

Das Jahr des Lichtes



Das Jahr des Lichtes

Inhalt

Das Jahr des Lichtes

- Einführung in die Metrologie des Lichtes 3
Stefan Kück, Armin Sperling
- Die Candela als Maßeinheit des Lichtes 4
Armin Sperling
- Rückführung in der Photometrie – die Realisierung und Rückführung der Candela 8
Detlef Lindner, Stefan Winter
- Kurze Geschichte der Goniophotometrie in der PTB 18
Matthias Lindemann
- Metrologie für moderne Lichtquellen: LEDs und OLEDs 32
Thorsten Gerloff
- Effektpigmente: Eine Herausforderung für die optische Messtechnik 39
Egbert Buhr, Alfred Schirmacher, Andreas Höpe

Internationale Zusammenarbeit

- Aktuelles aus der OIML 45
Susanne Ludwig, Roman Schwartz

Technologietransfer

- E27-Scanner für Ulbrichtkugeln 48
- Umwandlung gepulster Laser-Strahlung in konstante Strahlung 49
- Homogenisierung von Strahlungsquellen und Focal Plane Arrays (FPA) 50

Einführung in die Metrologie des Lichtes

Stefan Kück*, Armin Sperling**

Licht ist der für das menschliche Auge sichtbare Teil elektromagnetischer Strahlung und wird von den angrenzenden infraroten und ultravioletten Spektralbereichen der Strahlung eingebettet. Die spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges hat hierbei ihr Maximum im Gelb-Grünen und nimmt zum Infraroten und Ultravioletten hin stark ab. Im Detail ist die Augenempfindlichkeit individuell sehr unterschiedlich und die Wahrnehmung selbst ist durch die beteiligten physiologischen Prozesse in vieler Hinsicht (z. B. Helligkeit, Farbwahrnehmung, etc.) nichtlinear. Im Zuge der Industrialisierung hat man aber schnell erkannt, dass eine von diesen physiologischen Prozessen losgelöste metrologische Bewertung von Lichtquellen und damit von Licht notwendig ist [1]. Wir unterscheiden daher zwischen der Wahrnehmung, dem Sehen, und der Photometrie, der physikalischen Bewertung von Licht. Um dies zu gewährleisten, hat die internationale Beleuchtungsorganisation CIE (*Commission Internationale de l'Éclairage*) im Jahr 1924 die mittlere Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges für die unterschiedlichen Wellenlängen des Lichtes als Empfindlichkeitsfunktion eines „Normalbeobachters“ für photopisches Sehen (sog. Tagsehen) festgelegt und als sogenannte $V(\lambda)$ -Funktion veröffentlicht. Mithilfe eines derartigen Normalbeobachters, technisch realisiert z. B. durch gefilterte Silizium-Halbleiterempfänger, lässt sich die Quantität von Licht messen – eine wesentliche Voraussetzung für die Entwicklung eines Marktes für Beleuchtungsprodukte, der derzeit allein in Deutschland einen Umsatz von über 6 Mrd. Euro produziert. Es stellt sich aber neben der Quantität des Lichtes auch die Frage nach der Qualität des Lichtes.

Einhergehend mit genaueren Untersuchungen des Aufbaus des menschlichen Auges einerseits

und der Verarbeitung des optischen Reizes im Auge und den nachgeschalteten Nervenzellen bzw. des Gehirns andererseits, ist das Verständnis um die Wirkung von Licht auf den Menschen permanent gewachsen. Parallel hierzu sind auch die technologisch realisierbaren Möglichkeiten zur Gestaltung künstlichen Lichtes deutlich gestiegen, sodass hiermit einhergehend auch stetig die Anforderungen an die Metrologie des Lichtes steigen. Sind z. B. für die Beleuchtungstechnik heute noch Leuchtmittel mit konstanter Farbtemperatur (warm, warm-weiß, kalt-weiß, Tageslicht) oft im Einsatz – und damit auch im Fokus der Photometrie, werden in Zukunft Lichtquellen mit einstellbarer Farbtemperatur und deren Lichtstärkeverteilung messtechnisch eindeutig zu beschreiben sein. Die derzeit noch getrennt behandelten Gebiete Photometrie, Reflektometrie und Spektroradiometrie wachsen hierbei zunehmend weiter zusammen.

Diese Ausgabe der PTB-Mitteilungen, die im internationalen Jahr des Lichtes erscheint, gibt einen Überblick über die Arbeiten in der PTB zum Thema Licht und spannt einen Bogen von der Bedeutung der Candela für die Photometrie über die Realisierung der SI-Basiseinheit Candela hin zu den derzeitigen Herausforderungen in der Photometrie und Reflektometrie.

Literatur

- [1] A. Sperling, G. Sauter; Lichtstärke – Die SI-Basiseinheit; PTB-Mitteilungen Jahrgang 122; Heft 1/2012; Das System der Einheiten; pp. 83–91

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

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

Die Candela als Maßeinheit des Lichtes

Armin Sperling*

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

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 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.

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

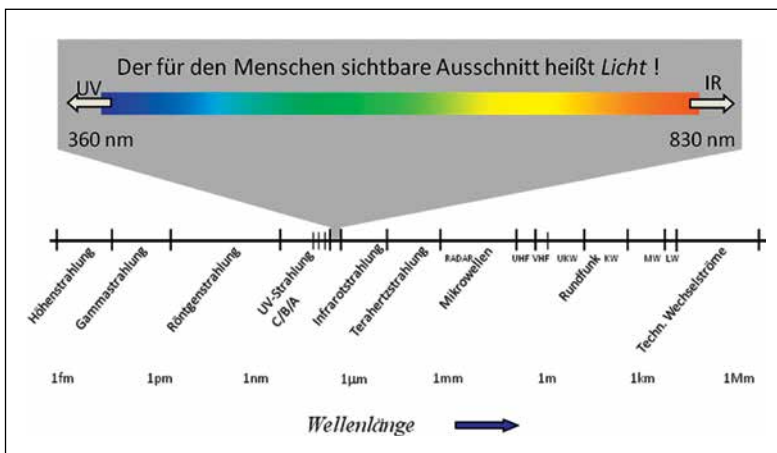


Bild 1: Der Lichtstrom einer Lichtquelle ist die im sichtbaren Spektralbereich in alle Richtungen abgestrahlte Lichtleistung

von 1942 bis 1981 mit dem Platin-Punkt-Strahler und der Einheit *Candela* (cd) als unabhängige Größe zu den anderen Basisgrößen des SI-Systems realisiert. Bei dem Platin-Punkt-Strahler handelte es sich im Übrigen um einen Temperaturstrahler, der den heutigen Hochtemperatur-Fixpunktstrahlern in der Thermometrie zur Realisierung der Temperaturskala nicht unähnlich war. Mit stärker werdendem Einfluss der Radiometrie auf die Photometrie und des damit einhergehenden Wunsches, die photometrische Basiseinheit direkt an die radiometrische Einheit Watt zu koppeln, wurde 1979 der Beschluss gefasst, die Definition der Einheit Candela von ihrer Realisierung zu trennen. Seitdem gilt die Definition:

Die Candela ist die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz 540 THz aussendet und deren Strahlstärke in dieser Richtung (1/683) Watt durch Steradian beträgt.

