

Ein Maß für sichtbares Licht – Entwicklung und Bedeutung im Internationalen Einheitensystem

Armin Sperling*, Stefan Kück**

1. Einleitung

Das für uns Menschen sichtbare Licht beeinflusst unseren gesamten Alltag, unser Verhalten, unseren Tagesrhythmus, unseren Stoffwechsel, unsere Kommunikation, unser Wohlbefinden und unsere Leistungsfähigkeit. Licht ist Werkzeug, Information und Medizin zugleich. Mit der Industrialisierung und der damit einhergehenden Möglichkeit der Schaffung künstlich beleuchteter Umfelder und Arbeitsumgebungen wurde die Notwendigkeit der quantitativen und qualitativen Beschreibung von Licht offensichtlich, da mangelhaftes Licht all die oben beschriebenen „natürlichen“ Funktionen beeinträchtigt. Die objektive physikalische Bewertung und Messbarkeit von Licht war daher bereits kurz nach ihrer Gründung eine der zentralen Aufgaben der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt.

Die wissenschaftliche Disziplin, die sich mit der Messung von Licht befasst, wird Photometrie genannt. Zur Erläuterung der photometrischen Einheiten befassen wir uns zunächst mit der unterschiedlichen Bedeutung der Begriffe Licht und Strahlung. Anschließend werden wir die historischen und heutigen Ansätze der Einbindung von Lichtmesstechnik in das internationale Einheitensystem beschreiben, wobei wir insbesondere die Rolle der Hellempfindlichkeitsfunktionen eines menschlichen Beobachters beleuchten werden. Abschließend gehen wir noch kurz auf mögliche zukünftige Entwicklungen ein.

2. Licht

Der visuell wahrnehmbare Spektralbereich der elektromagnetischen Strahlung, den wir unter dem Begriff Licht zusammenfassen, wird von der Empfindlichkeit des menschlichen Auges bestimmt. Er reicht von 360 nm bis 830 nm, also vom Ultravioletten (UV) bis hin zum nahen Infraroten (NIR). Licht umfasst also nur einen kleinen Teilbereich elektromagnetischer Strahlung. Der spektrale Verlauf der Hellempfindlichkeit des Auges wurde Anfang des 20. Jahrhunderts aus dem Mittelwert von Messungen an einer Reihe von (europäischen) Probanden bestimmt. Das Ergebnis dieser Messungen ist der

Hellempfindlichkeitsgrad des menschlichen Auges. Er wird durch die auf Eins normierte, sogenannte $V(\lambda)$ -Funktion repräsentiert und ist in Bild 1 zusammen mit dem terrestrischen Sonnenspektrum dargestellt. Das Maximum der $V(\lambda)$ -Funktion liegt bei exakt 555 nm, also ziemlich genau dort, wo auch das auf der Erde vorliegende Spektrum der Sonne maximal wird.

Da die tatsächliche, individuelle Lichtempfindlichkeit des menschlichen Auges jedoch von Person zu Person abweicht und außerdem von deren Alter und Ethnie sowie nicht zuletzt auch von der Beleuchtungssituation abhängig ist, hat man mit dem Übergang von der visuellen Photometrie zur physikalischen Photometrie sogenannte Normalbeobachter mit definierten spektralen Verläufen der Empfindlichkeit festgelegt. Zurzeit sind von der Internationalen Beleuchtungskommission, der CIE (*Commission Internationale de l'Éclairage*), die Hellempfindlichkeitsgrade $V(\lambda)$ für photopisches Sehen (d. h. für ein helladaptiertes Auge), $V'(\lambda)$ für skotopisches Sehen (d. h. für ein dunkeladaptiertes Auge) und $V_{\text{mes}}(\lambda)$ für

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

** Prof. Dr. Stefan Kück, Fachbereich „Photometrie und angewandte Radiometrie“, E-Mail: stefan.kueck@ptb.de

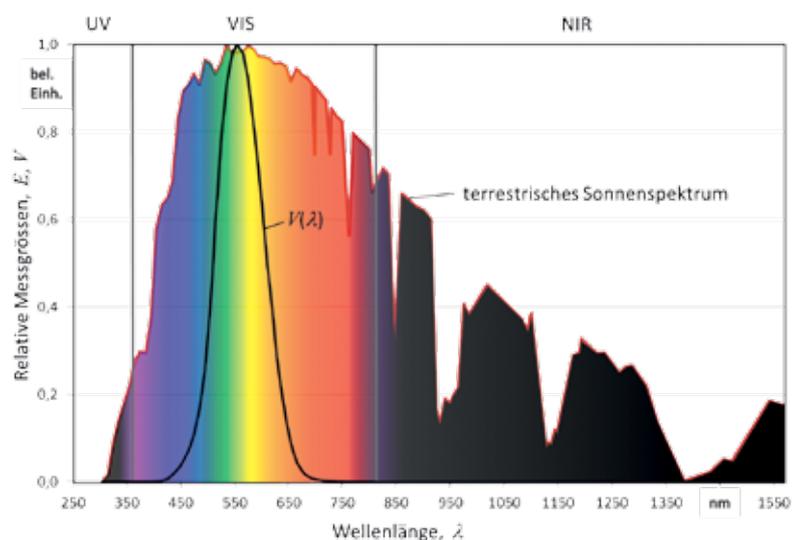


Bild 1: Relativer Verlauf des terrestrischen Sonnenspektrums im ultravioletten (UV), visuellen (VIS) und nahen infraroten Spektralbereich mit den Absorptionsbanden der Atmosphäre. Innerhalb des visuellen Spektralbereichs ist der Verlauf der $V(\lambda)$ -Funktion eingetragen.

mesopisches Sehen (d. h. im Übergangsbereich) festgelegt. Diese Funktionen werden für die physikalische Bewertung von Licht eingesetzt und zwar unabhängig von der tatsächlichen individuellen Sehempfindung eines Menschen.

3. Anbindung an das SI

Bis Mitte des 20. Jahrhunderts, bevor die ersten hinreichend empfindlichen elektrischen Empfänger aufkamen, wurde das menschliche Auge als *visueller Komparator* in der photometrischen Messtechnik eingesetzt. Hierbei misst und bewertet das menschliche Auge als abbildendes System im Prinzip die Leuchtdichte von Objekten, da das Licht eines betrachteten Objekts über die Augenlinse gesammelt und auf ein Flächenelement der Netzhaut abgebildet wird. Das Hauptaugenmerk der Photometrie lag daher nicht nur auf der zu bewertenden Gesamtmenge an elektromagnetischer Strahlung, dem Lichtstrom, sondern insbesondere auch in der räumlichen Ausstrahlungscharakteristik der Lichtquellen, die das betrachtete Licht aussendeten oder reflektierten.

