

Rückführung in der Photometrie – die Realisierung und Rückführung der Candela

Detlef Lindner*, Stefan Winter**

* Detlef Lindner, Arbeitsgruppe „Photometrie“, E-Mail: detlef.lindner@ptb.de

** Dr. Stefan Winter, Arbeitsgruppe „Solarzellen“, E-Mail: stefan.winter@ptb.de

Aufgrund der herausragenden Bedeutung des Lichts und des Sehens für die Interaktion des Menschen mit seiner Umwelt wurde die Candela als Einheit der Lichtstärke in den Rang einer SI-Basiseinheit gehoben. Die Mehrzahl der Basiseinheiten sind über physikalische Zusammenhänge miteinander verknüpft und müssen entsprechend Ihrer Definition realisiert und in den meisten Fällen auf andere Einheiten rückgeführt werden. In diesem Artikel wird die „metrologische Herkunft“ der Candela im Stammbaum der Einheiten beschrieben.

Definition der Candela

Im internationalen Einheitensystem (Système International d'Unités, abgekürzt SI) ist die Candela wie folgt definiert:

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

Hierbei handelt es sich um die exakte physikalische Definition für die Lichtstärke. Nun besteht Licht jedoch praktisch nie nur aus Strahlung dieser Wellenlänge, weshalb die Definition um eine praktische Realisierung ergänzt ist. Denn es ist das Ziel der Photometrie, Licht so zu messen, dass die Messergebnisse weitestgehend mit der visuellen Wahrnehmung eines menschlichen Beobachters korreliert sind. Hierfür wurden zwei spezielle Funktionen $V(\lambda)$ und $V'(\lambda)$ [1] eingeführt, die die relative spektrale Empfindlichkeit eines durchschnittlichen menschlichen Auges für photopisches (hell-adaptiertes) und skotopisches (dunkel-adaptiertes) Sehen beschreiben. Die wichtigere der beiden Funktionen, die $V(\lambda)$ Funktion für hell-adaptiertes Sehen, ist bei der Wellenlänge auf eins normiert, bei der das Auge die höchste Empfindlichkeit besitzt (555 nm). Mit dieser Definition lassen sich photometrische Größen durch Bewertung der entsprechenden spektroradiometrischen Größen mit $V(\lambda)$ und Multiplikation mit dem Maximalwert des Strahlungsäquivalents $K_m = 683$ lm/W berechnen.

Die Lichtstärke I_v ist durch das photometrische Grundgesetz mit der Beleuchtungsstärke E_v verknüpft:

$$I_v = \frac{E_v \cdot d^2}{\Omega_0} \quad \Omega_0 = 1 \text{ sr} \quad (1)$$

wobei d den Abstand zur Lichtquelle und Ω_0 einen Raumwinkel von 1 sr bezeichnet.

Zur praktischen Bestimmung der Beleuchtungsstärke verwendet man ein Photometer, welches eine spektrale Bestrahlungsstärke-Empfindlichkeit $s(\lambda)$ besitzt, deren relativer Verlauf idealerweise der $V(\lambda)$ -Funktion entspricht und dessen Signal y proportional zu der Beleuchtungsstärke ist. Bei dem Proportionalitätsfaktor handelt es sich um die photometrische Empfindlichkeit s_v des Photometers für die gemessene Lichtquelle.

$$y = s_v \cdot E_v \quad (2)$$

Drückt man nun die Beleuchtungsstärke E_v durch spektroradiometrische Größen aus, so ergibt sich E_v aus der spektralen Bestrahlungsstärke $E_\lambda(\lambda)$:

$$E_v = K_m \cdot \int_0^\infty E_\lambda(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (3)$$

Aus der spektralen Bestrahlungsstärke $E_\lambda(\lambda)$ und der spektralen Bestrahlungsstärke-Empfindlichkeit des Photometers $s(\lambda)$ ergibt sich das Signal y des Photometers:

$$y = \int_0^\infty E_\lambda(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda \quad (4)$$

Fügt man die Formeln (2) bis (4) in (1) ein, so ergibt sich für die Lichtstärke:

$$I_v = y \cdot \frac{d^2}{\Omega_0} \cdot \frac{K_m \cdot \int_0^\infty E_\lambda(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^\infty E_\lambda(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (5)$$

Aus dieser Formel lässt sich ablesen, welche Größen für die Rückführung der Lichtstärke bestimmt werden müssen. Für die Rückführung

der Candela wird das Signal y eines Photometers bestimmt, welches sich in einem Abstand d von einer Lichtquelle entfernt befindet. Von dem Photometer muss die absolute spektrale Empfindlichkeit $s(\lambda)$ bekannt sein und von der Lichtquelle die spektrale Bestrahlungsstärke $E_\lambda(\lambda)$.

In den nächsten drei Abschnitten wird das eigentliche Experiment zur Realisierung der Candela beschrieben, dann das Verfahren zur Kalibrierung von Photometern und als letztes die Rückführung der spektralen Bestrahlungsstärke. Damit sind alle Größen zur Bestimmung der Candela bekannt. Im letzten Abschnitt wird dann über die abgeleiteten Größen Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte berichtet.

Realisierung der Candela

Die Lichtstärke I_v lässt sich durch Verwendung der Gleichungen (1) und (3) in die folgende Form bringen:

$$I_v = K_m \cdot \frac{d^2}{\Omega_0} \cdot \int_0^\infty E_\lambda(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (6)$$

Die spektrale Empfindlichkeit $s(\lambda)$ eines Photometers lässt sich als Produkt aus einer absoluten Empfindlichkeit $s(\lambda_0)$ und einer relativen Empfindlichkeit $s_r(\lambda)$ darstellen:

$$s(\lambda) = s(\lambda_0) \cdot s_r(\lambda) \quad \text{mit} \quad s_r(\lambda_0) = 1 \quad (7)$$

Damit ergibt sich für das Ausgangssignal y dieses Photometers gemäß Gleichung (4):

$$y = s(\lambda_0) \cdot \int_0^\infty E_\lambda(\lambda) \cdot s_r(\lambda) \cdot d\lambda \quad (8)$$

Ebenso lässt sich die spektrale Bestrahlungsstärke einer Lichtquelle als Produkt aus einer absoluten und relativen Bestrahlungsstärke schreiben:

$$E_\lambda(\lambda) = E_\lambda(\lambda_0) \cdot E_r(\lambda) \quad \text{mit} \quad E_r(\lambda_0) = 1 \quad (9)$$

