

Die Candela als Maßeinheit des Lichtes

Armin Sperling*

* Dr. Armin Sperling, Arbeitsgruppe „Photometrie“, E-Mail: armin.sperling@ptb.de

Die Candela ist die Basiseinheit des Lichtes und ist ein Maß für die Lichtstärke, d. h. der Eigenschaft einer realen oder virtuellen Lichtquelle, die angibt, wie viel Licht in eine Richtung abgegeben wird (siehe Bild 1). Die Candela und die daraus abgeleiteten lichttechnischen Einheiten haben für den Normalverbraucher spätestens seit der Einführung der ECO-Design-Richtlinie der EU und dem damit verbundenen Verkaufsverbot von Glühlampen ab dem Jahr 2009 an Bedeutung gewonnen. Die photometrischen Einheiten und Kennzahlen sind wie kaum andere Einheiten ins Zentrum des allgemeinen Interesses gerückt, wenn es darum geht, Licht, Lampen und Leuchten zu bewerten. Statt der alleinigen Angabe einer elektrischen Leistung in Watt sind Begriffe wie Lichtstärke (in cd), Lichtstrom (in lm), Effizienz (in lmW^{-1}), ähnlichste Farbtemperatur T_N (angegeben in Kelvin) und Farbwiedergabeindex R_a kaufentscheidend. Unglücklicherweise hat die für die monetäre Abrechnung wichtige Maßeinheit Watt beim Kunden das Verständnis um die photometrischen Größen geschwächt, was bei modernen LED-Lichtquellen durch Fehlinterpretation von Leistungsdaten oft zur Verärgerung führt. Mit der Rückführung all dieser Einheiten und Kenngrößen befasst sich das Fachgebiet der Photometrie.

1 Tatsächlich wurde in der visuellen (subjektiven) Photometrie bis weit in die Mitte des 20. Jahrhunderts hinein unser Auge aufgrund seiner hohen Empfindlichkeit als Messinstrument verwendet. Erst mit der Entwicklung empfindlicher Photozellen und stabiler Halbleiterempfänger begann auch in der physikalischen (objektiven) Photometrie der Siegeszug der elektronischen Messwerterfassung.

Die Aufgabe der Photometrie ist hierbei allgemein die quantitative Bewertung von Strahlung in dem Spektralbereich den wir als Licht bezeichnen, und zwar unter den spektralen und geometrischen Randbedingungen die durch das menschliche Auge – oder genauer: durch das Auge eines definierten Normalbeobachters – vorgegeben sind. Die physikalische Größe, die hierbei von besonderer technischer Bedeutung ist, ist die Größe der photometrischen Lichtstärke¹. Die Geometrie von Messbedingungen ist hierbei für photometrische Größen essenziell. Weil die Lichtstärke eine charakteristische Eigenschaft einer Quelle ist und mit einfachsten Mitteln gemessen (verglichen) werden konnte, ist die Lichtstärke als Basisgröße der Photometrie ausgewählt worden und nicht der Lichtstrom, der als photometrisches Pendant zur radiometrischen Strahlungsleistung ebenfalls nahegelegen hätte. An dieser Stelle gibt es jedoch oft ein Missverständnis zwischen Photometrikern (Lichtmesstechnikern) und Radiometrikern (Strahlungsmesstechnikern). Wenn Photometriker über den Lichtstrom sprechen, meinen sie – den von einer Quelle aus in den Raum abgegebenen Strahlungsfluss, der in erster Linie als Integral über die Verteilung der in die verschiedenen Richtungen abgegebenen Lichtstärken verstanden wird. Der Radiometriker assoziiert mit Strahlungsleistung hingegen meistens den Strahlungsfluss, der auf eine Empfängerfläche auftrifft und der sich in erster Linie als Integral über die Verteilung der auf dem Empfänger auftreffenden Bestrahlungsstärke ergibt. Für den Photometriker ist daher die Geometrie der Strahlung entscheidend, während für den Radiometriker oft die Betrachtung der Geometrie des Empfängers ausreicht.

Aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaft kann die Größe Lichtstärke auch als die Dichte des von einem Ursprung aus in einen Raumwinkel ausgesendeten Lichtstroms bezeichnet werden, wobei der Lichtstrom die mit der Augenempfindlichkeit bewertete Strahlungsleistung einer Quelle ist. Die Lichtstärke ist somit eine klassische Strahlereigenschaft. Daher wurde sie auch früher mit Normalstrahlungsquellen wie z. B. der Hefner-Lampe (ab 1890) mit der Einheit *Hefner-Kerze* (HK) und

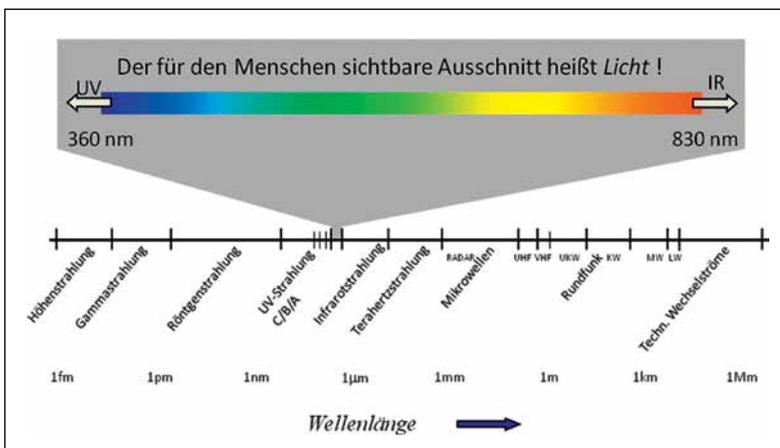


Bild 1: Der Lichtstrom einer Lichtquelle ist die im sichtbaren Spektralbereich in alle Richtungen abgestrahlte Lichtleistung

im Übergangsbereich des Dämmerungssehens das Verhalten der Empfindlichkeit des Normalbeobachters von der CIE festgelegt worden. Je nach Leuchtdichte und damit Adaptionniveau m des Auges, wobei $m = 0$ dem dunkeladaptierten Auge und $m = 1$ dem helladaptierten Auge entspricht, ergibt sich in diesem mesopischen Bereich für Leuchtdichten zwischen $0,005 \text{ cdm}^{-2} \leq L \leq 5 \text{ cdm}^{-2}$ eine Hellempfindlichkeitsfunktion $V_{\text{mes}}(\lambda)$ die sich gemäß

$$V_{\text{mes}}(\lambda) = \frac{1}{M(m)}(mV(\lambda) + (1-m)V'(\lambda)) \quad (1)$$

aus einer Linearkombination der photopischen und skotopischen Empfindlichkeit berechnen lässt (siehe Bild 2). In der Abbildung sind die spektralen photometrischen Strahlungsäquivalenzen für eine Reihe ausgewählter Adaptionniveaus zwischen 0 und 1 dargestellt. Der Faktor $M(m)$ ist lediglich ein Normierungsfaktor, der das jeweilige Maximum von $V_{\text{mes}}(\lambda)$ auf eins normiert.

Durch die Candela-Definition werden alle Kurven der spektralen Strahlungsäquivalenzen im Punkt (555,016 nm, 683 lmW⁻¹) normiert. Insofern wird klar, warum in der Candela-Definition nur eine Frequenz stehen darf.

In der Realität ist das Adaptionniveau aber typischerweise nicht bekannt. Das Adaptionniveau m lässt sich aber aus einer gemessenen mittleren Leuchtdichte rekursiv bestimmen [4]. Für reale Anwendungen, z. B. die Auswertung von Messkamerabildern einer beleuchteten Straße bei Nacht, reicht dies jedoch in der Regel nicht aus, da bisher nicht geklärt ist, welche im Gesichtsfeld der Kamera (bzw. des Auges) erfasste mittlere Leuchtdichte zur Berechnung eines Adaptionniveaus hinzuzuziehen ist. In einer Arbeitsgruppe des CCPR des CIPM wird derzeit an einer neuen Ausführungsbestimmung gearbeitet, die die mesopische Empfindlichkeitsfunktion auch offiziell für die Anwendung in Zusammenhang mit der Einheit Candela nutzbar macht.

Aus der Lichtstärke I lassen sich alle weiteren bekannten photometrischen Einheiten herleiten. So kann der Lichtstrom Φ als räumliches Integral über eine Lichtstärkeverteilung,

$$\Phi = \iint_{\vartheta, \varphi} I(\vartheta, \varphi) \sin \vartheta d\varphi d\vartheta \quad (2)$$

die Beleuchtungsstärke E als Dichte des Lichtstroms, der auf eine Fläche A auftrifft,

$$E = d\Phi/dA \quad (3)$$

und die Leuchtdichte L als Dichte des Lichtstroms in einem ausgestrahlten Bündel G

$$L = d\Phi/dG \quad (4)$$

$$\text{mit } G = \iint_{A, \Omega} \cos \alpha \, dA d\Omega \quad (5)$$

dargestellt werden, wobei α hier den Winkel zwischen der Richtung des Bündels und der Flächennormalen der Quelle beschreibt.

