

Charakterisierung von skotopischen Leuchtdichtemessgeräten

M. Schuster¹⁾, D. Lindner¹⁾, M. Eltmann¹⁾, H.-G. Ulrich²⁾, A. Sperling¹⁾

¹⁾Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

²⁾LMT Lichtmesstechnik GmbH Berlin, Helmholtzstr. 9, 10587 Berlin

michaela.schuster@ptb.de

Abstract

Die Einführung neuer Lichtquellen auf LED Basis in der Straßenbeleuchtung stellt neue Anforderungen an die Metrologie im Bereich mesopischer Messtechnik. Diesem bisher nicht rückführbaren Messbereich ist auch ein Teil eines europäischen Forschungsprojektes gewidmet, welches durch die EU gefördert wird. Ziel ist es, ein auf das SI rückführbares Messverfahren für mesopische Leuchtdichtemessung zu erarbeiten. Grundlage ist hierfür die von der CIE veröffentlichte Empfehlung CIE 191:2010, die ein iteratives Verfahren zur Bestimmung mesopischer Leuchtdichten aus photopisch und skotopisch bewerteten Messungen vorschlägt. Zum jetzigen Zeitpunkt ist jedoch offiziell weder eine Kalibrierung eines skotopischen Photometerkopfes noch eine Kalibrierung von Leuchtdichtemessgeräten unter Angabe des vollständigen Messunsicherheitsbudgets rückführbar möglich. Im folgenden soll eine mögliche Kalibrierkette für mesopische Leuchtdichtemessgeräte und die notwendigen Charakterisierung für Photometerköpfe und Leuchtdichtemessgeräte vorgestellt werden.

1. European Metrology Research Program (EMRP) [1]

Dimmbare LED-Lichtquellen werden bereits heute vermehrt von Kommunen in der Straßenbeleuchtung mit dem Ziel eingesetzt Energie zu sparen. Unter dem Namen "Metrology for Solid State Lighting" fördert die EU derzeit ein "European Metrology Research Program" Projekt [2], um die Akzeptanz moderner LED Lichtquellen durch Aufbau von Vertrauen durch rückführbare Messverfahren für LED-Lampen und LED Beleuchtungsanlagen zu erreichen. Die PTB leitet in diesem EMRP-Projekt das Arbeitspaket "Traceability for SSL measurements".

Ein erstes Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Entwicklung eines Referenzphotometers für rückführbare optische Messungen im mesopischen Leuchtdichtebereich, also in dem Leuchtdichtebereich in dem nicht mehr der Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ für Tagsehen angewendet werden kann. Ausgangspunkt für Charakterisierungen im mesopischen Bereich ist auch hier das - in 2010 von der CIE empfohlene - iterative Berechnungsverfahren für mesopische Leuchtdichten unter Nutzung der photopischen ($V(\lambda)$) und skotopischen ($V'(\lambda)$) Bewertungsfunktionen [3]. In einem zweiten Schritt soll eine Kalibrierkette erarbeitet werden, um die Kalibrierung von Leuchtdichtemessgeräten, rückführbar auf das SI zu gewährleisten.

Die Firma LMT Lichtmesstechnik GmbH Berlin entwickelte hierzu als Projektpartner skotopisch angepasste Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichtemessgeräte (Abb. 1), da die Rückführung der Leuchtdichte in der PTB über Photometer geschieht die bezüglich Beleuchtungsstärke kalibriert sind. Das Ziel der PTB als nationales Metrologieinstitut ist es, in Zukunft rückführbare Kalibrierungen von mesopischen Leuchtdichten auch unter Verwendung mesopischer Leuchtdichtemessgeräte zu ermöglichen.



Abb. 1: Photopisch und skotopisch angepasste Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichtemessgeräte der Firma LMT Lichtmesstechnik GmbH Berlin

2. Begrifflichkeit

Da häufig falsche Formulierungen im Bezug auf Größen und Einheiten verwendet werden, wenn es um skotopische oder mesopische Messungen geht, soll hier die Begrifflichkeit hergeleitet werden.

