

Historie der Lichtstärkeeinheit (Zusammenfassung)

D. Lindner, A. Sperling

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

Die in den folgenden Abschnitten dargestellten Zusammenhänge zur Historie der Lichtstärkeeinheit geben nur einen Überblick über die wichtigsten „Meilensteine“ zur Entwicklung bis hin zur jetzigen SI-Basiseinheit. Weitergehende Informationen können aus den Literaturhinweise entnommen werden.

Für die Festlegung von Einheiten, deren Namen und Abkürzungen ist die Meterkonvention mit ihrer Generalkonferenz (CGPM) bzw. der „Commission International des Poids et Mesures“ (CIPM) zuständig.

Einführung

Die beginnende Industrialisierung Mitte des 18. Jahrhunderts forcierte die Entwicklung immer effizienterer Lichtquellen - von Kienspan und Wachskerzen über verschiedene Ausführungen von Öllampen bis hin zu Steinkohlegas-Lampen. So wurden Anfang des 19. Jahrhunderts erstmals Gaslaternen für die Straßenbeleuchtung und die Beleuchtung von Fabrikhallen eingesetzt. Gleichzeitig befasste man sich eingehender mit der Lichtmessung. Als genügend empfindlicher Empfänger stand lediglich das menschliche Auge zur Verfügung. Eine technische Vorrichtung für eine derartige Aufgabe brachte Bouguer (1698-1758) in Frankreich im November des Jahres 1725 erstmals zur Anwendung. Dieses erste „Photometer“, nutzte dieses Vergleichsprinzip und erlaubte es Licht einer Testlampe in Relation zum Licht einer Referenzlampe zu bewerten. Bouguer verwendete hierfür den direkten simultanen visuellen Vergleich des Helligkeitseindrucks. Das Hauptproblem dieser Messtechnik war, eine geeignete Referenzlampe zu entwickeln, die hinreichend stabil Licht erzeugte und reproduzierbar genug war, um als Standard und Repräsentant einer Lichteinheit - und zwar hier der Lichtstärke - zu dienen. Hier setzten die verschiedenen Staaten zunächst unterschiedliche Konzepte ein.

Historische Entwicklung

In Deutschland schlug 1884 Friedrich von Hefner-Alteneck (1845-1904) ein Flammennormal vor, welches alle anderen bis dahin bekannten an Zuverlässigkeit und Handhabbarkeit übertraf.



Abb. 1: Hefner-Lampe

Dieses - später als Hefner-Lampe bezeichnete Lichtnormal (Abb. 1) - wurde außer in Deutschland auch noch in Österreich und in den skandinavischen Ländern eingesetzt. Es wurde unter genau definierten Bedingungen betrieben, die wie folgt festgelegt waren:

"Als Lichteinheit dient die (in horizontaler Richtung ausgestrahlte) Lichtstärke einer in ruhig stehender, reiner atmosphärischer Luft frei brennenden Flamme, welche aus dem Querschnitt eines massiven mit Amylacetat gesättigten Dochtes aufsteigt, der ein kreisrundes Dochtröhrchen aus Neusilber von 8 mm inneren und 8,3 mm äußeren Durchmesser und 25 mm freistehender Länge vollkommen ausfüllt [und wird] bei einer Flammenhöhe von 40 mm vom Rande des Dochtröhrchens aus und wenigstens 10 Minuten nach dem Anzünden gemessen."