In der PTB werden zur Realisierung der Candela Glühlampen verwendet, deren relative spektrale Bestrahlungsstärke $E_r(\lambda_0)$ durch eine Strahlungsfunktion $S(\lambda, T)$ ersetzt wird, der eine Verteilungstemperatur T zugeordnet werden kann [2]. Befindet sich die Lampe außerhalb der photometrischen Grenzentfernung im Abstand d zum Photometerkopf und beleuchtet dessen Lichteintrittsfläche senkrecht, so ergibt sich aus Gleichung (5) ihre Lichtstärke $I_v(T)$:

$$I_v(T) = y \cdot \frac{d^2}{\Omega_0} \cdot \frac{K_m}{s(\lambda_0)} \cdot \frac{\int_0^\infty S(\lambda, T) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^\infty S(\lambda, T) \cdot s_r(\lambda) \cdot d\lambda} = y \cdot \frac{d^2}{\Omega_0} \cdot \frac{K_m}{s(\lambda_0)} F(T) \quad (10)$$

Die Anpassungskorrektur $F(T)$ ist eine Funktion der Verteilungstemperatur T , die den Photostrom so korrigiert, als wäre mit einem ideal an $V(\lambda)$ -angepassten Photometerkopf gemessen worden [3]. In der Praxis ist die Anpassungskorrektur meist eine monotone Funktion der Verteilungstemperatur und kann z. B. durch ein logarithmisches Polynom ersten Grades hinreichend gut angenähert werden:

$$F(T) = \frac{\int_0^\infty S(\lambda, T) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^\infty S(\lambda, T) \cdot s_r(\lambda) \cdot d\lambda} \cong a \cdot \left[\frac{T}{2856 \text{ K}} \right]^m \quad (11)$$

Der Koeffizient a gibt den Wert der Anpassungskorrektur für Normlichtart A (bei $T = 2856 \text{ K}$) an, da hier die Klammer den Wert eins hat. Den Verlauf der Funktion mit der Verteilungstemperatur beschreibt die Klammer mit dem Anpassungsindex m als Exponenten, der somit eine charakteristische Größe eines Photometerkopfes ist. Eine weitere Charakterisierung ist seine photometrische Empfindlichkeit s_v :

$$\frac{1}{s_v} = \frac{K_m \cdot a}{s(\lambda_0)} \quad (12)$$

Aus den Gleichungen (10) bis (12) folgt die in der Arbeitsgruppe „Photometrie“ der PTB für die Realisierung der Lichtstärke-Einheit grundlegende Beziehung:

$$I_v(T) = \frac{d^2}{\Omega_0} \cdot \frac{y(T)}{s_v} \cdot \left[\frac{T}{2856 \text{ K}} \right]^m \quad (13)$$

Demnach müssen neben dem Photostrom $y(T)$ folgende Größen bekannt sein:

- die photometrische Empfindlichkeit s_v des Photometerkopfes;
- der Anpassungsindex m zur Korrektur der spektralen Fehlanpassung;
- der Wert der Verteilungstemperatur T der verwendeten Lichtquelle;
- der Abstand d zwischen Lichtquelle und Photometerkopf.

Die Einheit der Lichtstärke wird an der PTB



Bild 1: Kameragestützte mechanische Ausrichtung einer Lichtstärke-Normallampe an der Photometerbank. Quelle: PTB.

repräsentiert und bewahrt durch eine Gruppe von 17 hochstabilen Glühlampen (Typ Toshiba, 5 A, 10 V, 15 cd), deren Strahlungsfunktionen der eines Hohlraumstrahlers von 2042 K sehr ähnlich sind. Die Gesamtmessunsicherheit einer Realisierung der Lichtstärke-Einheit in der PTB beim Vertrauensniveau $k = 2$ berechnet sich so zu 0,4 %.

Glühlampen altern praktisch nur während ihrer Brennzeit, demgegenüber können Photometer ihre Eigenschaften unabhängig vom Gebrauch verändern, Bild 2 verdeutlicht diesen Sachverhalt. Deshalb sollten photometrische Einheiten mit Normallampen verkörpert und bewahrt werden,

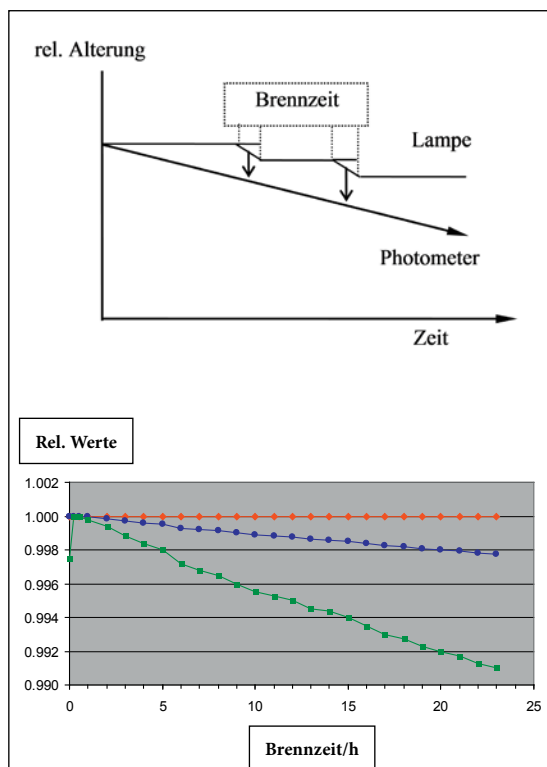


Bild 2: Alterungsverhalten von Lampen und Photometern. Links: schematisch, rechts: reales Alterungsverhalten einer Lampe im Betrieb: rot: Strom, blau: Spannung, grün: Lichtstärke

sie dienen zum Kalibrieren von Photometern. Kalibrierte Photometer sollten dagegen vorzugsweise als Transferrnormale verwendet werden.

Weitergabe der Lichtstärke-Einheit

Als Lichtstärkenormale werden speziell gefertigte Glühlampen mit besonderen optischen, geometrischen und elektrischen Eigenschaften verwendet; z. B. die Lampe Typ OSRAM WI41/G. Bild 3 zeigt schematisch eine solche Lampe, die zur Reduzierung der mechanischen Justierunsicherheit mit einem Spezialsockel der PTB ausgestattet wurde. Zur Weitergabe der Lichtstärke-Einheit werden Gruppen solcher Lampen als Lichtstärkenormale verwendet, wobei auf Verteilungstemperaturen zwischen 2000 K und 2856 K eingestellt werden kann, siehe Bild 3 unten.