Der Umrechnungsfaktor $(1/683) \text{ Wsr}^{-1}$ wurde hierbei vor der Umstellung der Einheit durch mehrere Messungen in den nationalen Metrologieinstituten bestimmt, vom *Consultative Committee for Photometry and Radiometry* (CCPR) festgelegt und 1977 offiziell vom *International Committee for Weights and Measures* (CIPM) übernommen [1].

Diese Definition ist nicht als Realisierungsvorschrift für die Candela gedacht. Im Gegensatz zur Definition der Candela über eine thermische Strahlungsquelle, die, als Licht aufgefasst, die Wichtung der spektralen Strahlungsleistung mit der Augenempfindlichkeit automatisch einschließt, ist nun die Kenntnis der Augenempfindlichkeit erforderlich, um aus Strahlung Licht zu machen. Die Definition ist daher vielmehr als absolute Anbindung der Hellempfindlichkeitsfunktion $V(\lambda)$ des menschlichen Auges an das radiometrische Watt zu verstehen. War der spektrale Verlauf der Empfindlichkeit des menschlichen Auges für die Realisierung und Weitergabe der Messgröße Lichtstärke vor 1981 kaum von Bedeutung, so wurde sie mit der neuen Definition für die Metrologie essenziell.

In Luft, bei $n = 1,00028$ [2], liegt die Wellenlänge der in der Definition angegebene Frequenz von $\nu = 540 \cdot 10^{12}$ Hz bei $\lambda = 555,016$ nm. Sie liegt damit sehr nahe dem Maximum der 1972 vom CIPM empfohlenen $V(\lambda)$ -Funktion des photopischen CIE-Normalbeobachters für das Tagsehen, das bei exakt $\lambda_m = 555$ nm liegt und definiert dort laut Definition das maximale photopische Strahlungsäquivalent (Index m für „maximum“) dort zu $K_m = 683,002 \text{ lmW}^{-1}$. Somit wird über die Candela-Definition und der tabellarisch festgelegten $V(\lambda)$ -Funktion für jede Wellenlänge im Definitionsbereich das wellenlängenabhängige photometrische Strahlungsäquivalent $K(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda)$ eindeutig festgelegt.

Neben dieser $V(\lambda)$ -Funktion wurde 1951 von der CIE auch eine skotopische Empfindlichkeitsfunktion $V'(\lambda)$ für das Nachtsehen tabellarisch festgelegt und 1976 vom CIPM bestätigt. Das Maximum dieser Funktion liegt bei $\lambda'_m = 507$ nm mit einem maximalen skotopischen Strahlungsäquivalent von $K'_m = 1700 \text{ lmW}^{-1}$.

Der Hintergrund dieser beiden Bewertungsfunktionen liegt darin begründet, dass unser Auge in der Retina für das Sehen über zwei unterschiedliche Empfängersysteme, die Stäbchen und die Zapfen, verfügt. Die Zapfen, die sich noch einmal in unterschiedliche Rezeptoren aufteilen und die auch für das Farbsehen verantwortlich sind, häufen sich insbesondere in und um die Netzhautgrube, die in der optischen Achse des Auges liegt. Hier werden insbesondere die achsennah auf das Auge auftreffenden Strahlen detektiert, weshalb man auch vom 2°-Beobachter spricht. Zum Nachtsehen, mit weit geöffneter Pupille tragen vor allem die deutlich empfindlicheren Stäbchen bei, die zudem in den achsenfernen Bereichen der Retina dominieren. Die unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeiten von Zäpfchen und Stäbchen spiegeln sich in den $K(\lambda)$ - und $K'(\lambda)$ -Kurven (siehe Bild 2) wieder.

Die hier beschriebene Verknüpfung der Bewertungsfunktionen mit der Candela-Definition ist aus der Einheitendefinition selbst nicht ersichtlich. Weitergehende Informationen findet man, wie für die Basiseinheiten üblich, in der sogenannten Ausführungsbestimmung (*mise en pratique*) zur Candela [3].

Betrachtet man die Leuchtdichte, die vom Auge aufgenommen wird, so umfasst der skotopische Bereich Leuchtdichten bis ungefähr $L < 0,005 \text{ cdm}^{-2}$ und der photopische Bereich Leuchtdichten ab ungefähr $L > 5 \text{ cdm}^{-2}$. Über den mesopischen Zwischenbereich wurde lange Zeit keine Aussage gemacht. Erst im Jahr 2010 ist auch

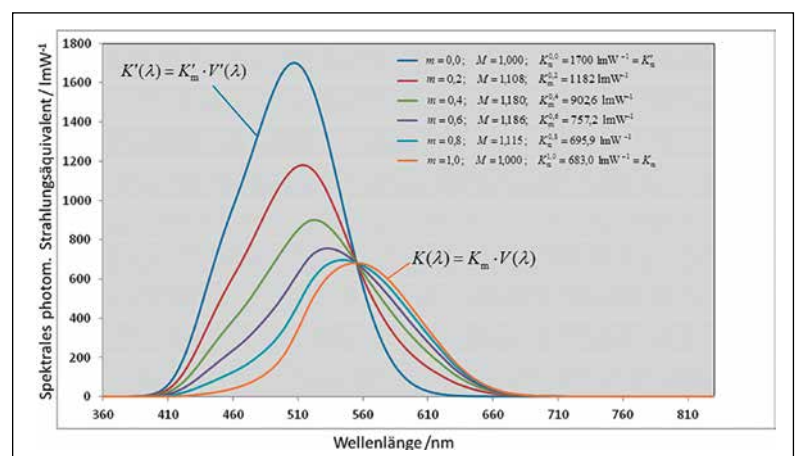


Bild 2: Die mesopische Hellempfindlichkeitsfunktionen $V_{\text{mes}}(\lambda)$ für unterschiedliche Adaptionsniveaus mit deren zugehörigen maximalen Strahlungsäquivalenzen

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

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 $I_v(T)$:

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

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,

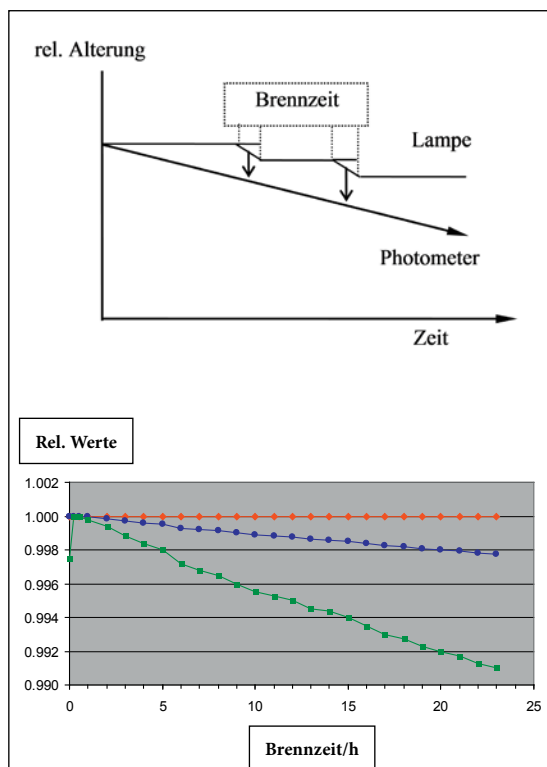


Bild 2: Alterungsverhalten von Lampen und Photometern. Links: schematisch, rechts: reales Alterungsverhalten einer Lampe im Betrieb: rot: Strom, blau: Spannung, grün: Lichtstärke

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.