Maßgeblich beteiligt am Fortschritt der Lichtmesstechnik war die Physikalisch-Technische Reichsanstalt, die bereits 1888, ein Jahr nach ihrer Gründung, vom Deutschen Verein für Gas- und Wasserfachmänner gebeten wurde, bei der Berechnung des allgemein anerkannten Lichtmaßes mitzuwirken und ein international anerkanntes Lichthauptnormal herzustellen. Otto Lummer (1860-1925), Eugen Brodhun (1860-1938) und Emil Liebenthal (geb. 1859) nahmen sich dieser Aufgabe an. Während Lummer und Brodhun die Entwicklung wesentlich leistungsfähigerer visueller Photometer für die Bestimmung der Lichtstärke von Lampen vorantrieben, übernahm Liebenthal die Prüfung und Beglaubigung der Hefner-Lampe. Sie repräsentierte die Lichtstärkeeinheit, die allgemein Hefner-Kerze [HK] genannt wurde mit einer Unsicherheit von 1,5 % und hatte in Deutschland von 1896 bis 1941 Gültigkeit [1].

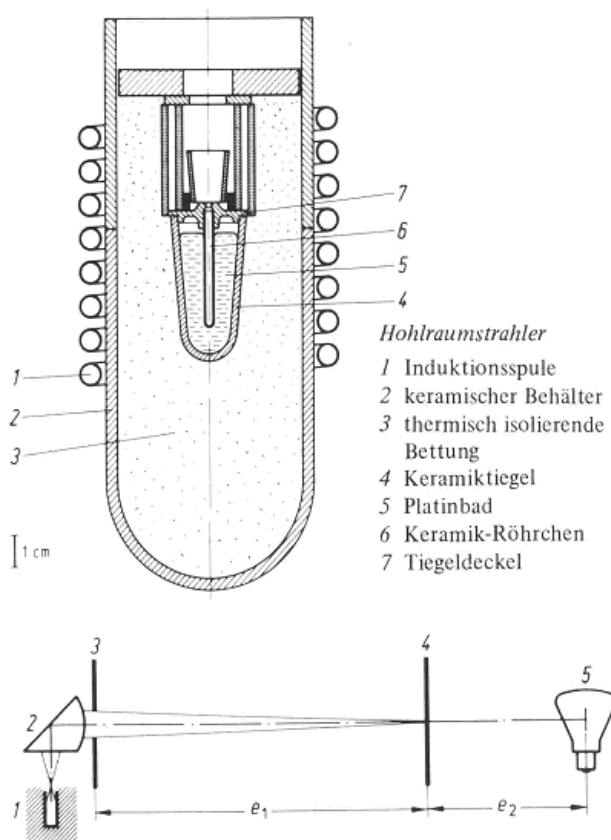
Ein anderer Weg wurde um 1909 nach Einführung der Kohlefadenlampe in den USA, England und Frankreich beschritten. Hier etablierte man über mehrere Sätze von Kohlefadenlampen, die untereinander verglichenen wurden, eine gemeinsame Einheit, die „Internationale Kerze“ [IK] die 1921 der Internationalen Beleuchtungskommission (CIE) zur allgemeinen Verwendung vorgeschlagen wurde [2].

Allerdings waren die Realisierungen der Einheiten nicht deckungsgleich, daher ist das Verhältnis IK/HK der beiden Einheiten von der Lichtfarbe abhängig. Auch deshalb wurde vom CIPM 1933 eine neue Definition der Lichtstärkeeinheit vorgeschlagen: ein Hohlraumstrahler bei der Temperatur des erstarrenden Platins. Nur in Deutschland wird 1941 trotz Krieg die verabredete, aber vom CGPM noch nicht verabschiedete Realisierung eingeführt

und „Neue Kerze“ genannt. Die 8. Tagung des CGPM beschließt 1948 die 1946 vom CIPM erneut empfohlene Definition aus 1933, die jetzt von allen Ländern angenommen wird. Sie legt den Namen „Candela“ und die Abkürzung „cd“ fest. Sie lässt aber weiterhin für die Einheit den Namen „Neue Kerze“ zu. Die 13. Tagung des CGPM zieht den bis dahin zugelassen Namen „Neue Kerze“ zurück und beschließt 1967 einen modifizierten Text für die 1948 gegebene Definition:

„1 Candela ist die Lichtstärke senkrecht zu $1 / 600\,000\text{ m}^2$ der Oberfläche eines Schwarzen Strahlers bei der Temperatur des beim Druck $101325\text{ m}^{-1}\text{kg s}^{-2}$ erstarrenden Platins.“

Bei der Einführung des „Internationalen Einheitensystems“ (SI) wurde 1960 diese Definition der SI-Basis-Einheit „Candela“ für die Lichtstärke beschlossen, und sie legt den Schwarzen Strahler im Bad des erstarrenden Platins als „Primärnormal“ für die Lichtstärke fest.