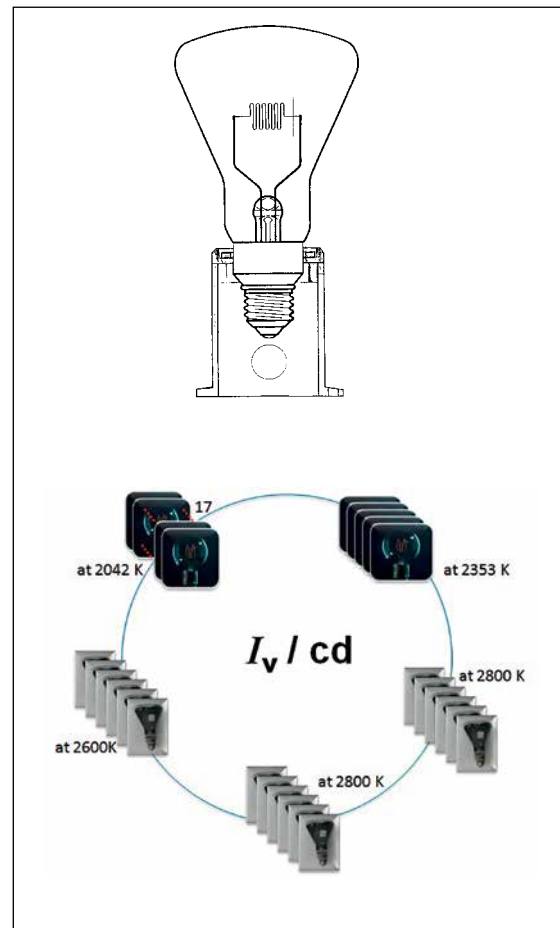


Bild 3: Lichtstärke-Normallampe WI41/G mit PTB-Spezialsockel (oben) sowie verschiedene Lichtstärke-Normallampengruppen zur Bewahrung und Weitergabe der Lichtstärke-Einheit (unten)

In der PTB erfolgt die Bestimmung der Lichtstärke $I_v(T)$ einer Lampe durch den Vergleich mit der Lichtstärke $I_v(T_R)$ eines nationalen Normals mit einer Verteilungstemperatur T_R und mithilfe eines an $V(\lambda)$ -angepassten Photometers mit den zugehörigen Photoströmen $y(T)$ und $y(T_R)$:

$$I_v(T) = I_v(T_R) \cdot \frac{y(T)}{y(T_R)} \cdot \left[\frac{T}{T_R} \right]^m \quad (14)$$

Lichtstärke-Normallampen

Die von der PTB in Kalibrierscheinen angegebenen Werte für die photometrischen Größen beziehen sich immer auf einen definierten Betriebszustand der Lampe. Ihr momentaner Betriebszustand wird dagegen wesentlich bestimmt durch

- die Zeitspanne seit dem Einschalten;
- die Betriebszustände bei früheren Brennvorgängen und deren Dauer;
- die Eigenschaften der verwendeten Messapparatur.

Zur Weitergabe der Lichtstärke-Einheit werden zumeist Lampen des Typs WI41/G verwendet. Einige charakteristische Eigenschaften dieses Lampentyps werden nachfolgend angegeben.

- Kurzzeitstabilität: $|\Delta I_v / I_v| \leq 2 \cdot 10^{-4}$

- mechanische Justierunsicherheit:

für Lampe mit E27-Sockel $|\Delta I_v / I_v| \leq 2 \cdot 10^{-3}$

für Lampe mit Spezialsockel $|\Delta I_v / I_v| \leq 4 \cdot 10^{-4}$

- photometrisches Signal: Alterung je Brennstunde bzw. Rauschen (siehe folgendes Bild 4)

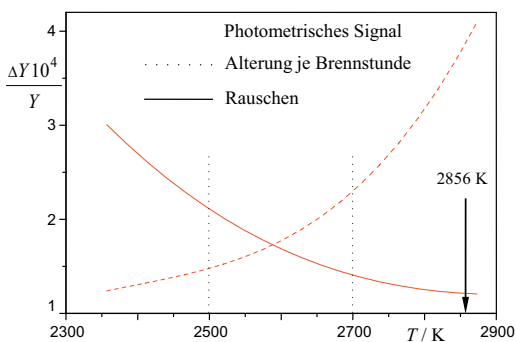


Bild 4: Alterung je Brennstunde bzw. Rauschen des photometrischen Signals

- Richtungsabhängigkeit der Lichtstärke bei Drehung um die vertikale und horizontale Achse in der Leuchtkörperebene: Abhängigkeit überwiegend bei Drehung um die horizontale Achse; für beide Winkel sollte der Justierfehler 1° nicht übersteigen.

Bei der Weitergabe der Einheiten der gerichteten Photometrie macht man sich das Monitorverfahren zunutze. D. h., der aktuelle photometrische Betriebszustand von Lichtstärke- und Leuchtdichtenormalen wird durch geeignete Monitortechniken kontrolliert. Dafür werden speziell konstruierte Monitorphotometer eingesetzt (siehe folgendes Bild 5).

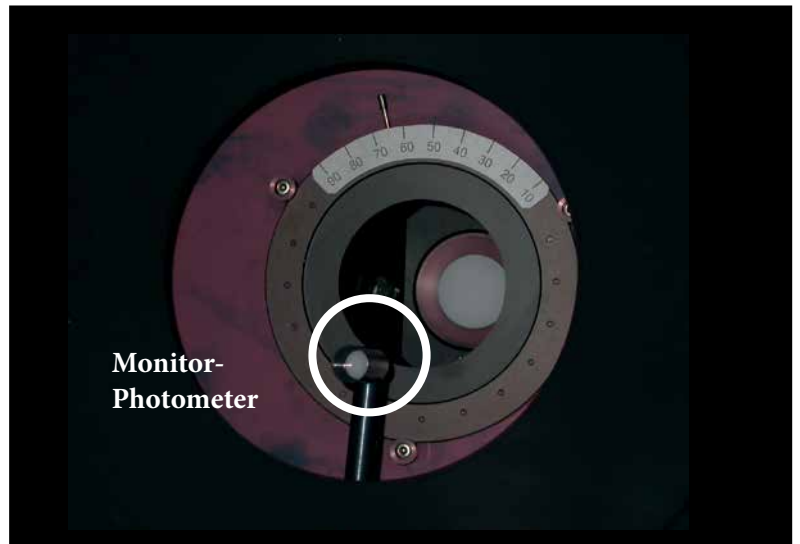


Bild 5: Monitor-Photometer zur Überwachung bzw. Korrektur der Stabilität bei Messungen in der gerichteten Photometrie

Die Signale der Monitorphotometer werden synchron mit den Referenz- bzw. Testphotometern ausgelesen und dokumentieren so die „Einbrennphase“ bzw. die Stabilität des photometrischen Signals während der Messabläufe und dienen gegebenenfalls zur Korrektur.

Kalibrierung von Photometern

Bei der Kalibrierung von Photometern wird deren absolute spektrale Bestrahlungsstärke-Empfindlichkeit vom UV bis ins nahe Infrarot bestimmt. Dabei wird das Photometer im quasi monochromatischen, homogenen Strahlungsfeld bekannter Bestrahlungsstärke vollständig überstrahlt und die sich dabei ergebende Stromstärke gemessen. Der Quotient aus Stromstärke und Bestrahlungsstärke bei der eingestellten Wellenlänge ergibt die spektrale Bestrahlungsstärke-Empfindlichkeit $s(\lambda)$. Diese Messung wird alle 5 nm von 360 nm bis mindestens 830 nm durchgeführt und ergibt dann einen Kurvenverlauf, der bei guten Photometern der oben beschriebenen $V(\lambda)$ -Funktion sehr nahe kommt.