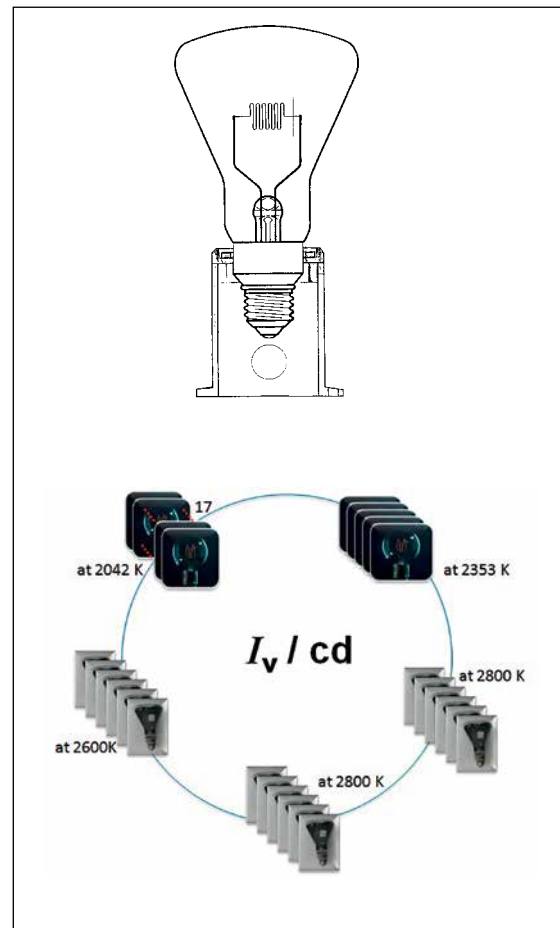


Bild 3: Lichtstärke-Normallampe WI41/G mit PTB-Spezialsockel (oben) sowie verschiedene Lichtstärke-Normallampengruppen zur Bewahrung und Weitergabe der Lichtstärke-Einheit (unten)

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)

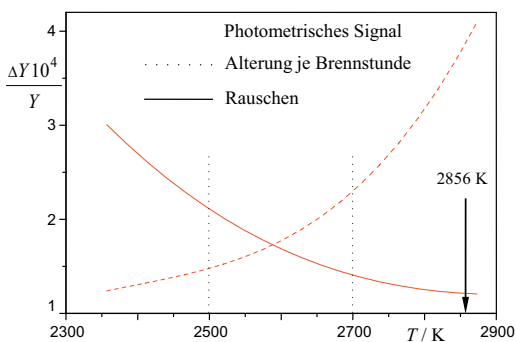


Bild 4: Alterung je Brennstunde bzw. Rauschen des photometrischen Signals

- 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).

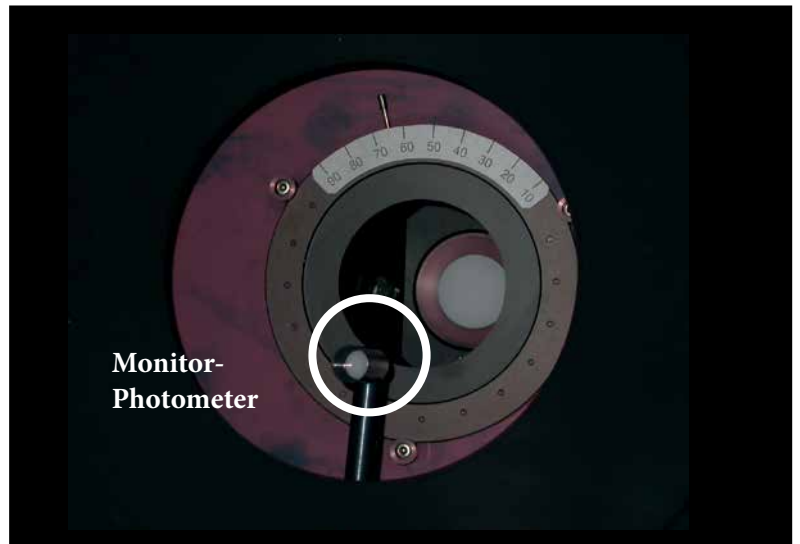


Bild 5: Monitor-Photometer zur Überwachung bzw. Korrektur der Stabilität bei Messungen in der gerichteten Photometrie

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.

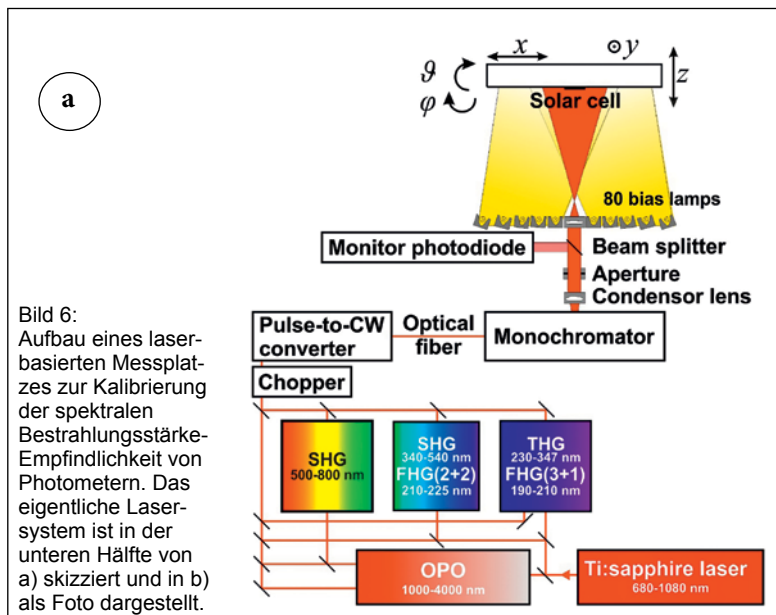
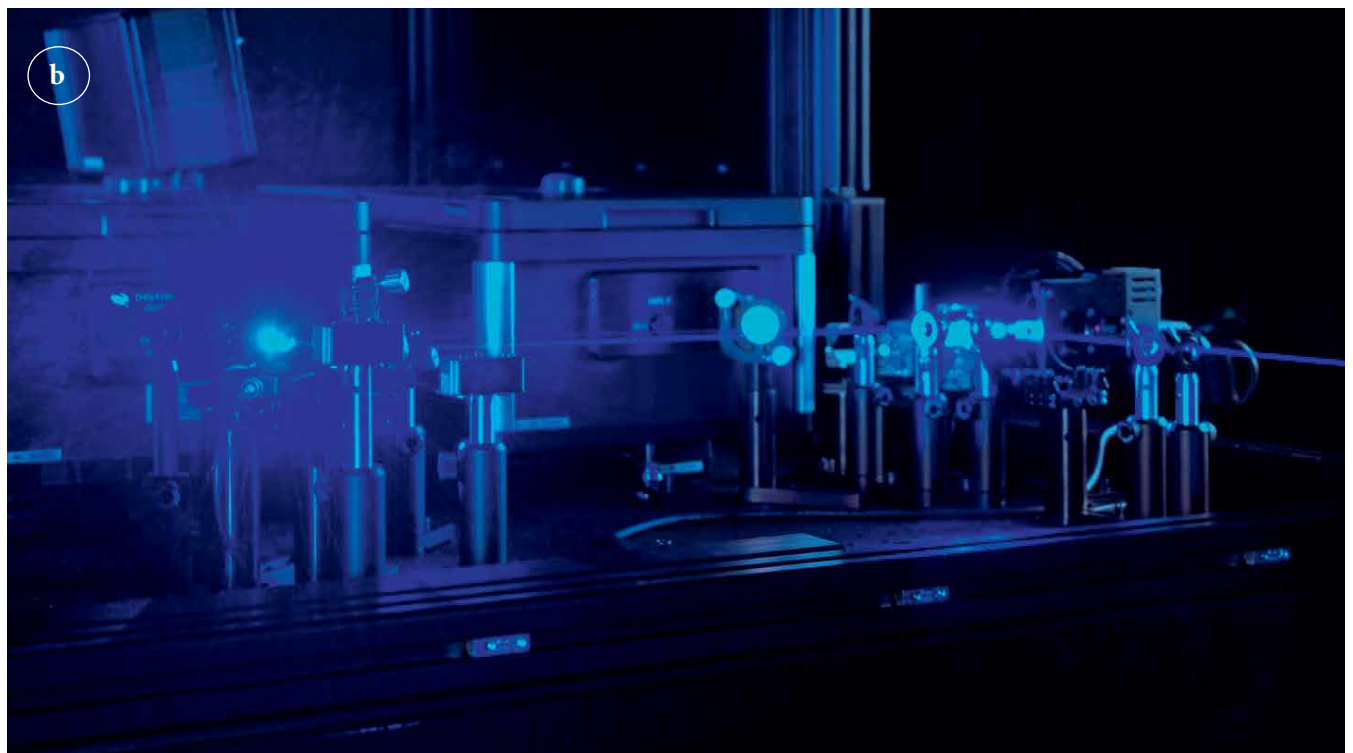