In der Photometrie und Radiometrie werden Strahlungsgrößen allgemein durch das Symbol X_e dargestellt. Der Index „e“ verweist hier auf eine energetische Größe, d.h. auf eine „Bewertungsfunktion“, die überall den Wert Eins hat. Mit einem zweiten Index kann die Art der spektralen Verteilung gekennzeichnet werden, z.B. λ zur Kennzeichnung der Wellenlängenabhängigkeit. Photometrische Größen werden mit dem Index „v“ (für visuell) gekennzeichnet und sind über die spektrale Verteilung der Bewertungsfunktion, z.B. $V(\lambda)$ oder $V'(\lambda)$, definiert.

So ergibt sich die visuelle Strahlungsgröße aus der energetischen ganz allgemein über die Formel:

$$X_v = C_0 \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X_{e,\lambda}(\lambda) \cdot B(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

darin ist $B(\lambda)$ eine Bewertungsfunktion und C_0 der dazugehörige Bewertungsfaktor.

Durch die Candela-Definition ist für die Bewertungsfunktion $V(\lambda)$ der Faktor $K_m = 683 \text{ lm/W}$ und für $V'(\lambda)$ der Faktor $K'_m = 1700 \text{ lm/W}$ festgelegt. [4]

Bestimmt man eine Strahlungsgröße nun für die photopische und die skotopische Bewertungsfunktion gelten folgende Zusammenhänge:

$$X_v = K_m \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X_{e,\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$$X'_v = K'_m \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X_{e,\lambda}(\lambda) \cdot V'(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

Der Wert der skotopischen Größe kann auch aus dem der photopischen berechnet werden, dazu müssen die Formeln ins Verhältnis gesetzt werden.

$$X'_v = X_v \cdot \frac{K'_m}{K_m} \cdot \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X_{e,\lambda}(\lambda) \cdot V'(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X_{e,\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda} ; [X_v] \in \{cd, cd/m^2, lx, lm\} \quad (4)$$

Das heißt aber allgemein, der skotopische Wert der Strahlungsgröße ergibt sich aus dem photopischen Wert multipliziert mit einem einheitenlosen Faktor.

Aus der Formel ist zu erkennen, dass sich beim Übergang von photopischen Größen zu skotopischen Größen an der Einheit nichts ändern kann. Es gibt also keine Änderung der Einheit mit einem Einheitenzusatz, z.B. „cd“ oder „skotopische Candela“. Lediglich zum Wert kann es einen Zusatz geben, z.B. skotopischer Lichtstärkewert. Es ist auch möglich die Größe oder Einheit begrifflich zu Ergänzen. Beispielsweise wäre die Verwendung „Lichtstärke für skotopische Bewertung“ oder kurz „skotopische Lichtstärke“ zulässig.

3. Mögliche Kalibrierkette

Zu einer Kalibrierung gehört zum einen eine rückführbare Messung, d.h. eine Kette von Vergleichen mit Verbindung zu nationalen Primärnormalen. Zusätzlich muss aber auch eine Messunsicherheitsanalyse vorgenommen werden.

Hier soll die mögliche Kalibrierkette vorgestellt und Einflussgrößen für die Messunsicherheitsbetrachtung erläutert werden.

Ziel des Projektes ist die Kalibrierung von Leuchtdichtemessgeräten für mesopische Beleuchtungsstärkeniveaus. Die PTB verfolgt den Ansatz den mesopischen Wert aus einem photopischen und einem skotopischen Wert zu berechnen. Daher muss die getrennte Kalibrierung eines photopisch und eines skotopische angepassten Leuchtdichtemessgerätes realisiert werden.

Zunächst soll die mögliche Kalibrierkette für das photopisch angepasst Leuchtdichtemessgerät hergeleitet werden.

