehalten. Durch den einheitlichen Bezug auf eine festgelegte spektrale Verteilung ließen sich Messgeräte anhand ihrer Messwerte einer Realisierung von Normlichtart A leicht vergleichen und durch die Angabe einiger weniger Qualitätsindizes charakterisieren und klassifizieren [10, 11].

Der Übergang von Glühlampen zu (O)LEDs als dominante Lichtquellen für Beleuchtung und Informationsdarstellung stellt die Lichtmesstechnik nun vor neue Herausforderungen. (O)LEDs haben nicht nur grundsätzlich andere spektrale Verteilungen, sondern auch eine viel größere Variation in ihren spektralen Verteilungen als Glühlampen. Die Frage, wie »gut« ein gegebenes Photometer im Allgemeinen misst, lässt sich daher grundsätzlich nicht mehr durch Messung an einer einzigen,

Messunsicherheit

Die Messunsicherheit ist ein quantitatives Maß für die Auswirkungen, die das Fehlen von Information über das Zustandekommen eines Messergebnisses auf seine Verlässlichkeit hat. Ein Messergebnis kann daher als umso verlässlicher angesehen werden, je kleiner die ihm zugeordnete Messunsicherheit ist. Das internationale Wörterbuch der Metrologie [5] definiert Messunsicherheit ganz allgemein als einen »nichtnegativen Parameter, der auf Basis der verwendeten Information die zu erwartende Verteilung der Werte charakterisiert, die einer Messgröße zugeschrieben werden«. Die Berechnung der Messunsicherheit erfolgt mit Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Die international am weitesten verbreiteten und anerkannten mathematischen Verfahren zur Bestimmung von Messunsicherheiten werden in dem vom BIPM herausgegebenen »Guide to the expression of uncertainty in measurement« [7] und seinen Erweiterungen [8] beschrieben. Messunsicherheiten bilden die Basis der metrologischen Rückführbarkeit und damit auch der praktischen Realisierung des SI-Systems.

repräsentativen Standard-Lichtquelle entscheiden und insbesondere nicht mit Normlichtart A.

UNBEKANNTE MESSUNSIHERHEITEN BEI DER LED-SPEZIFIKATION

Anwender sehen sich trotz jahrelanger Verbesserungen der Messtechnologie in ihren Anwendungen bei LEDs mit teilweise größeren oder sogar unbekanntem Messunsicherheiten ihrer vorhandenen Systeme konfrontiert. Auch die Auswahl geeigneter Messgeräte für spezielle Anwendungen anhand bestehender Klassifizierungssysteme und Qualitätsindizes liefert nicht mehr zwangsläufig das bestmögliche Ergebnis.

Hersteller von Lichtmesstechnik müssen sich bei der Spezifikation und Entwicklung ihrer Geräte zunehmend entscheiden, ob sie dies im Hinblick auf die Anwendung der Kunden oder doch eher auf die normativen und vertriebstechnischen Zwänge der bestehenden Klassifizierungssysteme und Normverfahren tun. Als Vorteil erweist sich dabei die moderne Digitaltechnik, die es ermöglicht, die von einem Messsystem gelieferten Rohdaten auf sehr komplexe Weise auch unter Einbeziehung anderer Datenquellen in Echtzeit zu verarbeiten und mit diesen Zusatzinformationen die Genauigkeit des Messergebnisses zu verbessern. Diese Möglichkeiten werden in den bestehenden Klassifizierungssystemen und den zugrundeliegenden Qualitätsindizes nur unzureichend abgebildet.

Kalibrier- und Prüflabore stehen aufgrund der veränderten Kundenanwendungen in dem Konflikt, einerseits den Kunden eine für ihre Anwendung bestmögliche Kalibrierung oder Prüfung anbieten zu wollen, gleichzeitig aber in vielen ihrer akkreditierten Verfahren an die Verwendung derzeitiger Normlichtarten gebunden zu sein. Damit stehen die verantwortlichen internationalen Normungsgremien, wie die Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), vor der Herausforderung, einen Konsens über eine Anpassung oder Erweiterung ihrer Normen und Empfehlungen zu erzielen, der den Anforderungen einer sich stetig verändernden Technologie unter Berücksichtigung der Interessen ihrer Mitglieder gerecht wird. Dieser Prozess hat begonnen und findet zunehmend Eingang in die Basisdokumente sowie das Normenwerk der Lichtmesstechnik [12-14].