Bild 6: Aufbau eines laserbasierten Messplatzes zur Kalibrierung der spektralen Bestrahlungsstärke-Empfindlichkeit von Photometern. Das eigentliche Lasersystem ist in der unteren Hälfte von a) skizziert und in b) als Foto dargestellt.



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:

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

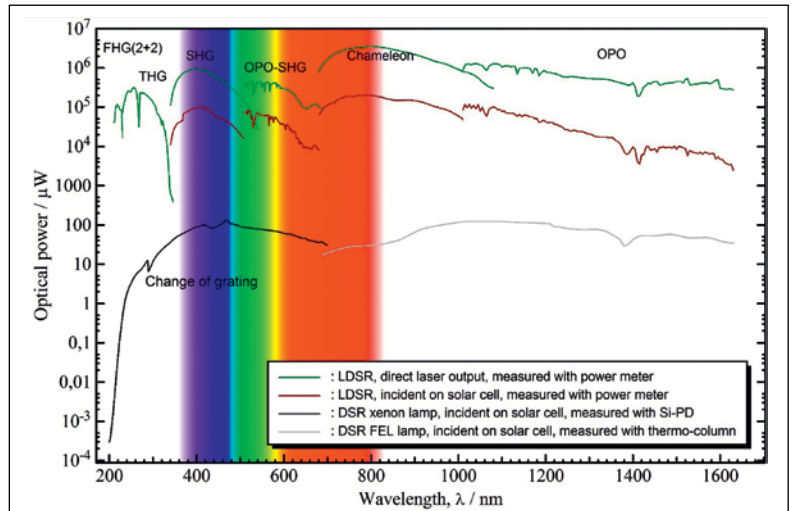


Bild 7: Wellenlängenabhängige optische Leistung des herkömmlichen DSR-Messplatzes (untere Kurven) und des Laser-DSR-Messplatzes, einmal direkt hinter dem Laser gemessen (grüne Kurven) und einmal die Leistung der tatsächlich in der Messebene nutzbaren Strahlung (rote Kurven).

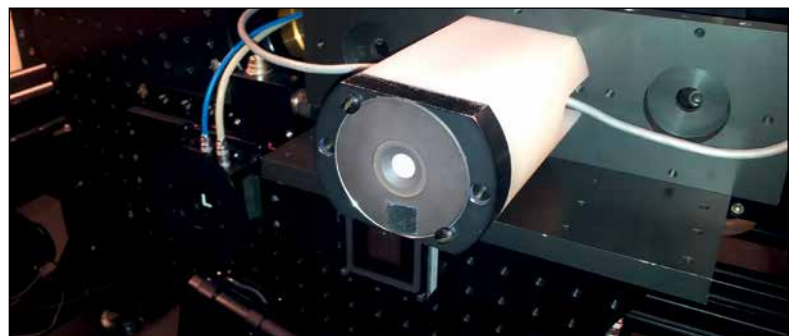


Bild 8: Photometer, Referenzphotodiode (links) sowie Solarzelle (unten) am Laser-DSR-Messplatz

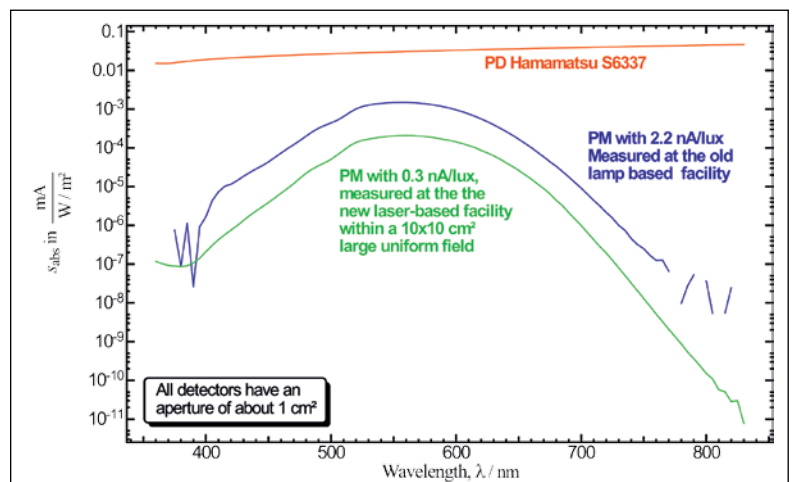


Bild 9: Mit dem Laser-DSR-Messplatz und dem DSR-Messplatz gemessene spektrale Empfindlichkeiten von zwei verschiedenen Photometern (grüne und blaue Kurve) sowie die spektrale Empfindlichkeit von der als Referenz benutzten Photodiode (rote Kurve). Die Signalhöhen unterscheiden sich um einen Faktor von 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-