Die Beleuchtungsstärke nimmt hierbei eine besondere Stellung ein, da sich jede photometrische Messung im Prinzip auf die Messung des Photostroms i eines Empfängers zurückführen lässt, der der mittleren Beleuchtungsstärke \bar{E} auf seiner Oberfläche A_0 proportional ist. Die Beleuchtungsstärke kann hierbei immer als integrale Wichtung der spektralen Empfindlichkeit $s(\lambda) = s_0 s_{\text{rel}}(\lambda)$ des Empfängers mit der relativen spektralen Strahlungsverteilung $S(\lambda) = d\Phi(\lambda)/d\lambda$ der Quelle verstanden werden.

$$\bar{E} = i \cdot \frac{K_m^m \int_0^\infty S(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{A_0 s_0 \int_0^\infty S(\lambda) s_{\text{rel}}(\lambda) d\lambda} \quad (6)$$

Die Geometrie des Strahlengangs von der Quelle bis zur Empfängeroberfläche, die beim Messprozess in das Modell der Auswertung eingeht, bestimmt hierbei welche photometrische Größe gemessen wird. Der Faktor hinter dem Photostrom in (6) beschreibt die photometrische Empfindlichkeit s_v eines Photometers, die im Allgemeinen keine Konstante ist, sondern vom Spektrum der Lichtquelle $S(\lambda)$ abhängt. Um einem Photometer trotzdem einen eindeutigen Kalibrierwert zuzuordnen, hat man sich darauf verständigt, die Empfindlichkeit bezogen auf die Strahlungsfunktion eines Planckschen Strahlers $P(T_A, \lambda)$ bei einer Temperatur $T_A = 2856 \text{ K}$, die auch als Normlichtart A bezeichnet wird, anzugeben.

Da bei einer realen Messung weder die spektrale Empfindlichkeit des verwendeten Photometers ideal an eine der Bewertungsfunktionen, $V(\lambda)$, $V'(\lambda)$ oder $V_{\text{mes}}(\lambda)$ angepasst ist, noch die betrachtete Lichtquelle einem Planckschen Strahler entspricht, sind gewonnene Messwerte immer über eine spektrale Fehlanpassungskorrektur CCF gemäß

$$CCF = \frac{\int_0^\infty S(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty S(\lambda) s_{\text{rel}}(\lambda) d\lambda} \bigg/ \frac{\int_0^\infty P(T_A, \lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty P(T_A, \lambda) s_{\text{rel}}(\lambda) d\lambda} \quad (7)$$

zu korrigieren, wobei hier $V(\lambda)$ in (7) stellvertre-

tend für die benötigte Bewertungsfunktion steht. Waren die erforderlichen Korrekturen bei Glühlampenbeleuchtung klein, so können Sie je nach Güte der spektralen Anpassung des verwendeten Photometers bei modernen LED-Lichtquellen durchaus im zweistelligen Prozentbereich sein. Aus diesem Grunde diskutiert man im internationalen Rahmen die Einführung weiterer Normlichtarten für LED-Lichtquellen [5].

Alternativ besteht immer auch die Möglichkeit, das Spektrum direkt absolut und spektral aufgelöst zu messen und die photometrischen Bewertungsfunktionen rein rechnerisch zu berücksichtigen. Die hierzu infrage kommenden Systeme sind aber in der Regel teuer und bezüglich ihrer Robustheit und Stabilität für viele Anwendungen noch nicht ausreichend. Regelmäßig werden leider die Messunsicherheiten derartiger System unterschätzt, was auch daran liegt, dass aufgrund der komplexeren Messtechnik zusätzliche Unsicherheitsbeiträge (z. B. durch Bandpasseigenschaften und Streulicht), die dem Anwender oft nicht zugänglich sind, bei der absoluten Bestimmung photometrischer Größen mithilfe von Spektroradiometern berücksichtigt werden müssen.