Die elementare physikalische Größe, die die Aussendung von Licht einer Quelle beschreibt, ist die Lichtstärke I_v . Sie ist das mit dem Hellempfindlichkeitsgrad bewertete photometrische Pendant zur radiometrischen Größe Strahlstärke I_e . Der Index „v“ steht hierbei für „visuell“, der Index „e“ für „energetisch“; diese Indizes definieren eindeutig den Bezug zur Photometrie bzw. zur Radiometrie. Vereinfacht dargestellt beschreibt die Lichtstärke den Lichtstromanteil, den eine Lichtquelle in eine Richtung in einem hinreichend schmalen

Lichtkegel aussendet. Physikalisch korrekt würde man sie als die auf den Raumwinkel Ω bezogene Dichte des in eine Richtung ausgesendeten Lichtstroms Φ_v bezeichnen, d. h. $I_v = d\Phi_v/d\Omega$.

Noch bevor die Internationale Meterkonvention unterschrieben wurde, verwendete man bereits die Lichtstärke als Basisgröße für die Bewertung von Licht und zur eindeutigen Beschreibung von Lichtquellen. Sie wurde auch deshalb gewählt, weil sie mit einfachen Mitteln (siehe Bild 2) über einen visuellen Beleuchtungsstärkevergleich unter Einbeziehung von Abstand und Raumwinkel messbar war: in Abbildung 2 wird der Abstand d_2 einer Testlampe solange verändert, bis das zugehörige durchscheinende Papierfenster, gleich hell erscheint, d. h. die gleiche Leuchtdichte wie das durch die Normallampe beleuchtete Papier aufweist. Die Lichtstärke ergibt sich dann über das Verhältnis der Abstandsquadrate zu:

$$I_2 = I_1 \frac{d_2^2}{d_1^2} \quad (1)$$

Ursprünglich wurde die Einheit der Lichtstärke also naheliegenderweise auf die gerichtete Lichtausstrahlung einer Normallichtquelle zurückgeführt. In den Anfängen der Photometrie ergab sich hierbei der Wert der Einheit in Abhängigkeit vom Typ der verwendeten Normlichtquelle. Die wichtigsten Vertreter dieser Normlichtquellen waren die Hefner-Lampe im deutschsprachigen Raum, die Pentan-Lampe in England und die Carcel-Lampe in Frankreich [2]. Im Jahr 1937 verständigte man sich im *Comité Consultatif de Photométrie* (CCP, dem Vorgänger des heutigen CCPR, *Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie*, bevor die Radiometrie mit aufgenommen wurde) darauf, eine weltweit einheitliche, quellenbasierte Definition für die Einheit der Lichtstärke zu schaffen [3]. Als bestmöglich geeignete Lichtquelle wurde hierzu ein Hohlraumstrahler gewählt, denn die Strahlung aus einem abgeschlossenen und im thermischen Gleichgewicht befindlichen Hohlraum lässt sich physikalisch durch das Planck'sche Strahlungsgesetz beschreiben. Im Vakuum hängt die Strahlung eines Hohlraums außer von Naturkonstanten nur noch von seiner Temperatur ab. Bei einem Hohlraumstrahler (auch „Schwarzer Strahler“ genannt) handelt es sich daher um eine berechenbare Lichtquelle.

Weißes Licht setzt eine hohe Hohlraumtemperatur voraus. Daher wurde die Temperatur des erstarrenden Platins eines Platin-Hohlraumstrahlers gewählt. Die neue Definition der Einheit der Lichtstärke sollte ab 1942 weltweit eingeführt werden, was sich jedoch durch den 2. Weltkrieg verzögerte. Erst im Jahr 1948 wurde in allen Staaten, die der Meterkonvention angeschlossen waren, auf die neue Einheit der Lichtstärke unter dem Namen Candela (cd) umgestellt. In der Fassung von 1967 [4] lautete ihre Definition:

„Die Candela ist die Lichtstärke in senkrech-

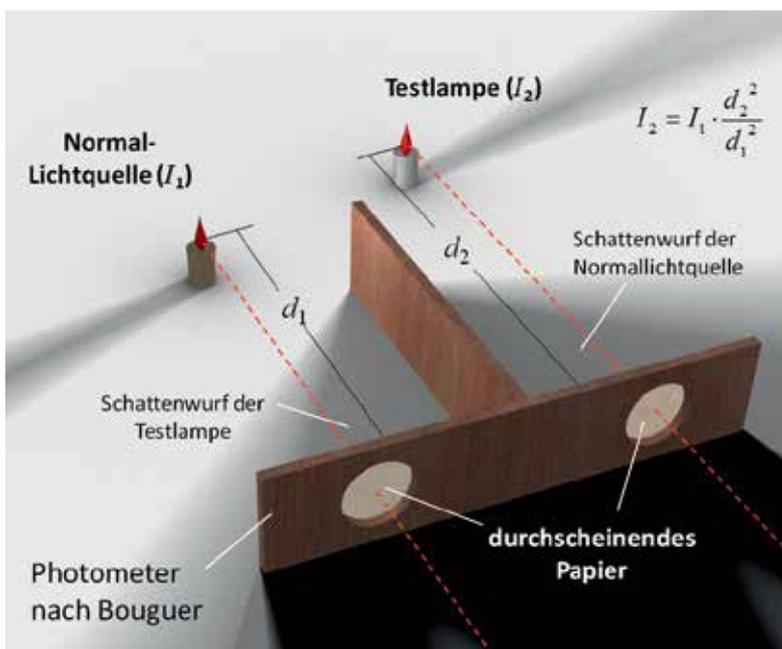


Bild 2: Prinzip des ersten Photometers, das um 1725 von Bouguer (1698–1758) beschrieben wurde [1]. Erklärung siehe Text.