Aus der experimentell bestimmten spektralen Bestrahlungsstärke-Empfindlichkeit $s(\lambda)$ lässt sich nun mithilfe tabellarisch definierter Größen (Normlichtart A $S(\lambda, 2856 \text{ K})$, $V(\lambda)$ -Funktion und dem Maximalwert des Strahlungsäquivalents K_m) die in Formel (2) eingeführte photometrische Empfindlichkeit s_v des Photometers zusammen mit Formeln (3) und (4) berechnen:

$$s_v = \frac{\int_0^\infty S(\lambda, 2856 \text{ K}) \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda}{K_m \int_0^\infty S(\lambda, 2856 \text{ K}) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (15)$$

Ebenso lässt sich nun nach Formel (11) die Anpassungskorrektur $F(T)$ direkt berechnen.

Experimentell wird die spektrale Bestrahlungsstärke traditionell mit einem Monochromatormessplatz wie dem DSR-Messplatz ermittelt. Dieser sondert aus einem Xenonlampenspektrum oder einem Glühlampenspektrum einen schmalen Wellenlängenbereich aus, der dann für die Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit bei seiner Schwerpunktwellenlänge benutzt wird. Besonders wichtig ist dabei, dass der genaue Wert der Schwerpunktwellenlänge bekannt ist, und dass die ausgesonderte Strahlung ein sehr homogenes Strahlungsfeld erzeugt. Entscheidend dafür ist der geschickte und wellenlängenabhängige Aufbau der Eingangs- und Ausgangsoptik mit mehreren Linsen.

Lampenbasierte Monochromatormessplätze haben jedoch einen entscheidenden Nachteil: Ihre maximale Leistung beträgt typisch nur 100 μW . Deshalb müssen mehrere Kompromisse bei der Messung eingegangen werden: Die Messung muss verhältnismäßig dicht hinter dem Messplatz durchgeführt werden, wo sich die Bestrahlungsstärke noch stark mit dem Abstand ändert und inhomogener als im Fernfeld ist. Je spektral reiner die Strahlung eingestellt wird, umso weniger Strahlungsleistung passiert den Monochromator, sodass auch hier wieder ein Kompromiss eingegangen werden muss. Trotz der Kompromisse ist der Wellenlängenbereich, in dem die spektrale Empfindlichkeit bestimmt werden kann, oft auf 400 nm bis 750 nm beschränkt, also auf den Bereich, bei dem die spektrale Empfindlichkeit noch ausreichend hoch ist.

Deshalb wurde ein neuer laserbasierter Messplatz aufgebaut (s. Bild 6). Dieser erzeugt ein 100- bis 10.000-mal kräftigeres Strahlungsfeld (s. Bild 7). Zudem erlaubt der Messplatz die Bestimmung der Winkelabhängigkeit von Photometern sowie die Messung des spektralen Temperaturkoeffizienten von $-70\text{ }^\circ\text{C}$ bis $180\text{ }^\circ\text{C}$. Es können mit dem laserbasierten Messplatz selbst unempfindliche Photometer in einem deutlich größeren Wellenlängenbereich als bislang gemessen werden (s. Bild 8–9). Da so viel Strahlungsleistung selbst für einen erweiterten Wellenlängenbereich nicht benötigt wird, kann mit einem laserbasierten Messplatz im homogenen Fernfeld und mit höherer spektraler Reinheit gemessen werden und somit die Messunsicherheit signifikant reduziert werden.

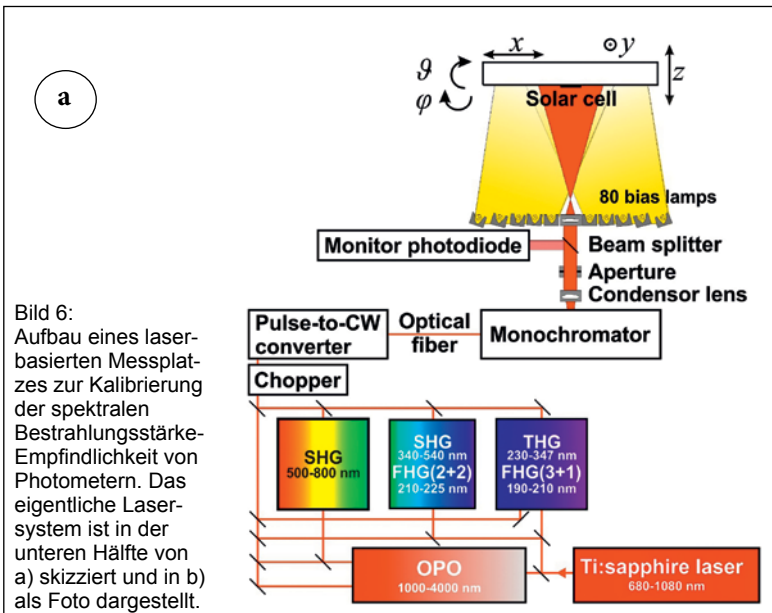
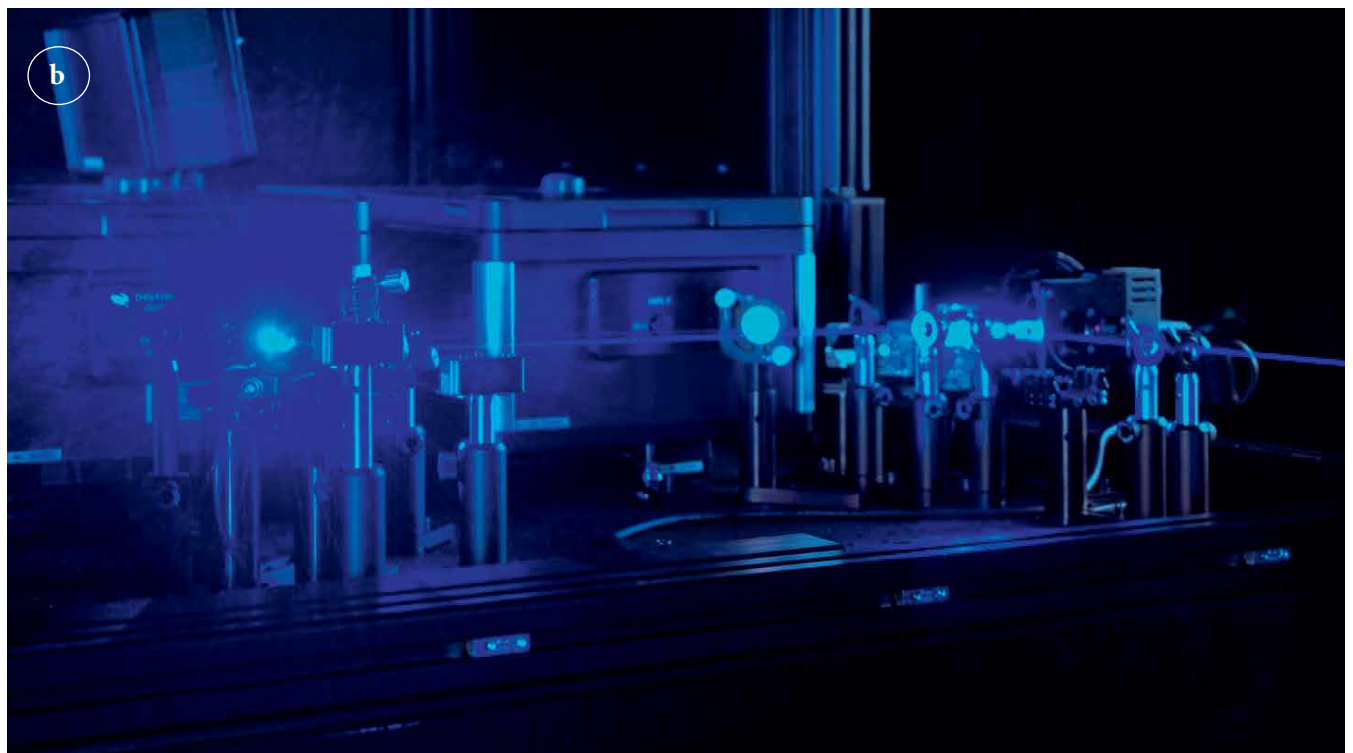