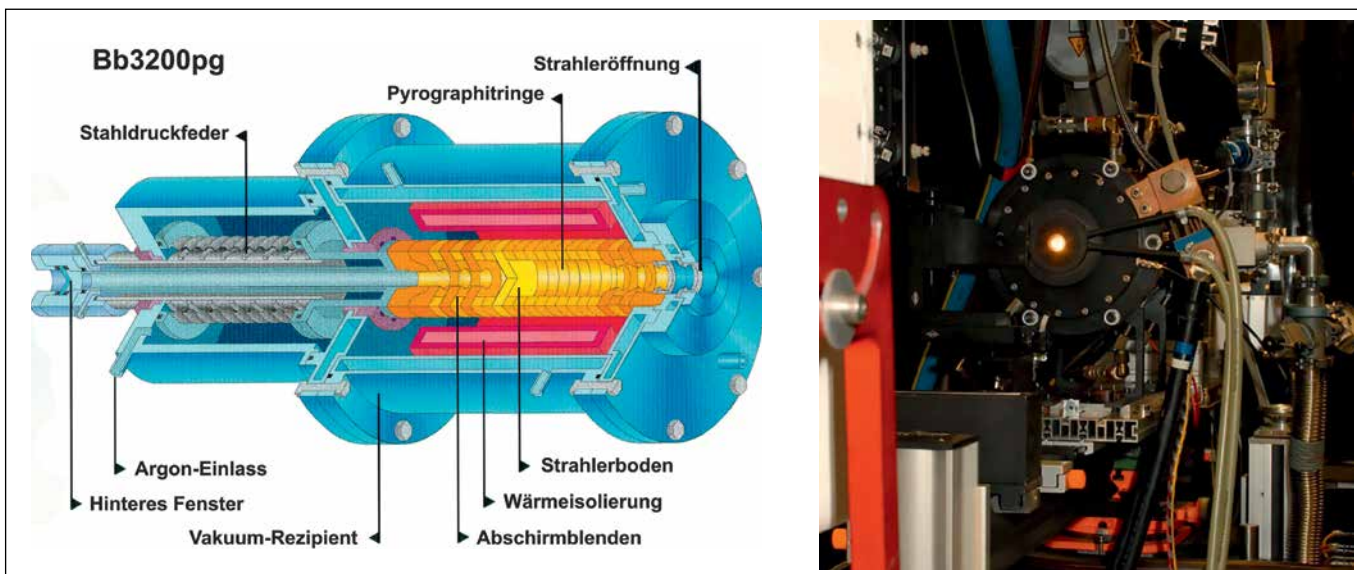


Bild 10: Der Hochtemperatur-Hohlraumstrahler BB3200pg, der in der PTB als Primärnormal für die spektrale Bestrahlungsstärke eingesetzt wird. Der Hohlraum aus Pyrographit kann bis zu 3200 K aufgeheizt werden.

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.

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

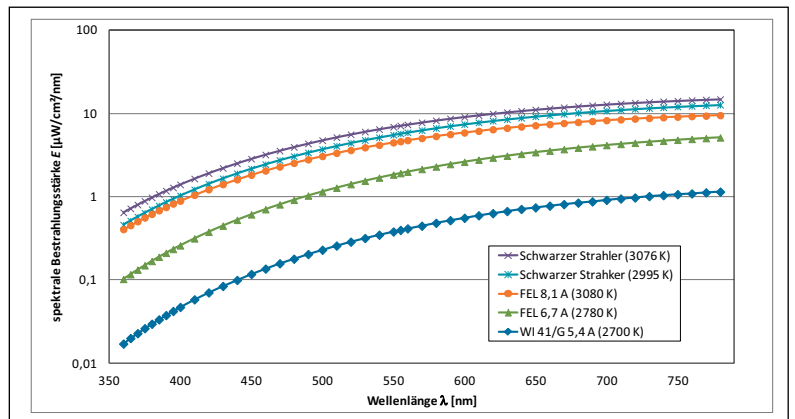


Bild 11: Spektrale Bestrahlungsstärke unterschiedlicher Strahler im sichtbaren Spektralbereich. Die als Sekundärnormale eingesetzten 1000-W-Glühlampen vom Typ FEL und die in der Photometrie verwendeten Glühlampen vom Typ WI 41/G besitzen einen sehr ähnlichen spektralen Verlauf wie der als Primärnormal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

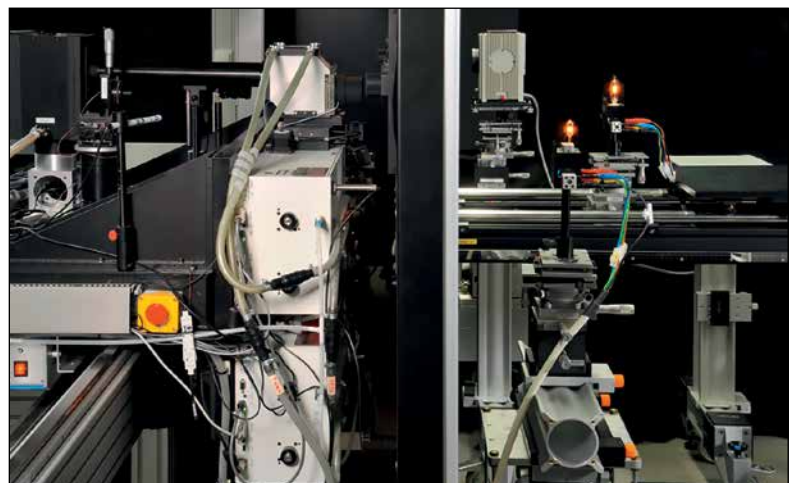


Bild 12: Der Messplatz für die Kalibrierung von Glühlampen bezüglich spektraler Bestrahlungsstärke in der PTB. Auf der rechten Seite befinden sich zwei als Sekundär- und Arbeitsnormale eingesetzte Glühlampen. Auf der linken Seite ist das Spektroradiometer zu sehen, das an seiner Oberseite eine Ulbrichtkugel 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 Einheiten der gerichteten Photometrie

Leuchtdichte

Leuchtdichten homogen 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.

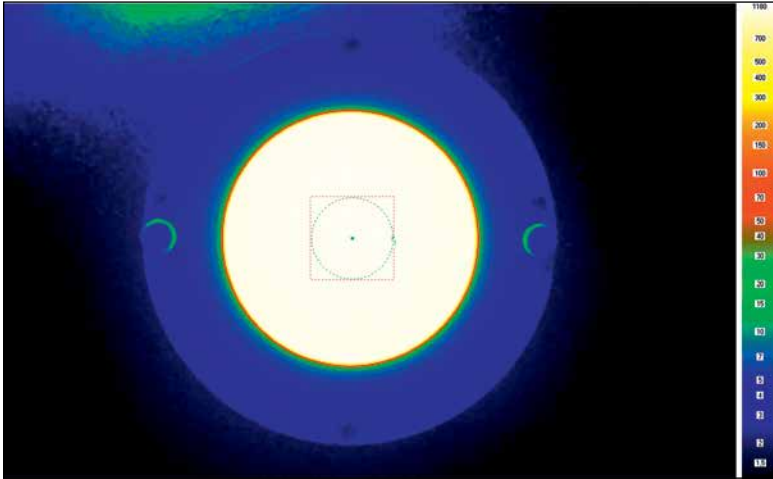


Bild 17:
Pixelaufgelöste Darstellung einer
Leuchtdichteverteilung mit einer
Leuchtdichtemesskamera

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

Kurze Geschichte der Goniophotometrie in der PTB

Matthias Lindemann*

* Matthias Lindemann,
Arbeitsgruppe
„Goniophotometrie“,
E-Mail: matthias.
lindemann@ptb.de