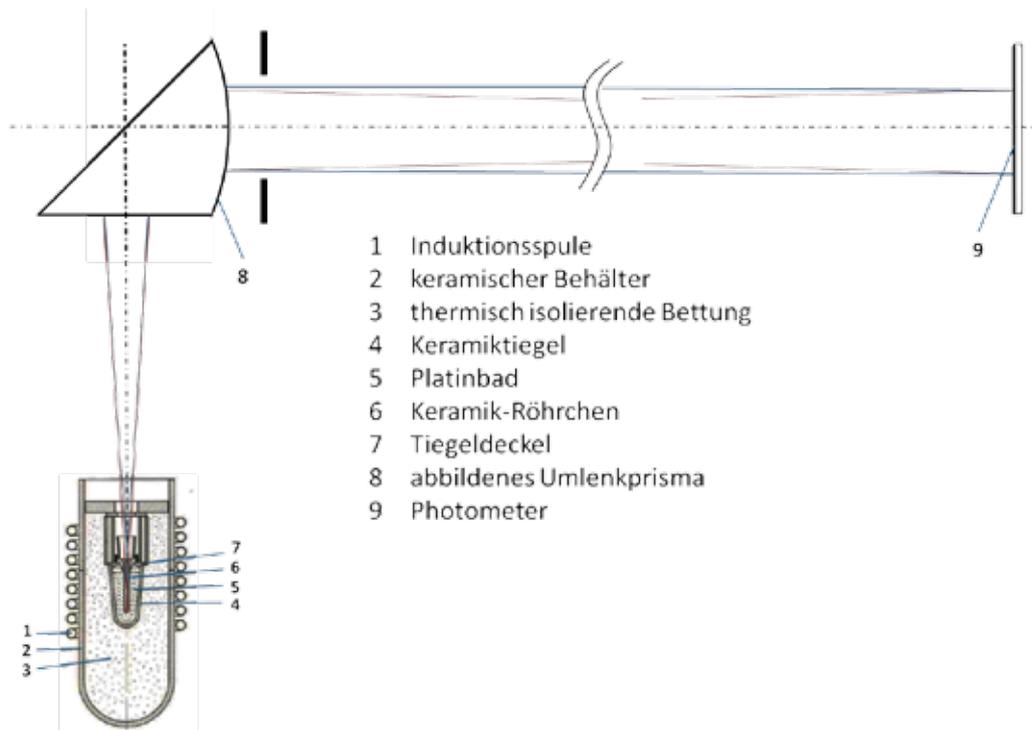


Bild 3: Messanordnung mit Platin-Punkt Hohlraumstrahler [5] zur Realisierung der Candela

ter Richtung von einer 1/600 000 Quadratmeter großen Oberfläche eines schwarzen Strahlers bei der Temperatur des beim Druck 101 325 Newton durch Quadratmeter erstarrenden Platins.“

Die Größe des Flächenanteils war so bemessen, dass der Zahlenwert der Einheit Candela in der Größenordnung der vorher von England, Frankreich und den USA genutzten Einheit „Internationale Kerze“ (IK) war. Eine typische Messanordnung zur Realisierung der Candela ist in Bild 3 gezeigt.

Mit dieser an eine Materialeigenschaft gekoppelten Definition war die Einheit der Lichtstärke unabhängig von radiometrischen Einheiten im SI-System festgelegt und nur noch von den Einheiten der Größen Fläche und Luftdruck abhängig. Durch den direkten Vergleich auf einer optischen Bank (die praktisch das Bouguer-Photometer aus Bild 2 ersetzt) wurden Glühlampen mit diesem Hohlraumstrahler unter Ausnutzung von Gleichung (1) verglichen und somit deren Lichtstärke absolut bestimmt.

Bei bekannter Temperatur des Erstarrungspunktes T_{Pt} von Platin ist über das Planck'sche Strahlungsgesetz auch die spektrale Strahlendichte $L_{e,\lambda}(\lambda, T_p)$ des Hohlraumstrahlers bekannt. Die mit der $V(\lambda)$ -Funktion gewichtete spektrale Strahlendichte, d. h. $\int L_{e,\lambda}(\lambda, T_p) \cdot V(\lambda) d\lambda$, gibt dann die im sichtbaren Bereich abgegebene radiometrische Strahlendichte mit der Einheit $Wm^{-2}sr^{-1}$ an. Die durch die leuchtende Fläche des Hohlraumstrahlers geteilte Lichtstärke im Fernfeld (d. h. $\Delta I/\Delta A$) ist nun aber gerade gleich der photometrischen Leuchtdichte L_v der Quelle mit der Einheit cdm^{-2} . Das Verhältnis dieser Leuchtdichte zur oben beschriebenen gewichteten Strahlendichte ist damit ein Maß

für die Äquivalenz zwischen photometrischen und radiometrischen Größen. Diese Äquivalenz gilt allgemein für die Umrechnung von radiometrischen Größen X_e in photometrische Größen X_v und lässt sich durch die Beziehung $X_v = K_m \int X_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda$ beschreiben. Setzt man die Fläche und die Größe der Lichtstärke aus der alten Candela-Definition ein, ergibt sich:

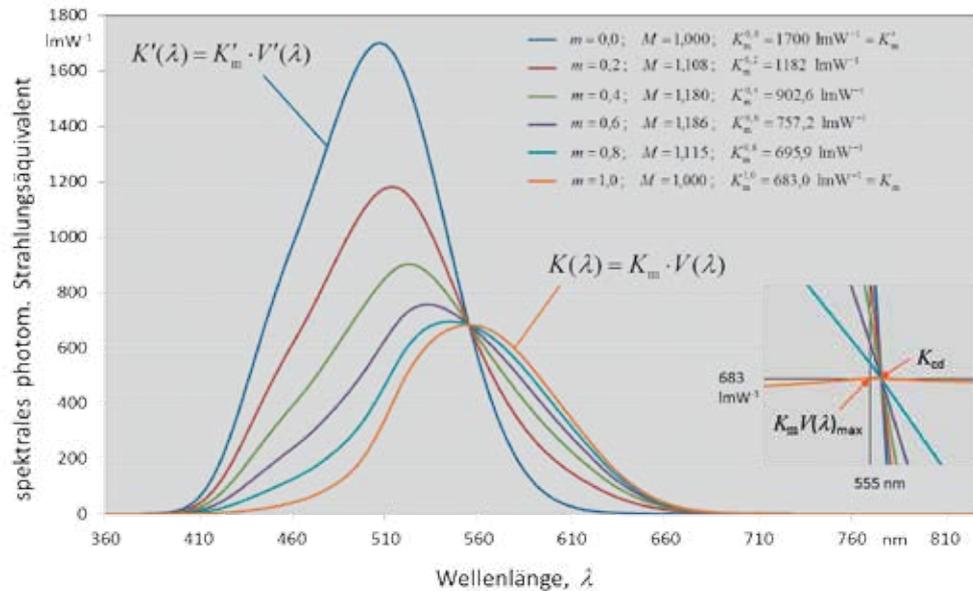
$$K_{m,alt} = \frac{600000 \frac{cd}{m^2}}{\int_0^\infty L_{e,\lambda}(\lambda, T_{Pt}) \cdot V(\lambda) d\lambda} \quad , \quad (2)$$

Der damalige Literaturwert für die Temperatur des erstarrenden Platins lag gemäß der Internationalen Temperaturskala (ITS-48) bei einer Temperatur von $T_{Pt} = 2042$ K [6], was zu einem K_m von 682,1 lm/W führte [7]. Für die heute gültigen Werte der Naturkonstanten und der Temperatur des erstarrenden Platins von 2041,4 K würde sich der Wert 685,06 lm/W [8] ergeben. Durch Einsetzen der skotopischen Hellempfindlichkeit $V'(\lambda)$ ergab sich für $T_{Pt} = 2042$ K analog das Strahlungsäquivalent für das dunkel-adaptierte Auge zu $K'_m = 1752$ lmW⁻¹.