Bild 6: Aufbau eines laserbasierten Messplatzes zur Kalibrierung der spektralen Bestrahlungsstärke-Empfindlichkeit von Photometern. Das eigentliche Lasersystem ist in der unteren Hälfte von a) skizziert und in b) als Foto dargestellt.



Realisierung der spektralen Bestrahlungsstärke

Wie bereits vorher erwähnt, ist zur Realisierung der Candela die Kenntnis der relativen spektralen Bestrahlungsstärke $E_e(\lambda) = S(\lambda, T)$ von Temperaturstrahlern (Glühlampen) der Verteilungstemperatur T erforderlich.

Bereits zum Ende des neunzehnten Jahrhunderts beschäftigten sich an der Physikalisch-Technischen-Reichsanstalt (PTR) in Berlin, die Wissenschaftler Otto Lummer, Ernst Pringsheim und Ferdinand Kurlbaum unter der Leitung von Wilhelm Wien mit der Prüfung elektrischer Glühlampen für die Industrie und in diesem Zusammenhang mit der Verbesserung von Lampen und Vergleichsnormalen für Wärmestrahlung [4].

Sie entwickelten basierend auf Ideen von Kirchhoff ab 1895 die ersten Hohlraumstrahler, die als sogenannter Schwarzer Strahler zur Erzeugung von Temperaturstrahlung bis zu etwa 2000 K eingesetzt werden konnten. Aufbauend auf Vorarbeiten von Kirchhoff (1859), Stefan und Boltzmann (1879/84), sowie auf eigene Berechnungen (1893) konnte Wilhelm Wien anhand erster Messergebnisse 1896 die heute nach ihm benannte Wiensche Strahlungsgleichung aufstellen, die die Ergebnisse der Experimente gut traf, allerdings systematische Abweichungen für große Produkte von $\lambda \cdot T$ ergab. Die Wiensche Gleichung war jedoch wesentlich genauer als das von Rayleigh und Jeans aufgestellte Pendant mit seiner inhärenten Ultraviolett katastrophe.

Am 19. Oktober 1900 konnte Max Planck, der vom Gastwissenschaftler Heinrich Rubens über die Messergebnisse in der PTR unterrichtet wurde, in einer Sitzung der Physikalischen Gesellschaft eine Gleichung vorlegen, die die Messungen seiner Kollegen in der PTR besser als alle bis dato bekannten Gleichungen wiedergab. Bereits am 14. Dezember 1900 trug er die komplette Herleitung der Planckschen Strahlungsgleichung wiederum der Berliner Physikalischen Gesellschaft vor und leitete damit (verbunden mit der Energiequantelung) die Quantenphysik ein [5].

Mithilfe des Planckschen Strahlungsgesetzes lässt sich die spektrale Dichte der Bestrahlungsstärke $E_{\lambda, BB}(\lambda, T_{BB})$ eines Hochtemperatur-Hohlraumstrahlers (auch Planckscher Strahler oder Schwarzer Strahler) berechnen:

$$E_{\lambda, BB}(\lambda, T_{BB}) = \varepsilon(\lambda, T_{BB}) \cdot \frac{A_{BB}}{d_{BB}^2} \cdot \frac{c_1}{n^2 \lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{n\lambda T_{BB}}} - 1} \quad (16)$$

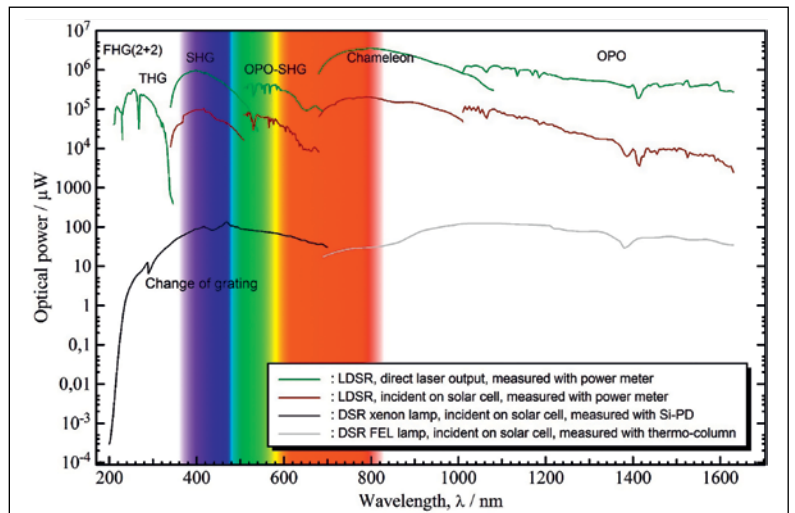


Bild 7: Wellenlängenabhängige optische Leistung des herkömmlichen DSR-Messplatzes (untere Kurven) und des Laser-DSR-Messplatzes, einmal direkt hinter dem Laser gemessen (grüne Kurven) und einmal die Leistung der tatsächlich in der Messebene nutzbaren Strahlung (rote Kurven).