KALIBRIERKONZEPT AM BEISPIEL EINER FARBMESSKAMERA

Die zuvor diskutierten Konzepte für die Kalibrierung von Messsystemen für die Lichtmesstechnik im Zeitalter der LED-Technik lassen sich sehr gut am Beispiel einer Farbmesskamera illustrieren. Die LumiCam 2400B von Instrument Systems ist eine Farbmesskamera der neuesten Generation. Durch die sequentielle Aufnahme von 2D-Bildern einer Quelle mit verschiedenen Filtern vereint sie die Funktionen eines abbildenden Photometers und eines abbildenden Colorimeters (Abb. 3).

In der Basisversion misst die Kamera in vier Filterkanälen, deren relative spektrale Transmissionen so angepasst sind, dass sich zusammen mit der relativen spektralen Transmission der Abbildungsoptik und der relativen spektralen Empfindlichkeit des CMOS-Sensors relative spektrale Empfindlichkeiten nahe an den CIE Color Matching Functions \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} ergeben. Durch die spektrale Integration des CMOS-Sensors misst die Kamera dann, bei geeigneter Kalibrierung der Gesamttransmission,

ortsaufgelöst die zugehörigen Tristimuli X , Y , Z , aus denen sich wiederum Farbkoordinaten in beliebigen Farbräumen (z. B. x , y , u' , v' oder Lab) berechnen lassen. Da die Kamera hauptsächlich in der Vermessung von Displays Anwendung findet, wird sie mit einer Kalibrierung auf Leuchtdichte in Einheiten cd/m^2 ausgeliefert. \bar{x} hat zwei Maxima, zwischen denen die relative spektrale Empfindlichkeit nahezu auf Null abfällt (siehe Abb. 3). Technisch lässt sich daher eine genauere Anpassung der Detektorempfindlichkeit erreichen, indem die Messung von X zum Preis einer zusätzlichen Messung auf zwei separate Filterkanäle aufgeteilt wird. Messungen mit dem \bar{y} -angepassten Filter messen direkt das photometrische Integral Y , so dass die Kamera mit einer Einzelmessung als abbildendes Photometer verwendet werden kann.

Damit die Farbmesskamera den gängigen Normen für Photometer und photometrische Messungen entspricht, wird sie in allen Filterkanälen mit einem Leuchtdichtestandard kalibriert, dessen relative spektrale Verteilung Normlichtart A entspricht und für den rückführbare Referenzwerte für alle drei Tristimuli X , Y , Z verfügbar sind. Die ordnungsgemäße Funktion der Kamera und die metrologische Rückführbarkeit der Messwerte werden für jede Kamera durch einen nach ISO 17025 akkreditierten Prüfschein bestätigt.

MEHRFACHKALIBRIERUNG

Dennoch liefert eine solche »Standardkalibrierung« i. a. aber keine optimalen Ergebnisse bei der Vermessung von LEDs. Durch angepasste Kalibrierverfahren können hier substantielle Verbesserungen