Das Produkt aus K_m und $V(\lambda)$ wird spektrales photometrisches Strahlungsäquivalent $K(\lambda)$ genannt, welches wegen $V(\lambda) \leq 1$ gerade den Maximalwert K_m hat.

Da die Strahlung eines perfekten Hohlraumstrahlers vom verwendeten Material unabhängig ist, war es prinzipiell auch möglich, auf das teure, hochreine Platin zu verzichten und dafür günstigere Hohlraumstrahler (z. B. basierend auf

Bild 4:
Spektrales photometrisches Strahlungsäquivalent $K(\lambda)$ für die unterschiedlichen photopischen, skotopischen und mesopischen Hellempfindlichkeits-Funktionen und eine Auswahl mesopischer Adaptionsniveaus mit ihren maximalen Strahlungsäquivalenten K_m^m , wobei in K_m^m der obere Index m das Adaptionsniveau bei mesopischer Hellempfindlichkeit bezeichnet.



Graphit) zu verwenden. Man musste allerdings sicherstellen, dass der Hohlraumstrahler, der dann für die Rückführung verwendet wurde, die Temperatur des bei Normaldruck erstarrenden Platins hatte. Dieser Weg wurde von vielen nationalen Metrologieinstituten beschritten. Als jedoch Ende der 1960er-Jahre durch Messungen zur Internationalen Temperaturskala (IPTS-68) der Temperatur des erstarrenden Platins ein Wert von $T_{\text{pt}} = 2045 \text{ K}$ zuordnet wurde [6], entstand in der Photometrie eine große Verunsicherung bei der Realisierung der Einheit. Dies führte letztendlich in den 1970er-Jahren dazu, nach einer neuen Definition für die SI-Basiseinheit Candela zu suchen, die unabhängig von Artefakten und Materialeigenschaften sein sollte. Nach langen Diskussionen hat man sich dann 1979 darauf geeinigt, die Eigenständigkeit der photometrischen Größen aufzugeben und die Lichtstärke mithilfe eines definierten Strahlungsäquivalents an die Einheit der radiometrischen Strahlungsleistung zu koppeln. Hierdurch lässt sich die Einheit der Lichtstärke durch Anwendung radiometrischer Verfahren realisieren.

Man definierte [9]:

Die Candela ist die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$ aussendet und deren Strahlstärke in dieser Richtung $(1/683)$ Watt durch Steradian beträgt.

Wer genau hinschaut sieht, dass diese Definition nicht als Anleitung für die direkte Realisierung der Lichtstärke von einer Candela gedacht war, denn:

- Jede reale Strahlungsquelle besitzt eine endliche Bandbreite
- Die Lichtstärke steht im direkten Bezug zur Empfindlichkeit des menschlichen Auges, welches nicht nur bei einer einzelnen Wellenlänge empfindlich ist, sondern in einem Spektralbereich von 360 nm bis 830 nm.
- Die Definition macht keine Aussage über die quantitative Bewertung von Strahlung anderer Frequenzen bzw. Wellenlängen.

Stattdessen wird lediglich bei der festgelegten Frequenz von 540 THz die Äquivalenz $1 \text{ cd} \triangleq 1/683 \text{ W sr}^{-1}$ fixiert. Die zuzuordnende Wellenlänge entspricht hierbei wegen $n\lambda = c/f$ einem Wert von 555,016 nm, wobei mit einer Brechzahl $n = 1,00028$ von Luft [10] gerechnet wird.

Aus der Äquivalenz ergibt sich das photometrische Strahlungsäquivalent K_{cd} zu $K_{cd} = K(\lambda = 555,016 \text{ nm}) = 683 \text{ cdsrW}^{-1} = 683 \text{ lmW}^{-1}$.

Zur Festlegung des Zahlenwertes für das Strahlungsäquivalent wurden zwischen 1971 und 1979 umfangreiche Messungen durchgeführt – sowohl für die Bestimmung der Erstarrungstemperatur von Platin als auch für die Realisierung der Candela mit dem Platin-Hohlraumstrahler [7]. Basierend auf diesen Messungen einigte man sich letztendlich auf eine ganzzahlige Frequenz im Terahertz-Bereich sowie auf ein ganzzahliges Strahlungsäquivalent K_{cd} , welches sehr nahe beim Maximum des photopischen spektralen Strahlungsäquivalents, dem K_m , liegt.



Mit ein Grund, warum für K_{cd} nicht einfach K_m verwendet wurde, ergibt sich durch die Feststellung:

Die Definition der Einheit Candela für die Lichtstärke impliziert, dass sich die spektralen photometrischen Strahlungsäquivalente aller existierenden und zukünftigen photometrischen Hell-empfindlichkeiten genau im Punkt ($540 \cdot 10^{12}$ Hz, 683 lmW^{-1}) schneiden müssen.

Nur durch diese Nebenbedingung wird die Einheit Candela für alle Empfindlichkeitsfunktionen gleichermaßen anwendbar. Mit der Festlegung dieses Schnittpunktes ergaben sich neue Maximalwerte für die jeweiligen spektralen photometrischen Strahlungsäquivalente unterschiedlicher Hellempfindlichkeiten (siehe auch Bild 4). So führt die obige Festlegung dazu, dass K_m für photopisches Licht nun den Wert $683,002 \text{ lmW}^{-1}$ bekommt (siehe Ausschnittsvergrößerung in Abbildung 4). Dieser Wert liegt jedoch so nahe am Wert von K_{cd} , dass in der Praxis zwischen K_m und K_{cd} selten unterschieden wird.

Unter skotopischen Randbedingungen waren die Veränderungen deutlicher. Hier verkleinerte sich K'_m um 3 % von 1752 lmW^{-1} auf 1700 lmW^{-1} . Dieser Sprung wurde jedoch bei der Neudefinition hingenommen, da zu damaliger Zeit $V'(\lambda)$ in der Praxis kaum benutzt wurde.