Zusammenfassung

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) ist das nationale Metrologieinstitut (NMI) der Bundesrepublik Deutschland, das seinen Fokus auf die Realisierung, Bewahrung und Weitergabe der SI-Einheiten richtet. Deshalb hat auch die goniophotometrische Bestimmung des Lichtstroms nahezu beliebiger Lichtquellen eine lange Tradition. Seit mehr als 50 Jahren werden in der PTB hierzu nötige Messsysteme entwickelt, genutzt, verbessert und an neue Messaufgaben angepasst. Schon in den 50er- und 60er-Jahren des vergangenen Jahrhunderts erlaubte ein sogenanntes Einarm-Goniophotometer die Realisierung der Lichtstromeinheit *lumen* (lm) als direkte Ableitung von der SI-Basiseinheit *Candela* (cd) mithilfe von Lichtstärke-Normallampen. Später gestattete ein großes Kardan-Goniophotometer mit einem Messradius von 2,5 m die notwendige automatisierte, spiralförmige Bewegung eines Photometers bzw. eines Dreibereichsfarbmesskopfes. Für die Lichtstrom-Kalibrierungen von Kleinglühlampen, aber auch von zunehmend nachgefragten Messungen an LEDs wurde schon in den frühen 1980er Jahren ein sogenanntes Mini-Goniophotometer, ebenfalls als Kardan-

Goniophotometer, mit nur 0,3 m Messradius entwickelt und eingesetzt. Dieser Entwicklungsprozess hält an und ermöglicht heute die Kalibrierung auch modernster LED-Lichtquellen. Im Jahr 2006 wurde das erste Roboter-Goniophotometer im neuen Albert-Einstein-Gebäude der PTB in Betrieb genommen und ermöglicht seitdem die Kalibrierung nahezu beliebiger Lichtquellen mit der nötigen kleinen Messunsicherheit.

1 Einführung

Mehr als 11 % der elektrischen Energie werden heute in Deutschland für Beleuchtung eingesetzt, Tendenz steigend. Daher ist der Lichtstrom ökonomisch gesehen die wichtigste photometrische Größe. Es ist notwendig seine Einheit, das *Lumen* (lm), direkt von der SI-Basiseinheit für die Lichtstärke, der *Candela* (cd), abzuleiten. Dies geschieht regelmäßig mittels Goniophotometrie, um den Lichtstrom der zu untersuchenden Lichtquelle zu bestimmen. Obwohl auch absolut arbeitende Ulbricht-Kugel-Methoden existieren [1], benötigen diese, streng genommen, zumindest die relative räumliche Lichtstärkeverteilung, welche nur durch goniophotometrische Methoden messbar ist.

Das Prinzip der Goniophotometrie ist unabhängig von der technischen Realisierung der unterschiedlichen Goniophotometertypen. Ein Goniophotometer misst die räumliche Verteilung der Beleuchtungsstärke $E(r, \vartheta, \varphi)$ auf einer geschlossenen Hüllfläche mittels $V(\lambda)$ -angepasstem Photometer für alle Richtungen (ϑ, φ) der Lichtausstrahlung im vollen Raumwinkel (4π sr) um die Lichtquelle herum, wie Bild 1 zeigt.

Der Radiusvektor $r(\vartheta, \varphi)$ beschreibt die Position des Photometers in Kugelkoordinaten und $r(\vartheta, \varphi)$ durchstößt das zur Lampe gerichtete Eintrittsfenster immer orthogonal. Der Radiusvektor $r(\vartheta, \varphi)$ beschreibt auch die Entfernung zwischen Lampe und Photometer.

Der Winkel ϑ beschreibt die Position des Photometers zwischen den Polen traditionell im Bereich $(0 \leq \vartheta \leq \pi)$. Der Winkel φ beschreibt die Photometer-Position in der Äquator-Richtung

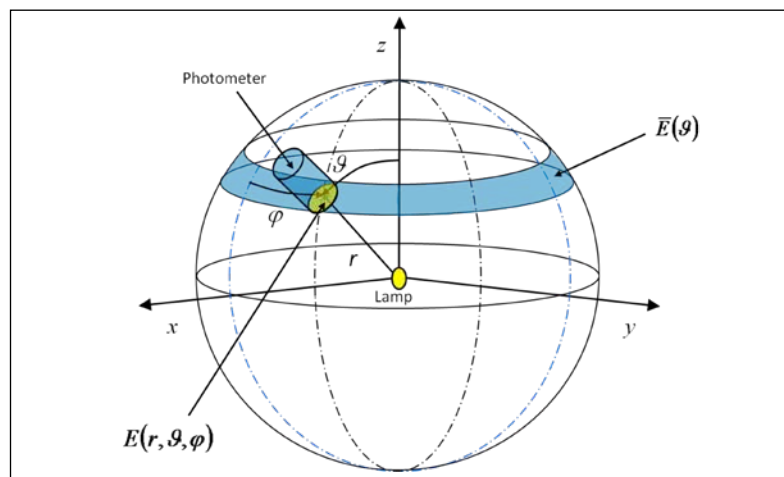


Bild 1:
Beleuchtungsstärke E als Funktion des Radiusvektors $r(\vartheta, \varphi)$

($0 \leq \varphi \leq 2\pi$). Der Wert des Lichtstroms Φ der Lampe kann aus der Beleuchtungsstärkeverteilung $E(\vartheta, \varphi)$ berechnet werden, entweder aus der Lichtstärke-Definition $I = d\Phi/d\omega$ oder aus der Definition der Beleuchtungsstärke $E = d\Phi/dA$.

$$\Phi = \int_{4\pi sr} I(\vartheta, \varphi) d\omega \quad (1)$$

$$\Phi = \int_{4\pi r^2} E(\vartheta, \varphi) dA \quad (2)$$

Das Raumwinkelelement $d\omega$ der Gleichung (1) ist gegeben durch

$$d\omega = \sin(\vartheta) d\vartheta d\varphi \quad (3)$$

und das Flächenelement dA der Gleichung (2) erhält man aus

$$dA = r^2(\vartheta, \varphi) \sin(\vartheta) d\vartheta d\varphi \quad (4)$$

Der Radius r des Radiusvektors $r(\vartheta, \varphi)$ kann als Konstante behandelt werden, da er sich gewöhnlich während einer goniophotometrischen Messung nicht ändert. Dann kann die Lichtstärkeverteilung $I(\vartheta, \varphi)$ durch Anwendung des photometrischen Grundgesetzes aus der Beleuchtungsstärkeverteilung $E(\vartheta, \varphi)$ bestimmt werden.

$$I(\vartheta, \varphi) = r^2 E(\vartheta, \varphi) \quad (5)$$

Falls die photometrisch wirksame Ausdehnung r_L der zu messenden Lampe deutlich kleiner ist als der Messradius r des Goniophotometers ist kann Gleichung (1) mit Gleichung (3) und $r = \text{const}$ wie folgt geschrieben werden:

$$\Phi = r^2 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} E(\vartheta, \varphi) \sin(\vartheta) d\vartheta \quad (6)$$

Andererseits führt Gleichung (2) mit Gleichung (4) und $r = \text{const}$ ebenfalls auf Gleichung (6). Aber für große Lampen könnte die Anwendung von Gleichung (5) zu fehlerhaften Ergebnissen führen ($r_L > r$), aber der ermittelte Wert des Lichtstroms entsprechend Gleichung (6) wäre korrekt, falls das Photometer das einfallende Licht mit dem Kosinus des Einfallswinkels bewertet.