Meßanordnung

1 Hohlraumstrahler, 2 abbildendes Umlenkprisma, 3 Blende,
4 Photometer, 5 Normal-Lampe; $e_1 = 4,2\text{ m}$, $e_2 = 2\text{ m}$.

Abb. 2: Hohlraumstrahler u. Messanordnung

Die damals in der PTB verwendete Anordnung zeigt Abb. 2, die in [3] erläutert wird.

Ein unten geschlossenes Keramik-Röhrchen, das senkrecht in ein Platin-Bad eintaucht, bildet den als Schwarzen Strahler wirkenden Hohlraum. Die Heizung erfolgt durch Induktion.

Durch ein Prisma wird die Hohlraumöffnung auf das Photometer abgebildet (in Abb. 2 unten). Dieses kann auch von einer als Sekundärnormal dienenden Glühlampe beleuchtet werden, die auf dieser Weise an das Primärnormal angeschlossen wird.

Eine dicht an dem Prisma angebrachte Blende begrenzt die wirksame Strahlerfläche.

Der Aufwand zur Realisierung eines solchen Strahlers - auch bei der in [4] beschriebenen praktischen Anwendung - konnte nur von wenigen Nationalen Metrologie Instituten (NMI) geleistet werden. Schon bald war daher das Bestreben, mit anderen Verfahren zur Realisierung der Lichtstärke-Einheit zu gelangen, und nach intensiven Untersuchungen und langen Beratungen wurde schließlich die Definition der Candela geändert. Dabei gab es zwei wesentliche Ziele:

- (i) der Wert der Einheit selbst sollte nicht geändert werden und
 - (ii) die Realisierung sollte auf vielen unterschiedlichen Wegen ermöglicht werden.
- Dazu beschloss die Generalkonferenz beim CIPM 1979:

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

Bemerkenswert ist, dass in der Definition selbst keine spektrale Bewertung angegeben ist. Für die praktische Anwendung in der Photometrie ist aber eine Bewertungsfunktion unabdingbar. Deshalb wurden 1982 vom BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) die Funktionen der spektralen Hellempfindlichkeitsgrade des menschlichen Auges $V(\lambda)$ für photopisches Sehen bzw. $V'(\lambda)$ für skotopisches Sehen [5] - zusammen mit der Art ihrer Anwendung - erneut angegeben. Ausführlich werden diese Zusammenhänge z.B. in [6] diskutiert.

Anmerkung: Gelegentlich ist das Verhältnis der in der Vergangenheit verwendeten Lichtstärkeeinheiten von Interesse. Die Angabe ist etwas schwierig, da die definierten Quellen unterschiedliche Lichtfarben hatten und sich diese auf den Wert des Verhältnisses gerade bei Anwendung der visuellen Photometrie auswirken. Die Lichtfarbe von Temperaturstrahlern kann durch die Verteilungstemperatur T_v gekennzeichnet werden und für den Bereich $2000\text{K} \leq T_v \leq 2600\text{K}$ und die Definitionen „Internationale Kerze“ [IK], „Hefner Kerze“ [HK] und „Candela“ [cd] gelten die Verhältnisse [7]:

$$\frac{\text{IK}}{\text{HK}} = 1,11 \dots 1,17 \quad \text{und} \quad \frac{\text{cd}}{\text{HK}} = 1,107 \dots 1,166 \quad \text{und} \quad \frac{\text{cd}}{\text{IK}} = 0,981$$

Hellempfindlichkeitsgrad und weitere visuelle Bewertungsfunktionen



Abb. 3: Visuelles Photometer

Bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts wurde Licht ausschließlich durch visuelle Photometrie, also vergleichend zwischen Test- und Referenzlampe gemessen, mit dem Auge als Empfänger. Die Bewertung der Qualität des Lichts erfolgte auf diese Weise ganz automatisch mit dem einzig verfügbaren Empfänger, dem Auge und seiner spektralen Empfindlichkeit. Ein visuelles Photometer nach Lummer-Brodhun zeigt Abb. 3.