Im Jahr 2010 wurde ein Algorithmus zu Bestimmung mesopischer Hellempfindlichkeiten $V_{mes}(\lambda)$ von der CIE festgelegt [11]. Da das Auge aufgrund seines Aufbaus im Prinzip Leuchtdichten „misst“ und sowohl die photopische als auch die skotopische Hellempfindlichkeit als Grenzfunktionen für hohe und niedrige Leuchtdichten zu beachten sind, bestand die Herausforderung darin, für Leuchtdichten im Zwischenbereich von $0,005 \text{ cdm}^{-2} \leq L \leq 5 \text{ cdm}^{-2}$ einen Zusammenhang zu finden, der die vorhandenen relativen Hellempfindlichkeitsfunktionen $V(\lambda)$ und $V'(\lambda)$ abhängig vom Leuchtdichteniveau ineinander überführt. Man hat sich darauf geeinigt, eine über das Adaptionsniveau m gesteuerte Linearkombination aus der photopischen und skotopischen Hellempfindlichkeit zu verwenden:

$$V_{mes}(\lambda) = \frac{1}{M(m)} (mV(\lambda) + (1-m)V'(\lambda)) \quad (3)$$

$M(m)$ ist hierbei ein Skalierungsfaktor, der dafür sorgt, dass das Maximum von $V_{mes}(\lambda)$ immer

auf Eins normiert ist. Bild 4 zeigt den Verlauf für einige ausgewählte Adaptionsniveaus. Der Zusammenhang zwischen Adaptionsniveau m und Leuchtdichte L wird in [11] näher erläutert.

An dieser Stelle soll nicht verschwiegen werden, dass es neben den oben angegebenen Funktionen, die den sogenannten CIE-2°-Beobachter beschreiben, noch weitere CIE-Beobachter (z. B. 10°-Beobachter, etc.) gibt, die zur Bewertung von Licht herangezogen werden können. Hintergrund des 10°-Beobachters ist, dass die Netzhaut im Auge des Menschen nicht gleichmäßig mit den lichtempfindlichen Zellen belegt ist. Im Durchstoßpunkt der optischen Achse des Auges mit der Netzhaut, der Netzhautgrube (Fovea), befindet sich das Maximum der Zapfen-Konzentration. Die für das Farbsehen verantwortlichen Zapfen werden bezüglich ihrer Empfindlichkeit im Wesentlichen von der $V(\lambda)$ -Funktion beschrieben. Die Konzentration an schwarz-weiß empfindlichen Stäbchen, deren Empfindlichkeit sich am besten durch die $V'(\lambda)$ -Funktion beschreiben lässt, hat ihr Maximum bei einem Winkel zwischen 15° und 20° von der optischen Achse. Je nach Beobachtungswinkel ändert sich daher die spektrale Empfindlichkeit des Auges und somit der Sinneseindruck für Helligkeit und Farbe. Diese Mechanismen spielen für die objektive Bewertung von direkten oder indirekten Lichtquellen eine untergeordnete Rolle, sodass wir uns hier auf den Winkelbereich des CIE-2°-Beobachters beschränken können, der beim fokussierten Betrachten zum Tragen kommt. Sobald man sich jedoch mit dem Sehen und der visuellen Empfindung beschäftigt, werden auch diese und weitere Eigenheiten des menschlichen Sehapparates wichtig.

Bild 5: Einflussgrößen der Strahler-basierten Realisierung der Einheit Candela

Nachdem die besondere Bedeutung der Hell-empfindlichkeit für das Verständnis der Definition der Einheit Candela beschrieben wurde, befassen wir uns im nächsten Abschnitt mit der tatsächlichen Realisierung der Einheit.

4. Messtechnische Realisierung

Eine naheliegende Realisierung wäre mithilfe eines beliebigen Hohlraumstrahlers als Normallichtquelle möglich, der im sichtbaren Spektralbereich genügend Strahlungsleistung emittiert. Bei

bekannter Temperatur des Hohlraumstrahlers (z. B. durch Verwendung von Fixpunktzellen mit bekannter Erstarrungstemperatur) kann die Strahldichte des Hohlraumstrahlers mithilfe der Planck'schen Strahlungsgleichung unter Verwendung der Konstanten $c_1 = 2\pi hc^2$ und $c_2 = hc/k$ bestimmt werden (siehe Bild 5). Entsprechend Gleichung (2) müsste bei der Anwendung des Hohlraumstrahlers ein Geometriefaktor theoretisch bestimmt und experimentell eingehalten werden, der sicherstellt, dass das Maximum des Strahlungsäquivalents der Quelle bei $K_m = 683,002 \text{ lm W}^{-1}$ liegt.

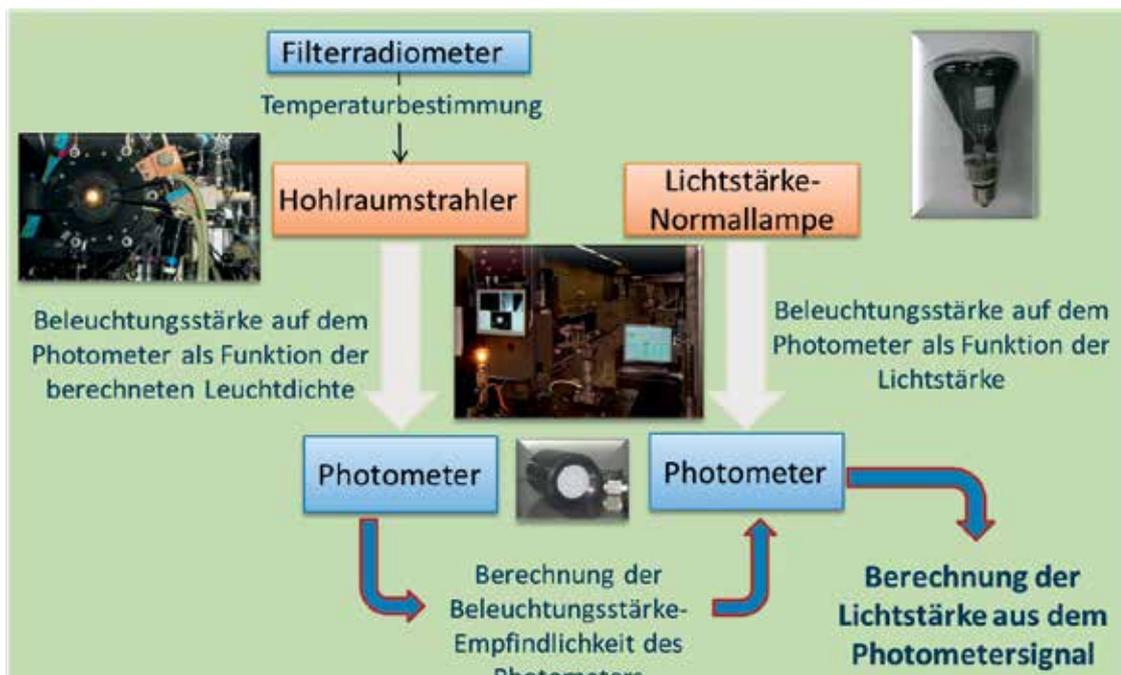


Bild 6: Rückführungskette bei der Strahler-gestützten Realisierung der Einheit Candela. In der Praxis verwendet man meistens Hohlraumstrahler aus Pyrographit. Als Normallampen kommen langlebige OSRAM W141/G zum Einsatz.