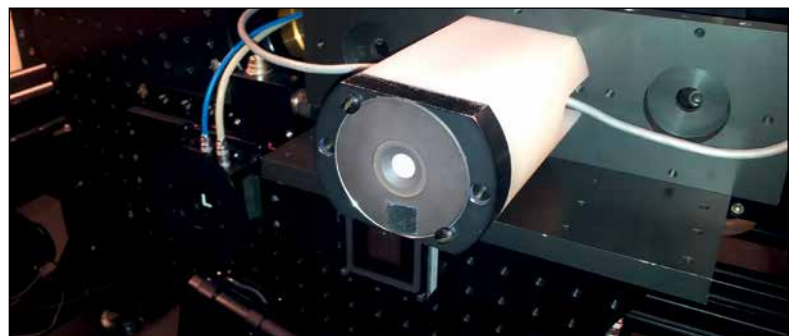


Bild 8: Photometer, Referenzphotodiode (links) sowie Solarzelle (unten) am Laser-DSR-Messplatz

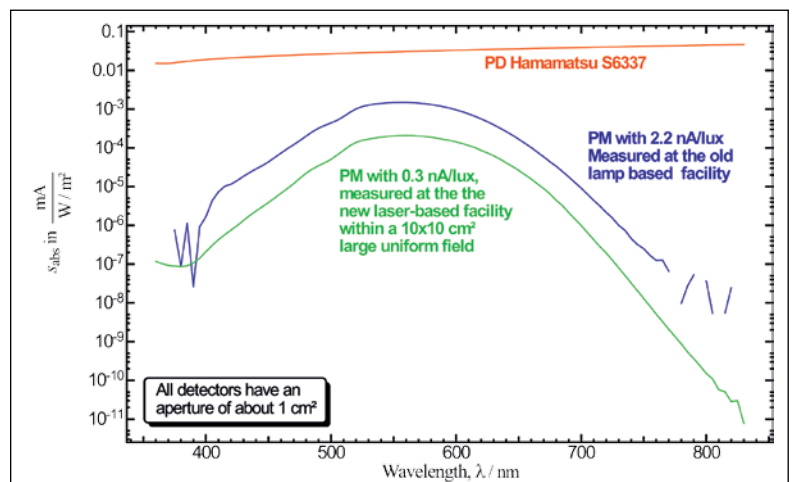


Bild 9: Mit dem Laser-DSR-Messplatz und dem DSR-Messplatz gemessene spektrale Empfindlichkeiten von zwei verschiedenen Photometern (grüne und blaue Kurve) sowie die spektrale Empfindlichkeit von der als Referenz benutzten Photodiode (rote Kurve). Die Signalhöhen unterscheiden sich um einen Faktor von bis zu 100 Millionen. Obwohl das am Laser-DSR-Messplatz gemessene Photometer ca. 7 mal unempfindlicher als das am DSR-Messplatz gemessene Photometer ist, kann die spektrale Empfindlichkeit in einem deutlich größeren Wellenlängenbereich gemessen werden.

Hierbei ist

T_{BB}	die Temperatur des Planckschen Strahlers
$\epsilon(\lambda, T_{BB})$	der effektive Emissionsgrad des Strahlers,
A_{BB}	die Größe der Strahleröffnung,
d_{BB}	der Abstand zur Referenzebene für die Bestrahlungsstärke,
c_1, c_2	die Planckschen Strahlungskonstanten und
n	der Brechungsindex von Luft.

In der PTB wird im Fachbereich 4.1 „Photometrie und angewandte Radiometrie“ ein Hochtemperatur-Hohlraumstrahler vom Typ BB3200pg als nationales Normal für spektrale Bestrahlungsstärke im Spektralbereich 200 nm bis 2500 nm eingesetzt. Der Strahler, der vom russischen Institut für optophysikalische Messungen (VNIIOFI) entwickelt [6] und von der PTB für seine Messaufgabe aufwendig charakterisiert und optimiert wurde [7], besitzt einen Hohlraum aus pyrolytischem Graphit, der mittels Gleichstrom auf Temperaturen bis 3200 K aufgeheizt werden kann. Der Strahler besitzt einen effektiven Emissionsgrad von $\epsilon(\lambda, T_{BB}) > 0,9998$ und eine ausgeprägte Homogenität der Temperatur im Hohlraum. Er kann somit als Planckscher Strahler behandelt werden.

Zur Berechnung des Planckschen Strahlungsgesetzes werden weitere Größen des SI-Systems benötigt, die in der PTB rückführbar kalibriert werden. So wird zum Beispiel die Strahlerfläche A_{BB} in Fachbereich 5.3 „Koordinatenmesstechnik“ kalibriert und die Bestimmung der Strahlertemperatur T_{BB} erfolgt mithilfe von Filtrerradiometern, die in Fachbereich 7.3 „Detektorradiometrie und Strahlungsthermometrie“ gegen ein Kryo-

radiometer rückgeführt werden. Mithilfe dieser Berechnungsparameter für Gleichung (16) kann der Schwarze Strahler als Primärnormal für strahlungsphysikalische Größen eingesetzt werden.

Die Kalibrierung von Glühlampen bezüglich spektraler Bestrahlungsstärke erfolgt in Substitution durch direkten Vergleich gegen das Primärnormal bzw. entsprechend rückgeführte Sekundärnormale. Hierbei handelt es sich um 1000-W-Glühlampen vom Typ FEL, die mit einer Verteilungstemperatur von etwa 3080 K einem dem Schwarzen Strahler sehr ähnlichen Verlauf der relativen spektralen Strahlungsfunktion besitzen. Die Substitution erfolgt mithilfe eines Spektorradiometers, das mit drei Monochromatoren und Empfängern einen Spektralbereich von 250 nm bis 2500 nm abdeckt [8]. Eine Ulbrichtkugel dient als Eingangsoptik und ihre Eintrittsöffnung als Referenzebene für die Bestrahlungsstärke. Die durch die Kugel transmittierte Strahlung gelangt in einen Vormonochromator und wird nach spektraler Vorzerlegung wahlweise in einen Monochromator für den Spektralbereich 250 nm bis 1100 nm oder in einen Monochromator für den infraroten Spektralbereich eingekoppelt. Ein Photomultiplier, eine Si-Photodiode und eine InGaAs-Photodiode erfassen die aus den derart kombinierten beiden Doppelmonochromatoren austretende Strahlung. Im für die Photometrie relevanten sichtbaren Spektralbereich werden spektrale Messungen mit einer spektralen Bandbreite von 1 nm und einem Streulichtanteil im Bereich von 10^{-7} durchgeführt.

Das Verhältnis der mit den unterschiedlichen Strahlern gemessenen Photoströme entspricht im Wesentlichen dem Verhältnis ihrer spektralen Bestrahlungsstärken. Beim Vergleich eines Strah-