2 Geschichte der Goniophotometer-Systeme in der PTB

Wie bereits teilweise in Abschnitt 1 diskutiert, sollte ein ideales Goniophotometer eine Reihe von Anforderungen erfüllen, wie die folgende Auflistung zeigt:

1. Kalibrierung der Photometer mittels Lichtstärke-Normallampen zur Sicherung der Rückführung auf die nationale Realisierung der Einheit *Candela*.
2. Ausführung einer Relativbewegung zwischen Lampe und Photometer, wobei sich ϑ -Achse und φ -Achse rechtwinklig schneiden.
3. Verwendung eines $V(\lambda)$ -angepassten Photometers zur Lichtstrommessung.
4. Automatische Messdatenanalyse.
5. Unabhängige Bestimmung des Lichtstromwertes von der räumlichen/spektralen Verteilung der gemessenen Bestrahlungsstärke $E_c(\lambda, \vartheta, \varphi)$ des Lichts.
6. Unabhängigkeit der Empfindlichkeit des Photometers von der Umgebungstemperatur bzw. Durchführung einer entsprechenden Korrektur.
7. Beliebige Betriebslage der zu untersuchenden Lampe.
8. Einstellbare Umgebungsbedingungen für Lufttemperatur und Luftfeuchte.
9. Geringer Streulichtanteil im Messraum bzw. Streulicht-Korrektur.
10. Elektrische Antriebe für die Bewegung der ϑ - und φ -Achsen.
11. Verwendung von Farbmessköpfen zur Bestimmung der räumlich wirksamen ähnlichsten Farbtemperatur und/oder Bestimmung der relativen räumlichen spektralen Verteilung der gemessenen Bestrahlungsstärke.
12. Messung ohne Bewegung der zu untersuchenden Lampe.
13. Vollständige Abtastung der Beleuchtungsstärke- bzw. Lichtstärkeverteilung der zu untersuchenden Lampe.
14. Ständige Überwachung des photometrischen Betriebsverhaltens der Lampe, um Alterung während der Messzeit erkennen bzw. korrigieren zu können (sogenanntes Monitorsystem).
15. Messraumwände sollen etwa auf Lufttemperatur sein, um den Strahlungsaustausch zwischen Entladungslampen und Wänden des Messraums zu stabilisieren.
16. Online-Streulichtkorrektur – insbesondere für ausgedehnte Lampen wie Leuchtstofflampen, da diese den Einsatz eines Streulichttubus mit größerem Gesichtsfeld erfordern.
17. Die Beleuchtungseinrichtung des Goniophotometerraums soll zur Messzeit abgedeckt und ausgeschaltet sein, um den Streulichtanteil nicht zu erhöhen.
18. Variation des Messradius r (Validierung von Nahfeld-/Fernfeld-Messungen mit abbildenden Systemen)

In der Goniophotometrie sind verschiedene Koordinatensysteme, wie Bild 1a zeigt, zu unterscheiden. Dies sind regelmäßig das Lampenkoordinatensystem *Lamp*, das Raumkoordinatensystem *Room* und

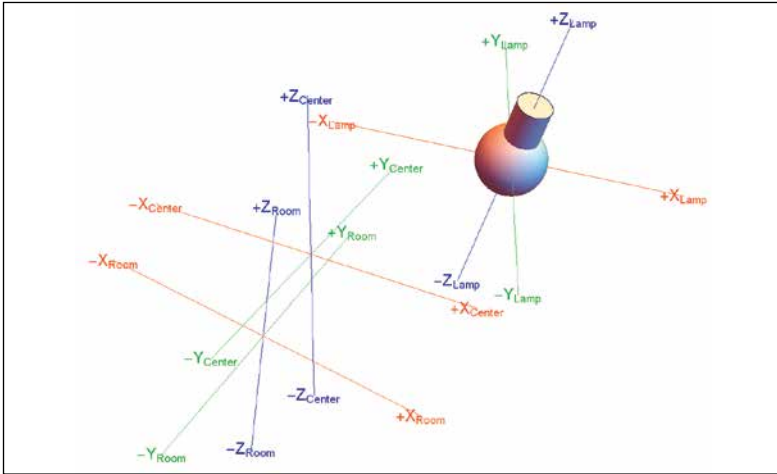


Bild 1a: Koordinatensysteme

das Goniophotometerkoordinatensystem bezogen auf dessen Zentrum *Center*. Bild 1a zeigt mögliche Offsets zwischen diesen Systemen in Translation und Rotation.

Um folgende Betrachtungen und Erklärungen zu vereinfachen werden die genannten Koordinatensysteme als deckungsgleich angenommen, das heißt, es werden keine Offsets in Translation und Rotationen zwischen den Koordinatensysteme vorausgesetzt.

Im Weiteren werden die Eigenschaften, Vor- und Nachteile der über Dekaden in der PTB entwickelten und genutzten Goniophotometer unter Berücksichtigung der gewünschten, vorstehend gelisteten Eigenschaften diskutiert. Es beginnt mit einem einfachen Einarm-Goniophotometer aus den 50er-Jahren des vergangenen Jahrhunderts und endet, zumindest vorläufig, mit dem State-of-the-art-Roboter-Goniophotometer, das 2007 in Betrieb ging.

2.1 Einarm-Goniophotometer (1950–1975)

In der Zeit von 1950 bis 1975 wurde ein manuell betriebenes Einarm-Goniophotometer nach Bild 2 benutzt. In den 50er-Jahren war diese Messapparatur noch mit einem *visuellen* Photometer ausgestattet. Dieses Photometer erlaubte die relative Messung von Beleuchtungsstärken mittels einer im Photometer installierten Hilfslampe in Verbindung mit einem optischen Abschwächer [2, Seite 321]. Die Rückführung auf die nationale Lichtstärke-Einheit, die *Candela*, war durch Kalibrierung des visuellen Photometers mit Lichtstärke-Normallampen sichergestellt (dies erfüllt Anforderung 1 der Anforderungsliste), entsprechend basieren auch Abstandsmessungen auf der nationalen Längeneinheit, dem *Meter*.

Wegen der Lageabhängigkeit der internen Hilfs-lampe im Innern des visuellen Photometer war es an einer festen Stelle der Messapparatur angebracht, wie Bild 2 zeigt. Ein Spiegel-Prismen-System leitete das Licht der zu untersuchenden Lampe auf das Photometer. Eine detaillierte Beschreibung ähnlicher Systeme kann [2, Seite 319] entnommen werden. Damit ist Anforderung 2 ebenfalls erfüllt.