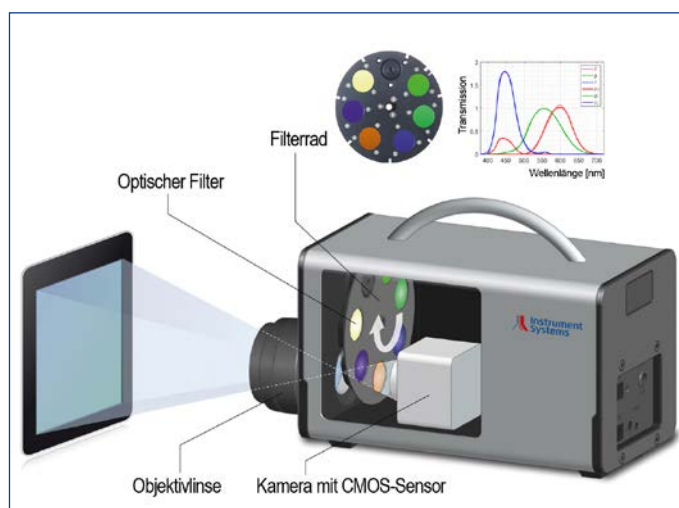


Abb. 3: Messprinzip einer filterbasierten Farbmesskamera für die Messung der CIE Tristimuli X , Y , Z .

erzielt werden. Da Kalibrierdaten heutzutage in digitaler Form auf den Messgeräten gespeichert sind, kann ein Gerät über mehrere Kalibrierungen verfügen, die vom Anwender je nach Art der Messung ausgewählt werden können. Durch diese Möglichkeit der Mehrfachkalibrierung ist eine möglicherweise problematische Entscheidung zwischen normgerechter Kalibrierung mit Bezug auf Normlichtart A und einer optimal auf die Anwendung angepassten Kalibrierung nicht mehr zwingend nötig. ►

Weitere Möglichkeiten der Optimierung bietet zudem die Kalibriermatrix des Systems, die den Zusammenhang zwischen den Messsignalen (im Beispiel die Signale der vier Filtermessungen, also $N=4$) und den Tristimuli X, Y, Z herstellt:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \cong \begin{pmatrix} m_{11} & \dots & m_{1N} \\ m_{21} & \dots & m_{2N} \\ m_{31} & \dots & m_{3N} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_1 \\ \dots \\ F_N \end{pmatrix} \equiv \mathbf{M}_c \cdot \vec{F}$$

Für die Standardkalibrierung sind nur die Komponenten m_{11}, m_{12} für die \bar{x} -Filterwerte F_{x1}, F_{x2}, m_{23} für den \bar{y} -Filterwert F_y und m_{34} für den \bar{z} -Filterwert F_z der Kalibriermatrix M_c von Null verschieden. Bei einer perfekten Filteranpassung wäre diese Kalibrierung für beliebige spektrale Verteilungen optimal und würde immer – im Rahmen der Messunsicherheit – exakt die richtigen Werte für X, Y, Z liefern. Da aber jede Filteranpassung in der Realität nur eine endliche Genauigkeit hat, wird es bei Messungen von Lichtquellen mit einer von Normlichtart A abweichenden spektralen Verteilung zu Messfehlern kommen. Für jede zu messende Quelle ließe sich mit einer Referenzquelle gleicher spektraler Verteilung ein neuer Satz Kalibrierwerte $m_{11}, m_{12}, m_{23}, m_{34}$ festlegen, der für die entsprechende spektrale Verteilung optimal ist. Praktikabel ist dies i. a. aber nicht, da zum Zeitpunkt der Kalibrierung die möglichen Anwendungsfälle nicht zwingend bekannt sind.

Wenn der spektrale Verlauf der Filterfehlpassung bekannt ist, kann allerdings durch numerische Optimierung eine Matrix M_c bestimmt werden, die für einen beliebigen vorgegebenen Satz spektraler Verteilungen und für das gewählte Maß der Optimierung (typischerweise Minimierung des mittleren Messfehlers) die geringsten Messunsicherheiten liefert. Auf diese Weise können die Messfehler bereits ab Werk, auch ohne genaue Kenntnis der Anwendung, für eine Auswahl an typischen spektralen Verteilungen, z. B. zusätzlich zu Illuminant A für weiße und monochromatische RGB-LEDs, gegenüber der Standardkalibrierung reduziert werden. Wie gut die Verbesserungen der Optimierung quantitativ ausfallen, hängt von der Filterfehlpassung, der Zahl der