Seitdem stehen physikalische Empfänger zur Verfügung, mit denen optische Strahlung gemessen werden kann. Inzwischen wird in der Photometrie und der Lichtmesstechnik ausschließlich mit physikalischen Empfängern gemessen. Um deren Funktion der spektralen Empfindlichkeit an die des Auges anzupassen, wurde es wichtig, den Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$, d.h. die relative spektrale Empfindlichkeit des Auges, zu bestimmen. Erste Untersuchungen des Hellempfindlichkeitsgrades mit nur wenigen Probanden wurden 1924 von der CIE veröffentlicht und zeigten einen glockenförmigen Verlauf für Wellenlängen zwischen 360 nm und 830 nm mit einem Maximum bei 555 nm. Genauere Untersuchungen verdeutlichten schnell, dass wenigsten zwei Kriterien unterschieden werden müssen:

(i) die Größe des betrachteten Gesichtsfeldes und (ii) das Helligkeitsniveau.

Dies hat ganz wesentlich mit dem Aufbau des menschlichen Auges und dem Vorgang des Sehens zu tun. Außerdem konnte eine deutliche Streuung zwischen verschiedenen Probanden festgestellt werden wie z.B. auch zwischen jüngeren und älteren Menschen. Um dennoch wenigstens vergleichbare Hellempfindlichkeitsgrade angeben zu können, wurde zwischen sogenannte „Beobachter“ unterschieden: Der 2°-Beobachter für das Sehen bei kleinen Objekten „im Bereich des Fokus“ und der 10°-Beobachter für ausgedehnte Szenarien.

Wie schon erwähnt, wird außerdem das Sehen im photopischen Bereich $V(\lambda)$, also bei Tageslicht unterschieden vom Sehen bei sehr geringer Helligkeit im skotopischen Bereich $V'(\lambda)$. Der Bereich dazwischen heißt mesopisch, doch bisher ist international verbindlich noch kein Beobachter für diesen Bereich definiert worden.

Im photopischen Bereich der Helligkeiten können Farben erkannt werden die durch Empfindlichkeiten entsprechend den Normspektralwertfunktionen $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ - mit der Nebenbedingung $\bar{y}(\lambda) \equiv V(\lambda)$ - beschrieben werden. Im Gegensatz zur Farbe werden im skotopischen Bereich nur Grautöne gesehen aber mit einer etwa 2,5-fach größerer Empfindlichkeit.

Die Untersuchungen und Festlegungen von Bewertungsfunktionen fällt in den Verantwortungsbereich der CIE während alle Definitionen der Einheiten und die Verwendung der Bewertungsfunktionen vom CIPM verantwortet und dort in den „Principles Governing Photometry“ [8] vorgeschrieben werden. Die photopische Lichtstärke I_v („v“ für visuell) mit der Einheit cd für den 2°-Beobachter einer Lichtquelle mit der spektralen Verteilung der Strahlstärke $I_{e,\lambda}(\lambda)$ („e“ für energetisch) kann aus der Bewertung mit $V(\lambda)$ und dem Faktor $K_{\text{Def}} = 683 \text{ cd sr/W}$ aus der Definition der Candela für die Wellenlänge $\lambda_{\text{Def}} \cong 555,016 \text{ nm}$ berechnet werden.