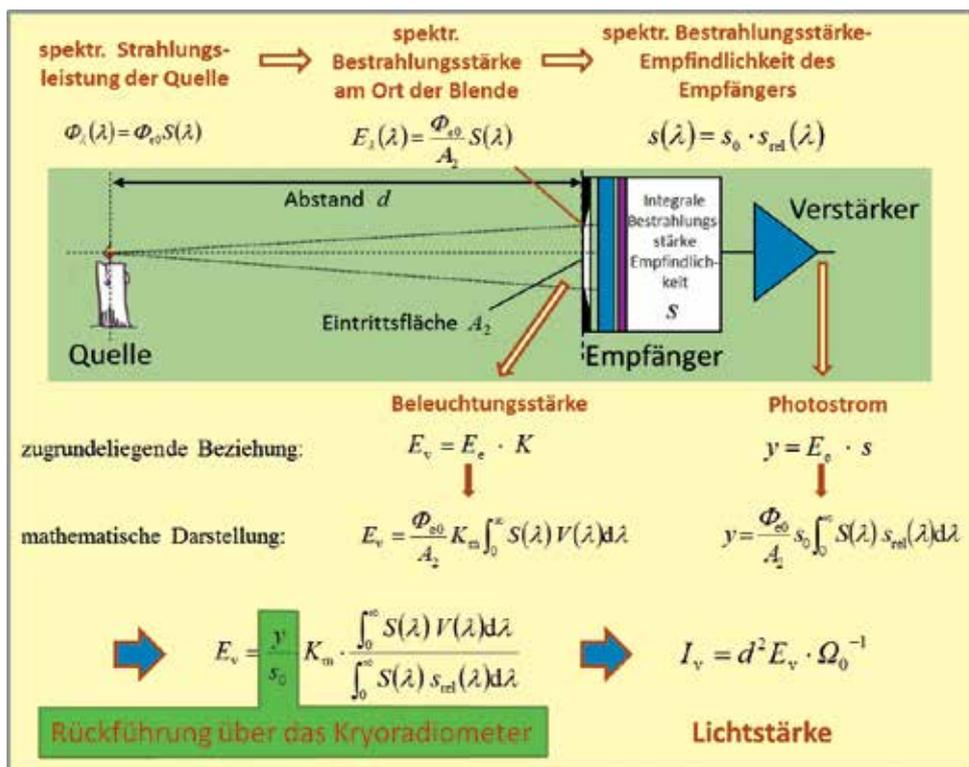


Bild 7: Empfänger-gestützte Realisierung der Einheit für die Größe Lichtstärke. Die Größe Ω_0 bezeichnet hier den Einheitswinkel von einem Steradian [sr]. Die Größen E_e , K und s sind jeweils die über das gesamte Spektrum integrierten Werte für die Bestrahlungsstärke, Strahlungsäquivalent und Empfindlichkeit.

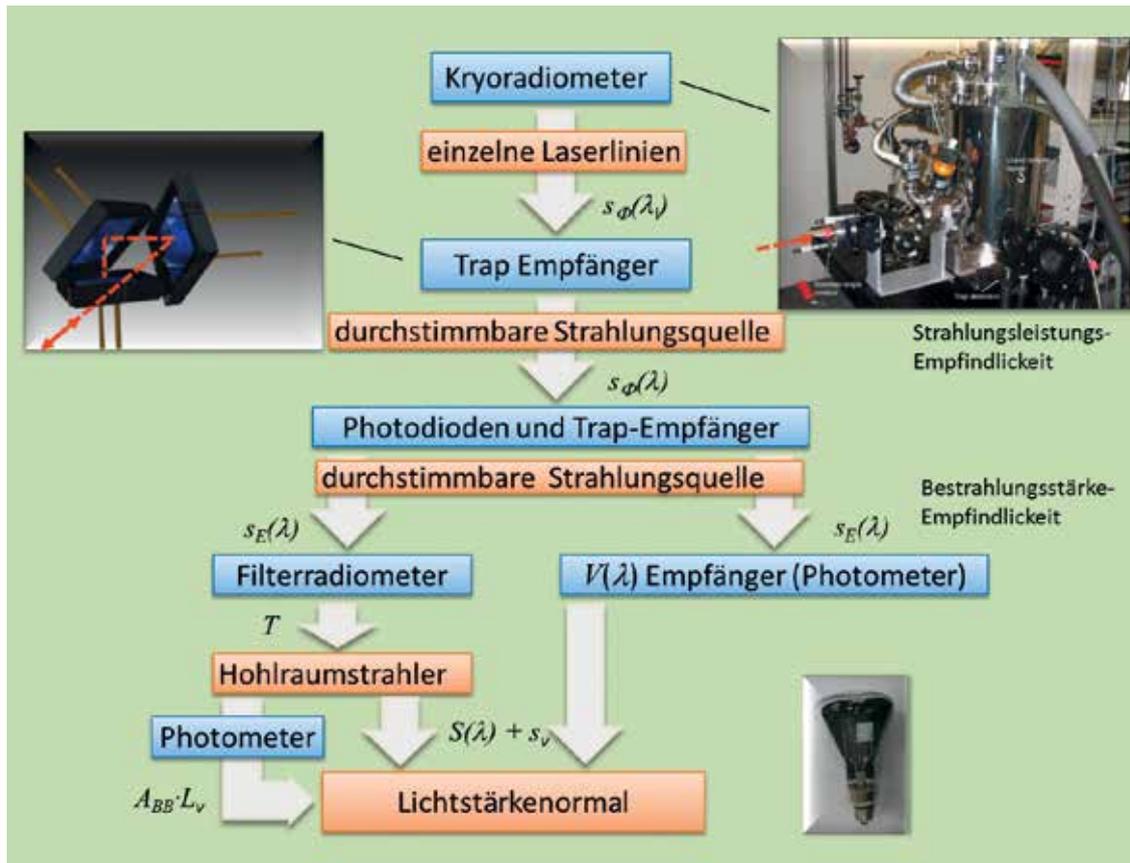


Bild 8: Rückführungskette bei der Empfänger-gestützten Rückführung auf das Kryoradiometer

Hat man einen Hohlraumstrahler gefunden, der die obige Messbedingung erfüllt, kann man andere Lichtquellen über einen direkten Vergleich mithilfe eines Photometers an dieses Primärnormal anschließen (Bild 6). Die Unsicherheit dieser Realisierung hängt in erster Linie von der Unsicherheit des Geometriefaktors sowie der Unsicherheit bei der Bestimmung der Hohlraumtemperatur ab.