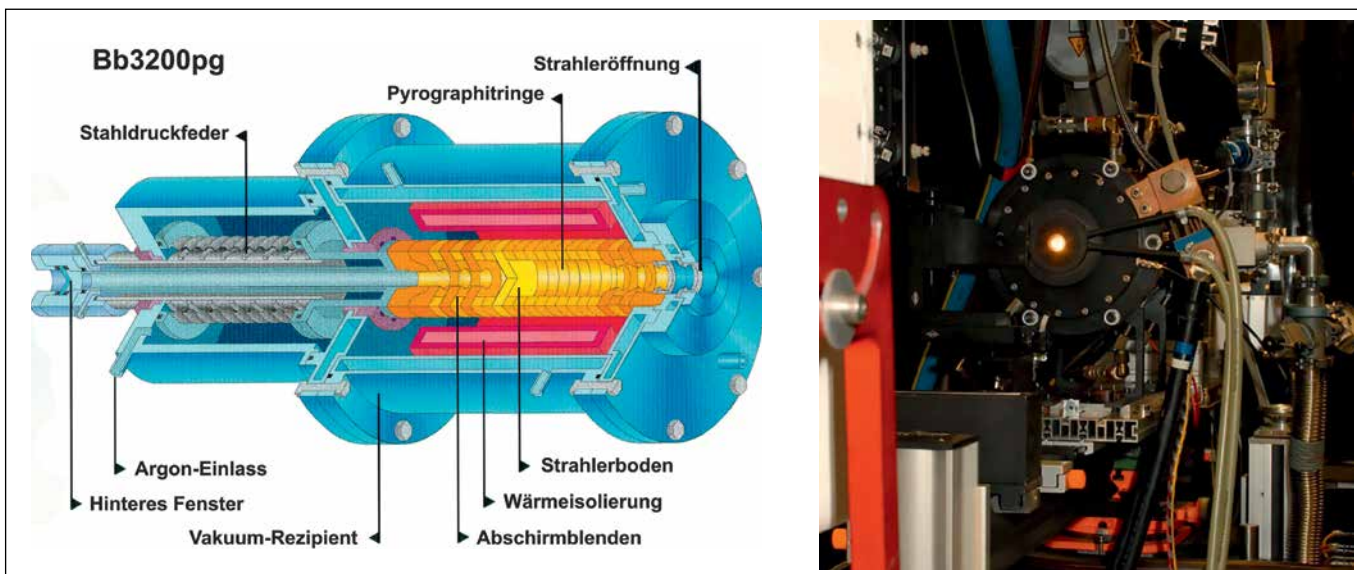


Bild 10: Der Hochtemperatur-Hohlraumstrahler BB3200pg, der in der PTB als Primärnormal für die spektrale Bestrahlungsstärke eingesetzt wird. Der Hohlraum aus Pyrographit kann bis zu 3200 K aufgeheizt werden.

lers „S“ mit der Verteilungstemperatur T mit dem Schwarzen Strahler der Temperatur T_{BB} lässt sich prinzipiell also die unbekannte spektrale Bestrahlungsstärke $E_{\lambda,S}(\lambda,T)$ ermitteln aus

$$E_{\lambda,S}(\lambda,T) = E_{e,\lambda, BB}(\lambda, T_{BB}) \cdot \frac{y_S(\lambda)}{y_{BB}(\lambda)}, \quad (17)$$

wobei $y_S(\lambda)$ und $y_{BB}(\lambda)$ die für die beiden Strahler gemessenen Photoströme bei der Wellenlängeneinstellung λ sind und $E_{\lambda, BB}(\lambda, T_{BB})$ die spektrale Bestrahlungsstärke des Hochtemperatur-Hohlraumstrahlers nach dem Planckschen Strahlungsgesetz (16) ist.

Ableitung und Weitergabe weiterer photometrischer Einheiten gerichteter photometrischer Größen

Neben der Einheit für die Lichtstärke sind in der gerichteten Photometrie die Einheit der Beleuchtungsstärke zur Kalibrierung von Photometern und die Einheit der Leuchtdichte zur Angabe von Lampeneigenschaften besonders wichtig.

Beleuchtungsstärke

In der PTB werden Beleuchtungsstärke-Messgeräte mit einem Referenzphotometer mittels der Substitutionsmethode kalibriert, wobei die Lichteintrittsflächen der Photometerköpfe an derselben Stelle, senkrecht und gleichmäßig beleuchtet werden.

Dazu wird zunächst das Referenzphotometer (Linearität und Anpassungsindex m bekannt) mit Lichtstärke-Normlampen beliebiger Verteilungstemperatur T kalibriert. Durch Umstellung von Gleichung (13) folgt für seine photometrische Empfindlichkeit:

$$s_v = \frac{d^2}{\Omega_0} \cdot \frac{y(T)}{I_v(T)} \cdot \left[\frac{T}{2856K} \right]^m. \quad (18)$$

Auf einer 40 m langen Photometerbank, siehe Bild 10, können dann mit beliebigen Glühlampen unterschiedlicher elektrischer Leistung aber bekannter Verteilungstemperatur Beleuchtungsstärken zwischen 0,001 lx und 10000 lx erzeugt werden.

Die Kalibrierung von Beleuchtungsstärke-Messgeräten erfolgt meistens mit Licht der Normlichtart A, eine entsprechende Lampe ist in Bild 15 dargestellt. Die Anzeige des zu kalibrierenden Beleuchtungsstärke-Messgerätes wird mit dem Messwert der Beleuchtungsstärke E_v des Referenzphotometers verglichen.

$$E_v(T = 2856K) = \frac{y}{s_v} \quad (19)$$

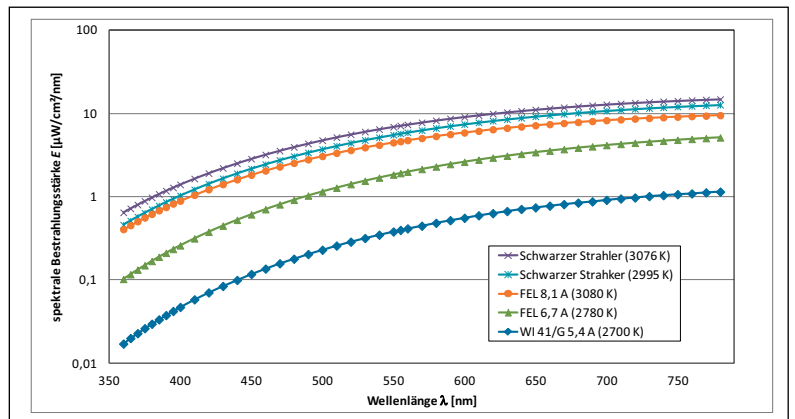


Bild 11: Spektrale Bestrahlungsstärke unterschiedlicher Strahler im sichtbaren Spektralbereich. Die als Sekundärnormale eingesetzten 1000-W-Glühlampen vom Typ FEL und die in der Photometrie verwendeten Glühlampen vom Typ WI 41/G besitzen einen sehr ähnlichen spektralen Verlauf wie der als Primärnormal eingesetzte Schwarze Strahler bei unterschiedlichen Strahlertemperaturen.