$$I_v = K_m \cdot \int_0^\infty I_{e,\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad \text{mit} \quad K_m = \frac{K_{\text{Def}}}{V(\lambda_{\text{Def}})} \approx 683 \frac{\text{cd sr}}{\text{W}}$$

Ebenso kann die skotopische Lichtstärke I'_v mit derselben Einheit cd berechnet werden.

$$I'_v = K'_m \cdot \int_0^\infty I_{e,\lambda}(\lambda) \cdot V'(\lambda) \cdot d\lambda \quad \text{mit} \quad K'_m = \frac{K_{\text{Def}}}{V'(\lambda_{\text{Def}})} \approx 1700 \frac{\text{cd sr}}{\text{W}}$$

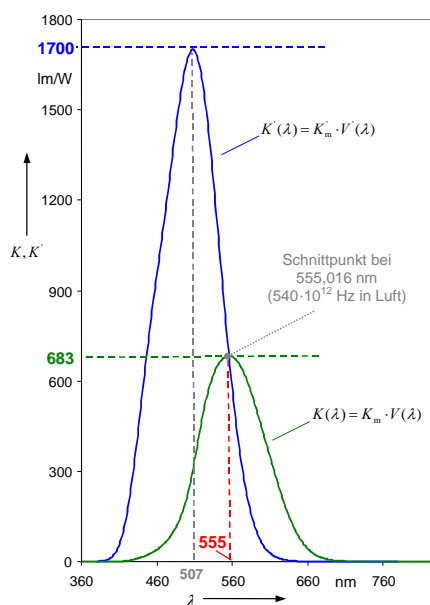


Abb. 5: Bewertungsfunktionen

Die so berechneten Bewertungen sind in Abb. 5 dargestellt.

Hier ist der Hinweis gegeben, dass die Einheit nicht zwischen den verschiedenen Bewertungen unterscheidet. Da aufgrund der unterschiedlichen Wertebereiche eine eindeutige Zuordnung der Lichtstärke für skotopische und photopische Beleuchtungssituationen gegeben ist, erübrigt sich auch eine besondere Kennzeichnung der Lichtstärke. Darum sind Formulierungen wie „skotopische Candela“ definitiv falsch, es ist allenfalls erlaubt von einer skotopischen Lichtstärke mit der Einheit Candela zu berichten um die im Allgemeinen unübliche Verwendung der Bewertungsfunktion $V'(\lambda)$ zu unterstreichen.

Realisierung und Darstellung der SI-Basiseinheit Candela heute

Die Candela-Definition war gerade so erfolgt, dass die Lichtstärke-Einheit für Tagessehen nicht verändert wurde. Deshalb kann praktisch mit dem Schwarzen Strahler im Bad des erstarrenden Platins auch mit der neuen Definition der Candela die zugehörige Lichtstärke realisiert werden. Jetzt können aber auch Hohlraumstrahler mit beliebiger Temperatur verwendet werden oder sogar Strahler, deren spektrale Strahlstärke z.B. rückgeführt auf radiometrische Normale gemessen wurden. In der PTB wird ein Weg verfolgt, der recht kompliziert erscheint aber die Beiträge zur Messunsicherheit nach dem derzeitigen Stand der Technik minimiert. Abb. 6 zeigt die Kalibrierkette zur Realisierung der Candela und weiterer abgeleiteter photometrischer Einheiten.