Anstelle einer derartigen Strahler-basierten Realisierung, bei der die Einheit der Größe Lichtstärke durch die berechnete Strahlung einer Quelle unmittelbar bestimmt wird, ist auch eine Empfänger-gestützte Realisierung möglich. Voraussetzung hierfür ist, dass die Bestrahlungsstärke-Empfindlichkeit des verwendeten Strahlungsempfängers, d. h. das Verhältnis von gemessenem Ausgangssignal zu auffällender Bestrahlungsstärke, genau bekannt ist.

Da alle bekannten Empfänger spektrale Abhängigkeiten aufweisen, ist sowohl die absolute spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit des Empfängers als auch der relative spektrale Verlauf der damit gemessenen Lichtquelle erforderlich, um aus der mit $K_m \cdot V(\lambda)$ gewichteten Strahlungsfunktion und der gemessenen spektralen Bestrahlungsstärke die Beleuchtungsstärke zu berechnen. Über das Abstandsquadrat lässt sich dann bei großem Abstand von der Quelle (Fernfeld) leicht die Lichtstärke bestimmen (siehe Bild 7).

Zur Rückführung der spektralen Bestrahlungsstärke-Empfindlichkeit auf das SI bedient man

sich eines Kryoradiometers, bei dem zunächst die optische Strahlungsleistung einer monochromatischen Quelle mit einer elektrischen Leistung verglichen wird. Hierzu wird die optische Strahlung in einem schwarzen Hohlraum vollständig absorbiert und die hieraus resultierende Erwärmung des Hohlraums nach Abschatten der Quelle mit einer gleichstarken Erwärmung durch Hinzuführen einer elektrischer Heizleistung substituiert. Auf diese Weise kann Strahlungsleistung durch elektrische Leistung ausgedrückt werden. Aufgrund von Materialeigenschaften werden die höchsten Empfindlichkeiten und kleinsten Unsicherheiten bei einer Hohlraumtemperatur von ungefähr 6 K erreicht, woraus sich der Name Kryoradiometer herleitet [12, 13].

Hat man so die Strahlungsleistung der monochromatischen Quelle genau bestimmt, kann die Quelle genutzt werden um die Strahlungsempfindlichkeit $s_{\phi}(\lambda_i)$ von z. B. Halbleiterempfängern bei der gegebenen Wellenlänge zu kalibrieren (siehe Bild 8). Hier eignen sich vor allem sogenannte Trap-Empfänger, die aus mehreren hintereinander geschalteten einzelnen Photodioden bestehen (siehe Bild 8 oben links und [12]), die über ihre Empfängerfläche sehr homogen sind und deren relativer spektraler Empfindlichkeitsverlauf mit einigen zusätzlichen Annahmen sehr gut berechnet werden kann. Mit einer oder nur wenigen Kalibrierwellenlängen des Kryoradiometers erhält man so eine absolute

Anbindung der Skala für die Strahlungsleistungsempfindlichkeit $s_\phi(\lambda)$ an die anderen SI-Einheiten. Kennt man zusätzlich die bestrahlte Fläche des Empfängers (hierzu wird eine genau bekannte Messfeldblende vor die Empfängeröffnung gesetzt), lässt sich aus der Strahlungsleistungsempfindlichkeit die Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit $s_E(\lambda)$ herleiten. In einem nächsten Schritt können dann durch Vergleich mit dem Trap-Empfänger andere Empfänger (z. B. Radiometer, Pyrometer oder auch Photometer) bezüglich ihrer spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit kalibriert werden.

Hier schließt sich nun der Kreis, da für die Bestimmung der Temperatur des Hohlraumstrahlers im Falle der Strahler-basierten Rückführung (siehe Bild 6) in der Regel ein Pyrometer eingesetzt wird, dessen spektrale Empfindlichkeit vorher über die Kalibrierkette mit dem Kryoradiometer bestimmt wurde.

Die beiden hier angegebenen Wege zur Realisierung der Einheit werden auch in der Ausführungsbestimmung zur Candela des BIPM (frz.: *mis en pratique*) beschrieben [14].

5. Weitergabe der Einheit

In der Photometrie sind wir aber hiermit noch nicht am Ziel. Wäre die relative spektrale Empfindlichkeit des verwendeten Empfängers (hier: Photometers) identisch der $V(\lambda)$ -Funktion, würde eine einzige Kalibrierung des Photometers mit dem Kryoradiometer ausreichen, um für beliebige Strahlungsfunktionen, d. h. beliebige Lichtquellen, korrekte Beleuchtungsstärken bestimmen zu können. In der Praxis weicht die Empfindlichkeit eines Photometers jedoch von der festgelegten Hellempfindlichkeitsfunktion ab. Deshalb sorgt diese spektrale Fehlanpassung, deren Wirkung immer von der jeweiligen Strahlungsfunktion der Quelle abhängt, für fehlerhafte Messergebnisse. Um mit einem kalibrierten Photometer eine Lichtquelle zu kalibrieren, braucht man daher noch die relative Strahlungsfunktion der Quelle. Diese lässt sich z. B. aus dem spektralen Vergleich der Lichtquelle mit einem Hohlraumstrahler bekannter Temperatur bestimmen.