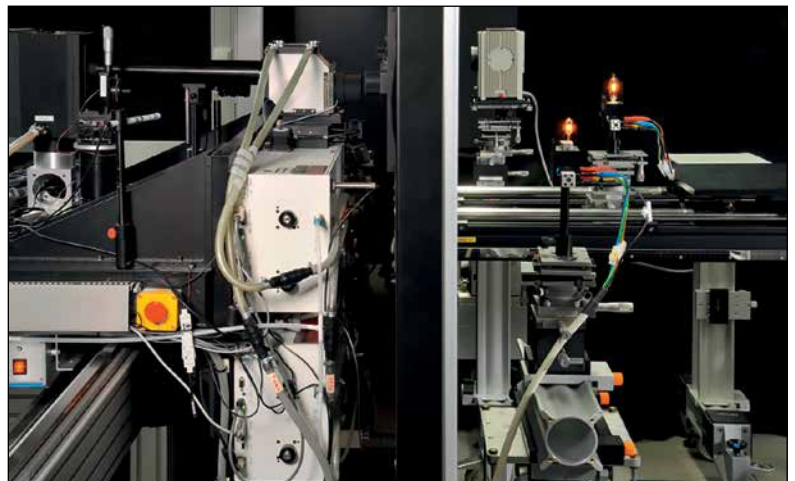


Bild 12: Der Messplatz für die Kalibrierung von Glühlampen bezüglich spektraler Bestrahlungsstärke in der PTB. Auf der rechten Seite befinden sich zwei als Sekundär- und Arbeitsnormale eingesetzte Glühlampen. Auf der linken Seite ist das Spektroradiometer zu sehen, das an seiner Oberseite eine Ulbrichtkugel als Eingangsoptik montiert hat, deren Öffnung in Richtung Strahler als Referenzebene für die Bestrahlungsstärke verwendet wird.



Bild 13: Messplatz zur Weitergabe der Einheit der Beleuchtungsstärke zur Kalibrierung von Photometern



Bild 14:
Die 40 m lange photometrische Bank zur Realisierung und Weitergabe der Einheit der gerichteten Photometrie

Leuchtdichte

Leuchtdichten homogener leuchtender begrenzter Flächen können aus großem Abstand wie Lichtstärken gemessen werden. Wird z. B. eine kreisförmige Blendenöffnung (zentrisch und senkrecht zur Messrichtung) zwischen der leuchtenden Fläche und dem Photometerkopf angeordnet und damit ein Teillichtstrom ausgesondert, so kann dieser in großem Abstand als Lichtstärke bestimmt werden, und es gilt für die Leuchtdichte L_v der prinzipielle Zusammenhang:

$$L_v = \frac{I_v}{A}. \quad (20)$$

In der PTB wird für die mit Glühlampen ausgestatteten Leuchtdichtennormale (d. h. Verteilungstemperatur T bekannt) zunächst die photometrische Empfindlichkeit s_v des Referenzphotometers wie in Abschnitt 4.1 bestimmt, dann die Lichtstärke nach Gleichung (13) gemessen und schließlich die mittlere Leuchtdichte innerhalb der leuchtenden Fläche A nach Gleichung (20) berechnet.

Für Leuchtdichtennormale gelten prinzipiell einige der im Kapitel „Lichtstärke-Normallampen“ aufgeführten Merkmale. Sie unterscheiden sich jedoch im Detail in der Art der Ausführung, z. B. sind sie mit Glühlampen oder mit LEDs bestückt, sie können hinsichtlich der Leuchtdichte bzw. Farbe durchstimmbare sein oder mit gesonderter Monitortechnik ausgestattet sein.

Die traditionellen Messverfahren zur Bestimmung der Leuchtdichte bzw. die Verwendung von Photometern mit direkter Anzeige der Leuchtdichtewerte werden zunehmend durch den Einsatz von Leuchtdichtekameras (pixelaufgelöste Darstellung von Leuchtdichteverteilungen) ergänzt. Eine absolute Kalibrierung dieser modernen Systeme stellt aber messtechnisch eine große Herausforderung



Bild 15:
20-kW-Hochleistungshalogenleuchte für hohe Beleuchtungsstärken zur Kalibrierung von Beleuchtungsstärke-Messgeräten u. a. mit Normlichtart A



Bild 16:
Glühlampenbasierte Normale zum Transfer der Leuchtdichte-Einheit

dar, aktuell werden zur Charakterisierung solcher Kameras national im FNL3 (Normenausschuss „Photometrie“ im DIN) und international in der CIE (TC2-59, TC2-62) u. a. Messverfahren diskutiert, die dann mittels definierter Kenngrößen beschrieben werden.

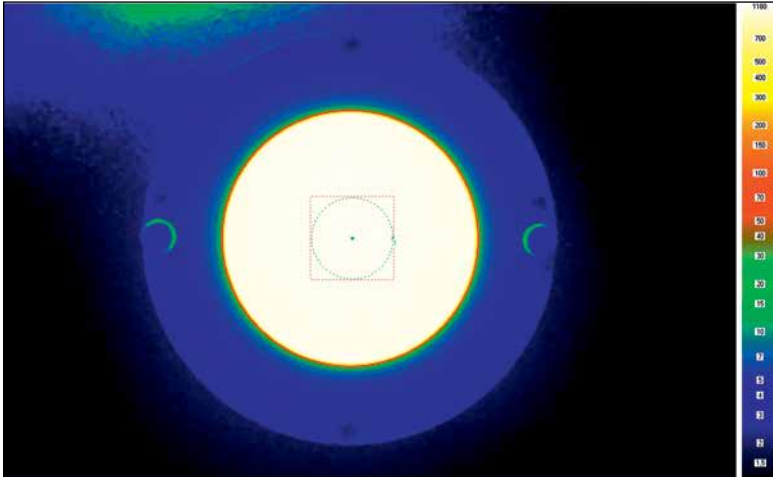


Bild 17:
Pixelaufgelöste Darstellung einer
Leuchtdichteverteilung mit einer
Leuchtdichtemesskamera

Literatur

- [1] BIPM Com. Cons. Phot. Radiometrie; 1982; 10
- [2] CIE; 114/4; Distribution temperature and ratio temperature; 1994
- [3] G. Sauter; Die Candela: Erläuterungen zum Verständnis der Definition und der Realisierung; PTB-Mitteilungen 107; 1997
- [4] W. Schreier (Hrsg.); Biographien bedeutender Physiker; 2. Aufl.; Volk und Wissen; Berlin 1988; S. 203–205
- [5] M. Planck; Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum; Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 2; 1900; S. 237–245
- [6] V. I. Sapritsky, B. B. Khlevnoy, V. B. Khromchenko, B. E. Lisiansky, S. N. Mekhontsev, U. A. Melenevsky, S. P. Morozova, A. V. Prokhorov, L. N. Samoilo, V. I. Shapoval, K. A. Sudarev, M. F. Zelener; Precision Blackbody sources for radiometric standards; Appl. Opt.; 1997; 36; S. 5403–5408
- [7] P. Sperfeld; Entwicklung und Realisierung einer empfangergestützten spektralen Bestrahlungsstärkekala; Dissertation; Braunschweig; 28.6.1999; <http://www.biblio.tu-bs.de/ediss/data/19990628a/19990628a.html> (Letzter Aufruf: 28.10.2015)
- [8] P. Sperfeld, S. Pape, B. Barton; From Primary Standard to Mobile Measurements – Overview of the Spectral Irradiance Calibration Equipment at PTB; MAPAN-Journal of Metrology Society of India; 25; 2010; S. 11–19