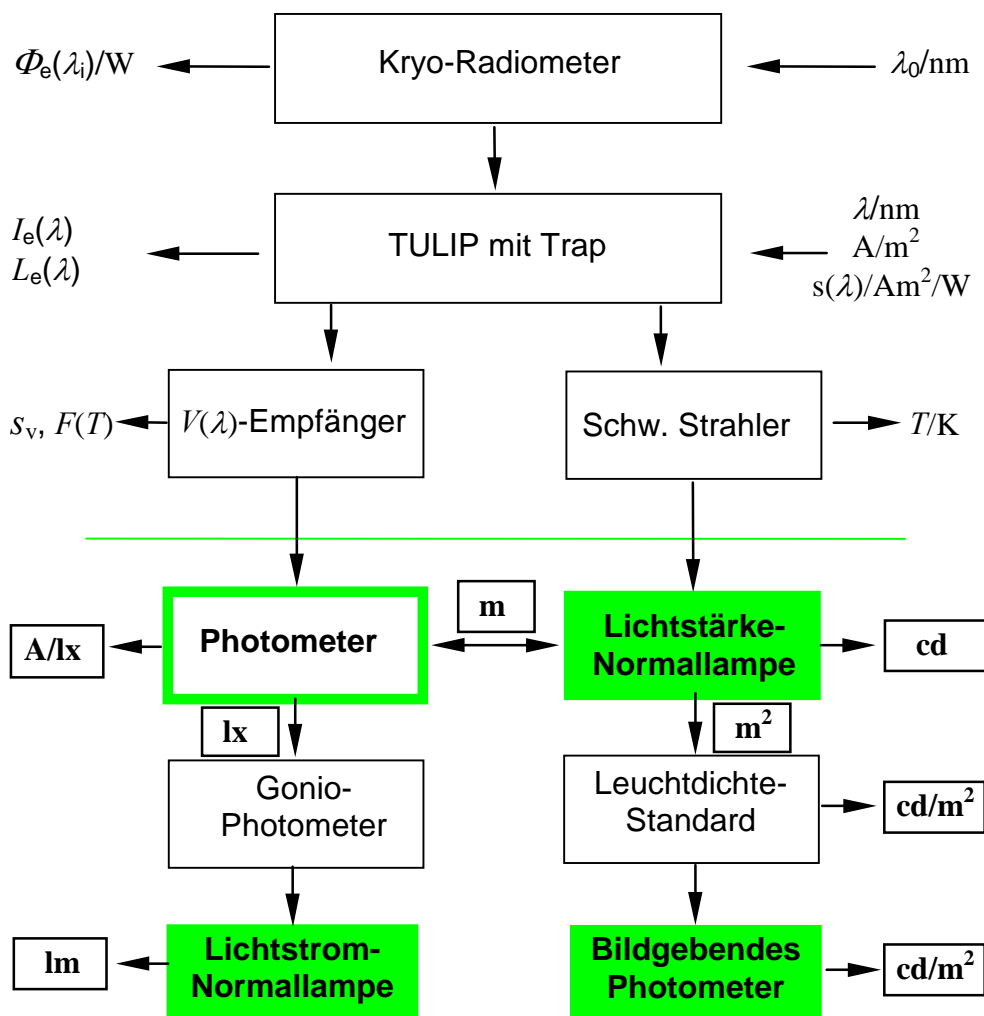


Abb. 6: Kalibrierkette zur Realisierung der Candela und weiterer abgeleiteter photometrischer Einheiten.

Eine Anordnung mit Lasern, die in ausgesuchten Wellenlängenbereichen bei genau bestimmbar Wellenlängen sehr konstante Strahlung emittiert, bestrahlt wechselweise einen sogenannten Trap-Detektor und ein Kryoradiometer. Das Kryoradiometer kann die optische Strahlungsleistung eines Lasers direkt mit einer elektrischen Leistung vergleichen. Ein Vergleich der über das Kryoradiometer bestimmten elektrischen Leistung mit dem gemessenen Photostrom des Trap-Detektors ergibt die Empfindlichkeit des Trap-