Um dieses Problem besser in den Griff zu bekommen und die Vergleichbarkeit von Messinstrumenten zu garantieren, hat man in der Photometrie sogenannte Normlichtarten mit definierter spektraler Verteilung festgelegt [15]. Zwei Normlichtarten, und zwar die Normlichtart A und Normlichtart D65, nehmen hierbei eine besondere Stellung ein. Insbesondere Normlichtart A, das Spektrum eines Hohlraumstrahlers mit der Temperatur von 2856 K, dient als Standardspektrum bei der Bestimmung der integralen photometrischen Empfindlichkeit s_v . In der Praxis werden

alle Eigenschaften photometrischer Empfänger in Bezug auf diese spektrale Strahlungsfunktion angegeben. Dieser Festlegung kommt zugute, dass bereits normale Glühlampen eine Strahlungsfunktion aufweisen, die sehr nahe am Planck'schen Spektrum liegt. Um die Unsicherheit bei der Weitergabe der Einheit Candela möglichst klein zu halten, werden daher als Transfornormallampen nach wie vor Glühlampen verwendet, die über ihren Lampenstrom auf eine Verteilungstemperatur (das ist die Temperatur des Hohlraumstrahlers, bei der die spektrale Verteilung gleich oder fast gleich der des betrachteten Temperaturstrahlers ist) von ungefähr 2856 K eingestellt werden. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass die Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung von spektralen Fehlanpassungen der Photometer bei ihrer Kalibrierung sehr klein bleiben. Der Lampenstrom als Nominalwert kann hierbei sehr genau eingehalten und reproduziert werden.

Bei Normlichtart D65 handelt es sich um ein sonnenähnliches Spektrum, das insbesondere dann zum Einsatz kommt, wenn Anwendungen mit Tageslicht zu beurteilen sind. D65 steht hier für eine festgelegte Strahlungsverteilung, deren Lichtfarbe der eines Hohlraumstrahlers mit einer Temperatur von 6500 K am nächsten kommt.

6. Mögliche zukünftige Entwicklungen

Mit der neuen Formulierung der Candela Definition im Sinne einer „Expliziten-Konstanten-Definition“ ist eine Festlegung getroffen worden, die die teilweise Missverständlichkeit der alten Formulierung beseitigt.

Ins Deutsche übersetzt lautet der derzeitige Entwurf des BIPM [16]:

Die Candela, Symbol cd, ist die SI-Einheit der Lichtstärke in einer bestimmten Richtung. Sie ist durch den festen numerischen Wert des photometrischen Strahlungsäquivalents für monochromatische Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12}$ Hz von 683 definiert, wenn es in der Einheit cd sr W^{-1} ausgedrückt wird, welches gleich lm W^{-1} oder $\text{kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^3 \text{cd sr}$ ist, wobei das Kilogramm, das Meter und die Sekunde durch h , c und $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ definiert sind.

Oft wird die Existenzberechtigung der Candela überhaupt in Frage gestellt. Aber die derzeit gewählte Form ist die einzige Möglichkeit, die



komplexe photometrische Messtechnik mit ihren gekoppelten Wirkungsfunktionen kohärent in dem SI-Einheitensystem abzubilden.

Bis heute ist die Bewahrung und die Weitergabe der Einheit Candela über die Lichtstärke von speziell hierfür entwickelten Normallampen (siehe Teilbild in Bild 8) der Weg, der mit kleinsten Unsicherheiten realisiert werden kann. Mit dem weltweiten Glühlampenverbot und den damit wegfallenden herstellungstechnischen Voraussetzungen für die Produktion auch von wissenschaftlichen Glühlampen fehlen den Messlaboren nun weltweit zunehmend die Artefakte für die Rückführung. Eine Umstellung auf spektralradiometrische Messungen einerseits und die Weitergabe der Einheit z. B. über Leuchtdioden-basierte Lichtquellen andererseits wird daher oft als unausweichlich angesehen. Die Messunsicherheiten einer hierauf basierenden Rückführungskette werden aber oft unterschätzt und es müssen in Bezug auf die Strahlungsfunktion der LED geeignete Rahmenbedingungen für die Rückführung gefunden werden.

Literatur

- [1] *J.W.T Walsh: Photometry*; Constable & Company LTD (1958)
- [2] *H. Lux*; Das moderne Beleuchtungswesen, Verlag von B.G. Teubner in Leipzig (1914)
- [3] Procés-verbaux des séances, Comité International des Poids et Mesures, 18, Paris, Gauthier–Villars (1937) 236
- [4] Bureau International des Poids et Mesures, (Hrsg); Comptes Rendus des Séances de la 13^e Conférence Générale des Poids et Mesures, Annex II: Bureau International des Poids et Mesures, Pavillon den Breteuil, F-92310 Sèvres (1968)
- [5] *H. Willenberg*; Die Lichtstärke-Einheit Candela, Technisches Messen, Band 349, Heft 2, Seiten 21–22
- [6] *C.R. Barber et al*; The Platinum Metals in the measurement of Temperature, Platinum Metals Rev. **13** (2), (1968) 65–67
- [7] *G. Bauer*; Zusammenfassung der Messergebnisse der PTB zur Bestimmung des Strahlungsäquivalents $K_{m,77}$ mit dem Platin Hohlraumstrahler für die 9. Sitzung des CCPR, (7.–9. Sept. 1977)
- [8] *G. Sauter*; Die Candela: Erläuterungen zum Verständnis der Definition und der Realisierung, PTB-Mitteilungen 107, **6/97**, 397ff
- [9] 16. Generalkonferenz für Maße und Gewicht (1979)
- [10] *W.R. Blevin*; Corrections in Optical Pyrometry and Photometry for the Refractive Index of Air, Metrologia **8** (1972) 146–147
- [11] CIE 191:2010; Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance, 73 Seiten
- [12] *K.D. Stock et al*; Trap-Empfänger und Dünnschicht-Thermosäulen als Bindeglieder zwischen Kryoradiometer und Gebrauchsempfänger. Laser in Forschung und Technik Vorträge des 12. Internationalen Kongresses Laser 95, (1996), DOI 10.1007/978-3-642-802638_175
- [13] *J.E Martin, N. P. Fox, P.J. Key*; A cryogenic radiometer for absolute radiometric measurements, Metrologia **21** (1985) No 3, 147–155
- [14] *J. Zwinkels, A. Sperling, T. Goodmann, J. Campos Acosta, Y. Ohno, M. L. Rastello, M. Stock, E. Woolliams*; Mise en pratique for the definition of the candela and associated derived units for photometric and radiometric quantities in the International System of Units (SI), Metrologia **53**, No. 3
- [15] ISO 11664-2:2007/CIE S 014–2:2006, Joint ISO/CIE Standard: Colorimetry-Part 2: Standard Illuminants for Colorimetry
- [16] BIPM: Draft text for the 9th edition of the SI Brochure, <http://www.bipm.org/utis/common/pdf/si-brochure-draft-2016.pdf> (Letzter Zugriff am 22.06.2016)