Funktionsprinzipien photometrischer Messgeräte

Messgeräte für die Lichtmesstechnik können nach der Definition photometrischer Größen (Glg. 1) nach zwei grundsätzlichen Funktionsprinzipien funktionieren:

1. Das Gerät funktioniert als Spektralradiometer, das heißt es misst die spektrale Verteilung $X_\lambda(\lambda)$. Die zugehörige photometrische Größe X_v ergibt sich durch numerische Berechnung nach Glg. 1. Die Kalibrierung erfolgt auf radiometrische Einheiten. Die Konstante K_{cd} stellt den richtigen Zusammenhang zu den zugehörigen photometrischen Einheiten her.
2. Das Gerät funktioniert als Photo- oder Colorimeter. Es besitzt einen spektral integrierenden Detektor (z. B. Photodiode) und eine physikalische Realisierung einer oder mehrerer Gewichtungsfunktionen $w_\lambda(\lambda)$, i. a. durch geeignete optische Filter (z. B. $V(\lambda)$ -Filter). Die Kalibrierung erfolgt direkt auf photometrische Einheiten.

Parameter der Kalibriermatrix sowie Art und Anzahl der spektralen Verteilungen ab, auf die optimiert wird.

Erhöht man die Zahl der Filter in der Farbmesskamera von vier auf sechs, dann erhöht sich zwar typischerweise die Messzeit um etwa 50 %, dafür erlaubt es die mit den zwei zusätzlichen Filtermessungen gewonnene Information, die Fehlanpassung des Gesamtfiltersatzes effektiv zu reduzieren. Außerdem stehen für diese Kamera statt $12=4 \times 3$ nun $18=6 \times 3$ Parameter für mögliche numerische Optimierungen der Matrix M_c zur Verfügung.

Das vorgestellte Beispiel zeigt, wie sich die neuen Herausforderungen meistern lassen, indem die bewährten Grundprinzipien der Lichtmesstechnik mit den Möglichkeiten moderner Gerätetechnologie und Datenverarbeitung ergänzt werden. Auf diese Weise ist es möglich, gleichermaßen dem immer höheren Anspruch an die Messgenauigkeit gerecht zu werden als auch einem internationalen Normenwerk, das sich langsamer als die Technologie entwickelt. ■

REFERENZEN

- [1] ISO 11664-1:2019 Colorimetry - Part 1: CIE Standard Colorimetric Observers, <http://eiv.cie.co.at/term/163>
- [2] CIE 018:2019, The Basis of Physical Photometry, 3rd edition
- [3] ISO 11664-3:2019 Colorimetry - Part 3: Tristimulus values
- [4] The international system of units, 9th edition, BIPM (2019), <https://www.bipm.org/utis/common/pdf/si-brochure/SI-Brochure-9.pdf>
- [5] International vocabulary of metrology, JCGM 200:2012, (<https://www.bipm.org/en/publications/guides/>)
- [6] DIN EN ISO/IEC 17025:2017, Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien
- [7] Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100:2008 (<https://www.bipm.org/en/publications/guides/>)
- [8] Supplement 1 to the »Guide to the expression of uncertainty in measurement« — Propagation of distributions using a Monte Carlo method, JCGM 101:2008 (<https://www.bipm.org/en/publications/guides/>)
- [9] ISO 11664-1:2020 Colorimetry - Part 2: Standard Illuminants, <http://eiv.cie.co.at/term/168>
- [10] CIE S023:2013, Characterization of the Performance of Illuminance Meters and Luminance Meters
- [11] CIE231:2019, CIE Classification System of Illuminance and Luminance Meters
- [12] CIE 015:2018, Colorimetry, 4th edition
- [13] CIE S025:2015, Test Method for LED Lamps, LED Luminaires and LED Modules
- [14] CIE TC2-90, LED Reference Spectrum for Photometer Calibration, <http://cie.co.at/technicalcommittees/led-reference-spectrum-photometer-calibration>

Weitere Informationen:

Fotos und Abbildungen: Instrument Systems

Autor: Dr. Tobias Schneider, Instrument Systems, www.instrumentsystems.com/de