Detektors für die Wellenlänge des Laser. Dieser Vorgang, wiederholt für Laserstrahlung zu hinreichend vielen Wellenlängen, ergibt schließlich mit Hilfe eines physikalischen Modells die Funktion der spektralen Empfindlichkeit des Trap-Detektors. Über einen weiteren Vergleich mit diesem nun als TransfERNormal dienenden radiometrischen Empfänger wird im nächsten Schritt im homogenen Strahlungsfeld - von z. B. durchstimmbaren Lasern - die spektrale Empfindlichkeit $s(\lambda)$ von photometrischen Empfängern bestimmt. Die Empfindlichkeitsfunktion solcher Photometer ist durch geeignete Glasfilter sehr gut an $V(\lambda)$ angepasst. Aus der mit diesen Photometern gemessenen Beleuchtungsstärke, die eine spezielle Normallampe auf die Lichteintrittsfenster eines photometrischen Empfängers erzeugt, wird dann für geeignete Geometrien die Lichtstärke für genau festgelegte Betriebsbedingungen bestimmt und weitergegeben - und zwar mit kleinstmöglicher Messunsicherheit der Werte.

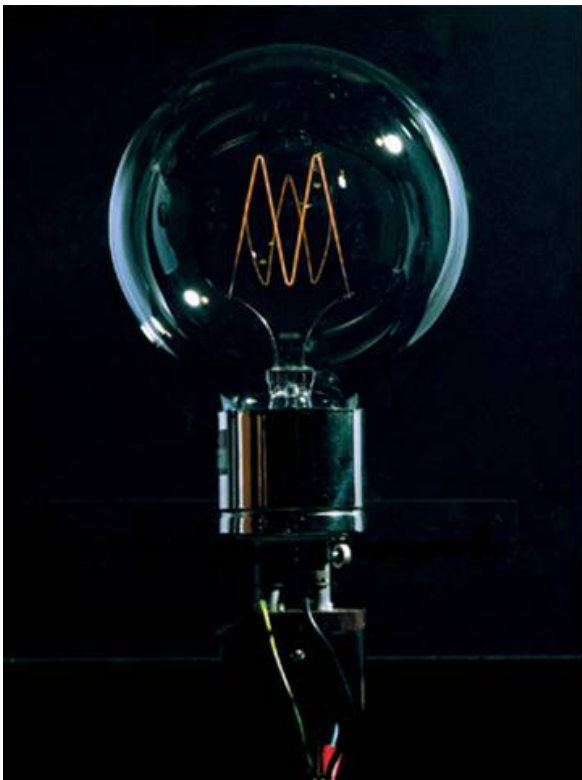


Abb. 7: Toshiba-Lampe

In der PTB wird eine in dieser Weise über ein Netzwerk von Photometern realisierte Lichtstärke-Einheit einmal im Jahr verglichen mit der über ein Netzwerk von vielen - zur Zeit 22 Stück - Normallampen bewahrten Einheit, um die Güte und die Vertrauenswürdigkeit sowohl der Realisierung als auch der Bewahrung zu prüfen. Detaillierte Vorgehensweisen und Hintergründe werden in [9] vorgestellt und diskutiert. Die Daten der realisierten und bewahrten Einheit sind über mehrere Jahrzehnte rückverfolgbar und stellen auch die Basis der Einträge zur Photometrie in den sogenannten CMC-Listen (Calibration and Measurement Capabilities) des BIPM dar. Abb. 7 zeigt eine Spezialglühlampe vom Typ Toshiba (5 A, 10 V, 15 cd), die in der PTB zur Realisierung und Bewahrung der SI-Basiseinheit der Lichtstärke, Candela, verwendet wird.

Zusammenfassung

Die besondere gesellschaftliche und wirtschaftliche Bedeutung der Lichtmessung wird durch die eigene SI-Basiseinheit, die Candela, unterstrichen. Der Wert der Einheit ist seit über 50 Jahren unverändert. Zunächst wurde die Einheit als Primärnormal verkörpert und seit 1979 in der *neuen* Definition wird sie nun über die abgeleitete Einheit „Watt“ dargestellt.

Die neue Definition der Candela ersetzt das Primärnormal der alten Definition durch die Festlegung des Wertes einer Konstanten, des Strahlungsäquivalentes. Sie berücksichtigt in besonderer Weise die Entwicklung in der Metrologie und eröffnet mehrere Wege zur Realisierung, sowohl traditionelle als auch die modernen Möglichkeiten der physikalischen Photometrie mit linear arbeitenden Photometern, deren relative spektrale Empfindlichkeiten sehr gut an den spektralen Hellempfindlichkeitsgrad angepasst sind. Sie engt auch zukünftige Entwicklungen nicht ein.