Unsere Kalibrierkette startet mit einer Lichtstärkenormallampe WI41/G. Diese ist rückführbar kalibriert, wie in [5] erläutert, und repräsentiert damit einen Lichtstärkewert $I_v(T)$ für eine bestimmte Verteilungstemperatur T für die photopische Bewertungsfunktion. Mit dieser Normallampe wird nun ein an $V(\lambda)$ angepasstes Photometer kalibriert. Auf der Lichteintrittsfläche des Photometers in der Entfernung d ergibt sich damit eine Beleuchtungsstärke $E(T)$. Die photometrische Empfindlichkeit s_v berechnet sich nun aus dem Verhältnis des resultierenden Photostroms $y(T)$ und der diesen hervorrufenden Beleuchtungsstärke. Da ein Photometerkopf nie ideal an $V(\lambda)$ angepasst ist muss zusätzlich noch eine Anpassungskorrektur vorgenommen werden ($F'(T)$). Photometer werden i. Allg. bei Normlichtart A, entsprechend einer Verteilungstemperatur $T_A = 2856K$ kalibriert. Die Anpassungskorrektur wird für diese Temperatur auf Eins normiert ($F(T)$). Durch eine Approximation ergibt sich ein einfacher Zusammenhang wenn der Anpassungsindex m verwendet wird. [6]

$$F'(T) = \frac{\int_0^\infty P(\lambda, T) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty P(\lambda, T) \cdot s_{rel}(\lambda) d\lambda} \rightarrow F(T) = \frac{F'(T)}{F'(T_A)} \approx \left(\frac{T}{T_A} \right)^m \quad (5)$$

Im nächsten Schritt wird mit Hilfe definierter Blenden und geometrischer Betrachtungen mit diesem Photometer einem Leuchtdichtenormal ein photopischer Leuchtdichtewert L_v

zugewiesen. Bis zu diesem Punkt ist eine rückführbare Kalibrierung mit Zuweisung einer Messunsicherheit möglich [7]. Diese Leuchtdichte wird nun auf das Leuchtdichtemessgerät übertragen, d.h. es wird der Faktor bestimmt zwischen angezeigter Leuchtdichte am Gerät und tatsächlich vorhandener Leuchtdichte. Für diese Wertzuweisung muss noch eine ausführliche Messunsicherheitsanalyse durchgeführt werden.

Die Kalibrierkette für das skotopisch angepasste Leuchtdichtemessgerät folgt zwar im Prinzip den gleichen Schritten, ist aber genauer betrachtet aufwendiger, da mehr Hilfschritte notwendig sind.

Die Lichtstärkenormallampe WL41/G ist für die Kalibrierung eines skotopisch angepassten Empfängers nicht unbedingt geeignet. Die Abweichung der spektralen Verteilung dieser Lichtquelle zur Normlichtart A ist für photopisch angepasste Empfänger vernachlässigbar, bei skotopisch angepassten Empfängern tritt die Abweichung stärker zu Tage. An deren Stelle wird eine Quartz-Halogen Lampe (FEL-Lampe) verwendet, deren spektrale Verteilung deutlich näher an Normlichtart A liegt. Auch diese Lampe hat durch eine Kalibrierung einen Lichtstärkewert I_v für die photopische Bewertung zugewiesen bekommen. Um diesen Wert in einen Lichtstärkewert I'_v für skotopische Bewertung umzurechnen, muss die relative spektrale Verteilung der Lichtquelle $S_{\text{rel}}^{\text{FEL}}(\lambda)$ mit einem Spektral-Radiometer bestimmt werden. Die Berechnung erfolgt dann gemäß (4):

$$I'_v = \frac{K'_m \int_0^\infty S_{\text{rel}}^{\text{FEL}}(\lambda) \cdot V'(\lambda) d\lambda}{K_m \int_0^\infty S_{\text{rel}}^{\text{FEL}}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda} \cdot I_v \quad (6)$$

Auch auf Empfängerseite sind zusätzliche Messungen notwendig. Die relative spektrale Empfindlichkeit $s'_{\text{rel}}(\lambda)$ muss an einem Spektralmessplatz bestimmt werden. Daraus kann dann ein Korrekturterm $F'(T)$ berechnet werden für die Abweichung der Strahlungsfunktion der Lichtquelle zu Planck bei der Verteilungstemperatur 2856K $P(T_A, \lambda)$:

$$F'(T) = \frac{\int_0^\infty V(\lambda) \cdot S_{\text{rel}}^{\text{FEL}}(T, \lambda) d\lambda}{\int_0^\infty s_{\text{rel}}(\lambda) \cdot S_{\text{rel}}^{\text{FEL}}(T, \lambda) d\lambda} \bigg/ \frac{\int_0^\infty V(\lambda) \cdot P(T_A, \lambda) d\lambda}{\int_0^\infty s_{\text{rel}}(\lambda) \cdot P(T_A, \lambda) d\lambda} \quad (7)$$

Die Kalibrierung des skotopisch angepassten Photometerkopfes erfolgt gegen die Normlampe. Die photometrische Empfindlichkeit für skotopische Bewertung ergibt sich aus:

$$s'_v = F'(T) \cdot y \cdot \frac{d^2}{I'_v} \quad (8)$$

Darin sind y der gemessene Photostrom des Empfängers und d der Abstand zwischen Lichtquelle und Empfänger. Mit diesem Empfänger kann nun ein Leuchtdichtenormal kalibriert werden.