Unverzichtbar und mittlerweile marktbestimmend sind jedoch spektral auflösende Geräte, wie Array-Spektroradiometer, dort, wo nur relative Messwerte, wie z. B. bei der Bestimmung der Farbe von Licht bzw. der Farbe von reflektiertem Licht, benötigt werden.

Bei der Bestimmung von Farbe geht es um die Bestimmung des Verhältnisses von spektralen Strahlungsfunktionen, die mit den Normspektralwertfunktionen $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ bewertet werden, wobei $\bar{y}(\lambda)$ mit $V(\lambda)$ identisch ist. Insofern ist auch die Farbmessstechnik an die Photometrie gekoppelt.

Da es sich bei den farbmessstechnischen Größen um Eigenschaften handelt, die durch Verhältnismessungen gewonnen werden, spricht man hier auch von farbmessstechnischen Kennzahlen und nicht von Einheiten. Nichtsdestotrotz haben eben solche farbmessstechnischen Kennzahlen wie die Normfarbwertanteile (x, y) oder der Farbwiedergabeindex R_a (engl.: CRI, *colour rendering index*) seit Einführung von modernen Lichtquellen eine besondere Bedeutung erhalten, da z. B. mit LED-Lichtquellen im Prinzip sehr unterschiedliche Lichtfarben und Farbwiedergaben hergestellt werden können. Die Tatsache, dass es sich „nur“ um Kennzahlen handelt, heißt jedoch nicht, dass die Messungen messtechnisch einfach sind. Genau das Gegenteil ist der Fall, da für die Bestimmung der Farborte die steilen Flanken der Normspektralwertfunktionen mit den Strahlungsfunktionen der Quellen gewichtet werden müssen, die, wie bei LEDs typisch, auch spektral sehr steile Flanken aufweisen können. Unsicherheiten in der Bestimmung

der Strahlungsfunktion führen hier schnell zu großen Unsicherheitsbeiträgen in der Bestimmung des Farbortes. Hier kann die PTB als Nationales Metrologieinstitut die Wünsche nach den kleinen Messunsicherheiten, wie sie von Herstellern sowie von Mess- und Kalibrierlaboratorien gefordert werden, zurzeit noch nicht im vollen Umfang erfüllen.

In der Vergangenheit wurden bei Testergebnissen häufig sowohl für photometrische Messwerte als auch für Kennzahlen in der Farbmessstechnik keine Messunsicherheiten angegeben. Auch wurde deren Wirkung bei der Angabe von Toleranzen nicht immer adäquat berücksichtigt. Für die Messung von LED-Lichtquellen wurde mit der in diesem Jahr veröffentlichten europäischen Norm DIN EN 13032-4:2015 [6], die über die *Commission Internationale de l'Éclairage*, Internationale Beleuchtungskommission (CIE) auch als internationaler Standard CIE S025 [7] veröffentlicht wurde, ein erster Schritt in die Richtung gegangen, auch für die Ergebnisse von Testverfahren die Angabe rückführbarer Messunsicherheiten zu fordern, und diese bei Toleranzangaben zu berücksichtigen.

Dieser Vorstoß in der LED-Messtechnik wird sicherlich in Zukunft auch auf andere Anwendungsnormen zur Bewertung von Licht und Farbe von leuchtenden und nicht selbstleuchtenden Quellen einwirken. Für die Weitergabe von Messunsicherheiten auf dieser Ebene des Messwesens werden die nationalen Metrologieinstitute und die akkreditierten Kalibrierlabore gefordert sein, die Industrie mit geeigneten applikationsnahen Transferstandards zu unterstützen.

Literatur

- [1] Comptes Rendus de la 16e CGPM (1979); 1980; p.100
- [2] W.R. Blevin; Corrections in Optical Pyrometry and Photometry for the Refractive Index of Air; *Metrologia* 8; 146–147; 1972
- [3] SI Brochure Appendix 2; Practical realization of the definition of the candela; http://www.bipm.org/utills/en/pdf/SIApp2_cd_en.pdf (letzter Aufruf: 03.12.2015)
- [4] CIE 191:2010; Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance
- [5] T. Pulli et al; Advantages of white LED lamps and new detector technology in photometry; *Light: Science & Applications* (2015) 4; e332
- [6] EN 13032-4:2015; Light and lighting – Measurement and presentation of photometric data of lamps and luminaires – Part 4: LED light sources and luminaires
- [7] CIE S025:2015; Test Methods for LED Lamps – LED Luminaires and LED Modules