Literatur

- [1] Korte, H.: Die Einheit Lichtstärke, Zeitschrift für Instrumentenkunde, S. 139, 1962, 70.
- [2] Photometric Standards and the Unit of Light, Notes on Applied Science, National Physical Laboratory, 1961, Bd. No. 24.
- [3] Bauer, G.: Die Candela. Die SI Basiseinheiten, Definition, Entwicklung, Realisierung. Heft1, 1975, Bd. PTB Mitteilungen, 85.
- [4] Korte, H.: Physikalische und meßtechnische Fragen bei der Darstellung und Aufrechterhaltung der Candela und des Lumens, Tagungsbericht des II. Internationalen Kolloquiums der Hochschule für Elektrotechnik Ilmenau, 1958
- [5] Procès-verbaux des séances, Comité International des Poids et Mesures, 20, Paris, Gauthier–Villars, 1946, 119
- [6] Bureau International des Poids et Mesures, 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
- [7] Reeb, Otto: Grundlagen der Photometrie, Verlag G. Braun, 1962.
- [8] Bureau International des Poids et Mesures, Principles Governing Photometry, 1983.
- [9] Erb, W., Sauter, G.: PTB network for realization and maintenance of the candela. In: Metrologia 34, (1997) 115 - 124

Ergänzende Literatur

- Hefner, Alteneck; Elektrotechnische Zeitschrift, 5 , 1884, S. 20
- Lux, H.: Das moderne Beleuchtungswesen, Verlage B.G. Teubner, 1914.
- CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), Comp. Rend., session 6, 67, 1924
- Burgess, G; Comité Consultatif d'Électricité, 2nd session, 1930 Procès-verbaux des séances, Comité International des Poids et Mesures, 14, Paris, Gauthier-Villars, 1931, 249
- Procès-verbaux des séances, Comité International des Poids et Mesures, 15, Paris, Gauthier–Villars, 1933, 202 + 65
- Procès-verbaux des séances, Comité International des Poids et Mesures, 18, Paris, Gauthier–Villars, 1937, 236
- CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), Comp. Rend., session 12, 3, 32, 1951
- Walsh, John W. T. Photometry. London : Constable and Company Ltd., 1958
- CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), Colorimetry; CIE Pub No. 15, 1971, Bureau Central de la CIE 4 Av. Du Recteur Poincaré, 75 Paris 16^e
- Procès Verbaux CIPM, 40, 1972, Annex 1
- Blevin, W. R., Steiner, B.: Redefinition of the Candela and the Lumen. In: Metrologia 11, 1975, 97 – 104
- Bureau International des Poids et Mesures, (Hrsg): Comptes Rendus des Séances de la 16^e Conférence Générale des Poids et Mesures: BIPM, Pavillon den Breteuil F-92310 Sèvres, 1979
- Bureau International des Poids et Mesures, (Hrsg): CCPR, 10^e Session: Bureau International des Poids et Mesures, Pavillon den Breteuil F-92310 Sèvres, 1982

H. Rechenberg, W.Hauser, Hrsg. J. Bortfeldt: Forschen - Messen - Prüfen, 100 Jahre Physikalisch-Technische Reichsanstalt/Bundesanstalt 1887-1987. s.l. : Physik Verlag, 1987

CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), Internationales Wörterbuch der Lichttechnik; CIE Publ. No. 17.4, 1987

Quantities and units; ISO Standards Handbook, Third edition 1993

Sauter, G.: Die Candela: Erläuterungen zum Verständnis der Definition und der Realisierung; PTB-Mitteilungen 107, 1997

CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), CIE191:2010 Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance. Vienna : CIE, 2010