Soll dieser Wert nun auf das Leuchtdichtemessgerät übertragen werden muss die spektrale Strahlungsverteilung des Leuchtdichtenormals $S_{\text{rel}}^{\text{LN}}(\lambda)$ und die relative spektrale Empfindlichkeit des Leuchtdichtemessgerätes bestimmt werden um daraus ein Korrekturterm zu berechnen.

Diese Form der Kalibrierung wird bisher von der PTB nicht durchgeführt. Um diese Kalibrierkette umsetzen zu können müssen die Messplätze weiterentwickelt und eine umfangreiche Messunsicherheitsanalyse durchgeführt werden.

4. Charakterisierung Photometer und Leuchtdichtemessgerät

Bevor eine Kalibrierkette wie im vorstehenden Kapitel umgesetzt werden kann, muss eine umfangreiche Charakterisierung der eingesetzten photopischen und skotopischen Photometer und Leuchtdichtemessgeräte vorgenommen werden. Dazu gehören Messungen zu Linearität, Temperatureinfluss, Ort der Lichteintrittsfläche, photometrische und spektrale Empfindlichkeit und vieles mehr.

Die Photometer für dieses Projekt sind mit einer Kosinusanpassung ausgestattet. Der Ort der Lichteintrittsfläche wird vom Hersteller auf der Oberfläche des Diffusors angegeben. Der tatsächliche Ort der Lichteintrittsfläche muss verifiziert oder neu bestimmt werden. Dazu wird der Photostrom im Fernfeld in vier verschiedenen Abständen gemessen. Ist der Ort der Lichteintrittsfläche auf der Diffusoroberfläche, so ergibt sich ein streng linearer Zusammenhang zwischen Photostrom und Abstandsquadrat. Ist dies nicht der Fall, so ist der Abstand und damit die Lage der Lichteintrittsfläche iterativ zu korrigieren, bis sich ein linearer Zusammenhang ergibt.

Die vorliegende Kosinusanpassung basiert auf einer Ringblende. Der Einfluss dieser Ringblende auf das Messergebnis muss bestimmt werden. Im Feldeinsatz wird der Empfänger im Allgemeinen überstrahlt, d.h. die Lichteintrittsfläche des Empfängers incl. Ringblende werden beleuchtet. Falls dies im Kalibrieraufbau nicht gewährleistet werden kann, müssen die Ergebnisse korrigiert werden.

Die Linearität des Empfängers von sehr kleinen bis sehr großen Beleuchtungsstärken muss sichergestellt werden. Dazu werden Messungen mit unterschiedlichen Lichtquellen im Beleuchtungsstärkebereich von ca. 0,01 lx bis 10000 lx durchgeführt. Ist das Photometer in diesem Bereich nicht linear, ist es als Referenzempfänger in der Kalibrierkette ungeeignet.

Um Abweichungen in der Raumtemperatur bei Kalibrierungen und Feldmessungen korrigieren zu können, muss der Einfluss der Temperaturänderung auf die Messungen bestimmt werden. Dazu werden Messungen bei unterschiedlicher Raumtemperatur durchgeführt und ein Temperaturkoeffizient bestimmt.

Sind diese Charakterisierungen abgeschlossen kann die photometrische Empfindlichkeit und der Anpassungsindex bestimmt werden. Für den photopisch angepassten Empfänger kann das mit konventionellen Verfahren geschehen. Die photometrische Empfindlichkeit wird mit einer Lichtstärkenormallampe WI41/G bei einer Verteilungstemperatur von 2856 K bestimmt. Um den Anpassungsindex zu berechnen, bestimmt man die Empfindlichkeit bei vier verschiedenen Verteilungstemperaturen und berechnet den Best-Fit aus den vier Messungen. Für den skotopisch angepassten Empfänger wird die photometrische Empfindlichkeit und die spektrale Fehlanpassung, wie im vorherigen Abschnitt erklärt, mit einer FEL-Lampe bestimmt. Dafür sind die spektralen Daten von Photometer und Lichtquelle nötig.

Die Bestimmung der relativen spektralen Empfindlichkeit der Photometer erfolgt an einem der Spektralmessplätze der PTB. Dies ist zunächst der DSR-Messplatz [8], bei dem die quasi-monochromatische Strahlung durch eine Lampe-Monochromator-Anordnung erzeugt wird. In einem weiteren Schritt wird die Empfindlichkeit auch an einem laserbasierten Messplatz TULIP [9] bestimmt, um auch im Randbereich des Filters noch ein genügend großes Signal-Rausch-Verhältnis zu erreichen.

Auch für die Leuchtdichtemessgeräte muss die Linearität sichergestellt werden. Dafür wird ein im Leuchtdichteniveau durchstimmbares Leuchtdichtenormal verwendet. Um den hohen Dynamikbereich zu gewährleisten und um Information über die spektrale Linearität zu erhalten wird diese zusätzlich am Lasermessplatz bestimmt.

Die relative spektrale Empfindlichkeit von Leuchtdichtemessgeräten kann mit hinreichend kleiner Messunsicherheit nur am Lasermessplatz TULIP bestimmt werden. Aus diesen Messungen kann auch die spektrale Fehlanpassung der Empfänger bestimmt werden. Mit einem Leuchtdichtenormal wird dann der Kalibrierfaktor, also die Abweichung zwischen angezeigtem Wert und der tatsächlich vorhandener Leuchtdichte bestimmt werden.

Für eine Kalibrierung reichen diese Messungen alleine aber nicht aus. Erst durch eine Analyse der Messunsicherheitsbeiträge wird aus einer Charakterisierung auch eine Kalibrierung. Um diese Einflussfaktoren bestimmen zu können erfolgen Messungen zum Einfluss der Größe der leuchtenden Quelle auf das Messergebnis (size-of-source effect), zum Einfluss der Fokussierung, eine Analyse zur tatsächlichen Messregion, etc.

4. Zusammenfassung

Auch wenn der skotopische Hellempfindlichkeitsgrad nur eine andere Bewertungsfunktion in der Messtechnik darstellt und Leuchtdichtemessgeräte seit Jahren im Einsatz sind stellt diese Messtechnik noch eine große Herausforderung in der rückgeführten Metrologie dar. Es wurden bereits Berechnungsverfahren entwickelt um aus photopischen und skotopischen Werten einen mesopischen Wert zu ermitteln. Allerdings sind noch viele Charakterisierungsmessungen nötig, um rückführbare Messwerte sicherzustellen.

The research leading to these results has received funding from the European Union on the basis of Decision No 912/2009/EC.

Literatur

- [1] <http://www.emrponline.eu/>
- [2] <http://www.m4ssl.npl.co.uk/>
- [3] CIE 191:2010, Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance, ISBN 978 3 901906 88 6
- [4] G. Sauter, Photometrie und die radiometrische Rückführung, 2007.
- [5] D.Lindner, Historie der Lichtstärkeeinheit (Zusammenfassung), LuxJunior 2011
- [6] D. Lindner, Empfängergestützte Photometrie, 44th International Scientific Colloquium, Ilmenau, 1999.
- [7] W. Erb, G.Sauter, PTB network for realization and maintenance of the candela, Metrologia 34, 115-124, 1997.
- [8] S. Winter, A. Sperling, Uncertainty analysis of a photometer calibration at the DSR setup at PTB, Proc. 2nd Expert Symposium on Measurement Uncertainty, 139-142, CIE x029:2006, ISBN 3-9810021-4-8, 2006.
- [9] S. Nevas et. al., Measurements of the spectral responsivity and f1' values of photometers, Proc. of the CIE Expert Symposium on Advances in Photometry and Colorimetry, pp.44-48, CIE x033:2008, ISBN 9783901906732, 2009.