Die vollständige Bestimmung des Lichtstroms Φ erfordert eine größere Anzahl Messungen von Beleuchtungsstärken für ebenso viele *manuell* eingestellte, unterschiedliche Kugelkoordinaten (ϑ, φ) . Wird die fiktive Kugel gemäß Bild 1 in ϑ -Richtung in parallele Zonen eingeteilt und jede dieser Zonen i ist wiederum in n Sektoren j gleicher Länge $(\Delta\varphi = \text{const})$ mit den zugehörigen Beleuchtungsstärken $E_{i,j}$ unterteilt, ist es möglich, die mittlere Beleuchtungsstärke \bar{E}_i jeder Zone i nach Gleichung 7 zu bestimmen

$$\bar{E}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n E_{i,j} \tag{7}$$

und der Wert des Lichtstroms Φ ergibt sich weiter aus der numerischen Integration nach Gleichung (8).

$$\Phi = 2\pi r^2 \sum_{i=0}^{m-1} (\cos(\vartheta_i) - \cos(\vartheta_{i+1})) \bar{E}_i \tag{8}$$

Die Anzahl der notwendigen Beleuchtungsstärkemessungen hängt von der räumlichen Lichtverteilungen der zu untersuchenden Lampe ab. Wegen der manuellen Einstellung des großen Arms (ϑ) , der Drehung der Lampe (φ) und des gleichfalls nötigen manuellen Abgleichs des visuellen Photometers ist diese Methode sehr zeitaufwendig. Sollen beispielsweise 600 Punkte gemessen werden (aus heutiger Sicht also nicht besonders viele) und man benötigt ca. 25 Sekunden pro Messung, werden also mehr als 4 Stunden benötigt, um eine

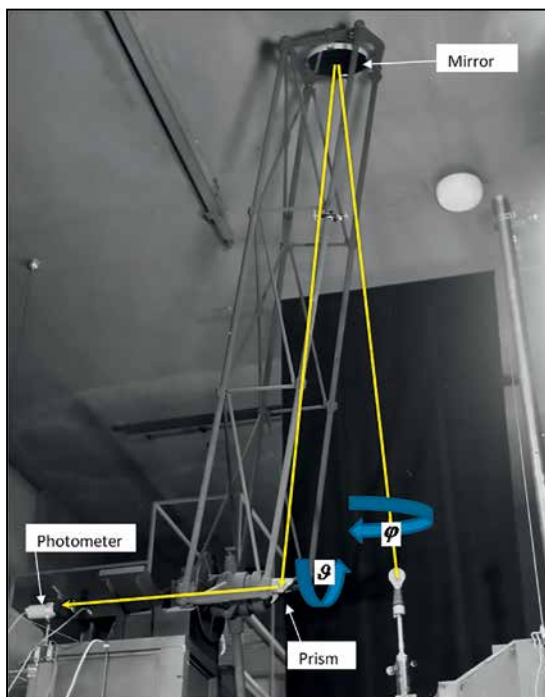


Bild 2: Einarm-Goniophotometer 1950–1975

Lampe mit relativ homogener räumlichen Lichtverteilung zu messen.

In 1963 wurde ein internationaler Lichtstromvergleich auf der Basis von Entladungslampen ohne Fluoreszenzstoff durchgeführt. Diese Lampen wiesen eine massive Inhomogenität ihrer räumlichen Lichtverteilung auf, sodass die beschriebene manuelle Methode wegen der nötigen hohen Anzahl von Messpunkten nicht praktikabel war. Zur Lösung dieses Problems, in [3] beschrieben, wurde das visuelle Photometer durch einen grob an $V(\lambda)$ -angepassten Photovervielfacher ersetzt, zusätzlich wurde die φ -Achse mit einem elektrischen Antrieb versehen und ein Präzisionskondensator ermöglichte die analoge Integration des Photostroms des Photovervielfachers. Damit konnte für jede der erforderlichen ϑ -Einstellungen des großen Arms der elektrische Antrieb der φ -Achse diese mit konstanter Winkelgeschwindigkeit rotieren lassen, während der Präzisionskondensator den Photostrom des Photovervielfachers integrierte. Nach etwa $t = 5$ min für eine Umdrehung repräsentierte die Ladung $Q = C \cdot U$ des Präzisionskondensators die mittlere Beleuchtungsstärke

$$\overline{E}_i = k \cdot C \frac{U}{t} \quad (9)$$

dieser gemessenen Zone i . Daraus berechnet sich der Lichtstrom wiederum gemäß Gleichung (8). Es ist nicht nötig, das Produkt $k \cdot C$ exakt zu kennen, da dies über das Kalibrierverfahren durch die bekannte Beleuchtungsstärke einer Lichtstärke-Normallampe eliminiert werden kann, es muss lediglich über die gesamte Messzeit hinweg konstant sein.

Später in den 1960er-Jahren wurde auch das visuelle Photometer durch ein modernes $V(\lambda)$ -angepasstes Photometer basierend auf gefilterten Silizium-Photodioden in Kombination mit einem Photostrom/Spannungswandler und einem x/y-Plotter ersetzt. Man erhielt so die Beleuchtungsstärkeverteilung jeder Zone, die sich dann leicht mit grafischen oder numerischen Verfahren integrieren ließ. Es wird später gezeigt werden, dass diese verwendete „analoge Zonenintegration“ sehr ähnlich der heutigen digitalen zonalen Bewertung ist.

Diese letzten 2 Verbesserungen erfüllen die Anforderung 3 und teilweise auch die Anforderung 4.

2.2 Kardan-Goniophotometer (1976–2007)

Das existierende Einarm-Goniophotometer war immer auf eine „helfende Hand“ angewiesen, um es von Punkt zu Punkt zu bewegen. Die anschließende Berechnung des Lichtstroms wurde grundsätzlich ebenfalls händisch ausgeführt. Dieses Ver-

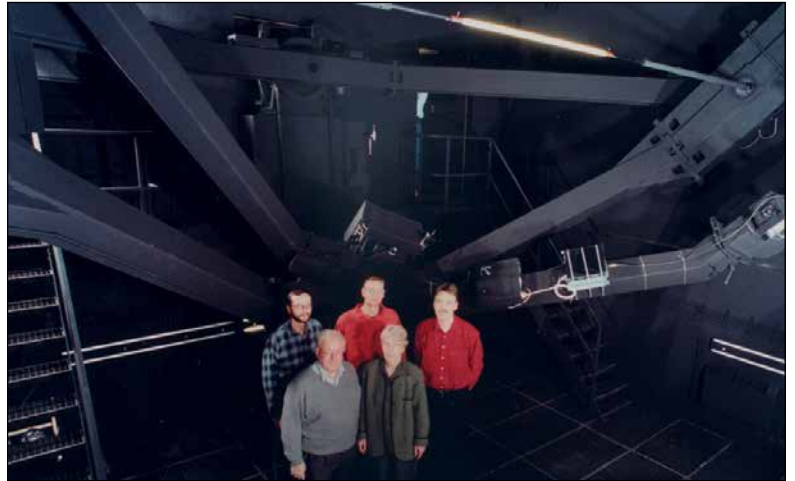


Bild 3:
Kardan-Goniophotometer 1976–2007

fahren war dementsprechend sehr zeitaufwendig und der zunehmende Wunsch der Industrie, auch große Objekte, wie z. B. lange Leuchtstofflampen, aber später auch sehr kleine Mikrolampen und erste LEDs, zu kalibrieren, führte zur Entwicklung sogenannter Kardan-Goniophotometer verschiedener Ausführungen.

2.2.1 Großes Kardan-Goniophotometer

Nach der intensiven Umgestaltung einiger Räume im Kösters-Bau der PTB war es möglich, im neuen Goniophotometeraum ($7 \times 10 \times 8 \text{ m}^3$) das Kardan-Goniophotometer [4] zu installieren. Bild 3 zeigt das große Kardan-Goniophotometer. Am Bildoberrand ist eine zu kalibrierende stabförmige Leuchtstofflampe zu sehen.

Dieser Raum war zusätzlich auch mit einer regelten elektrischen Heizung ausgestattet, um die geforderten Messbedingungen bezüglich Umgebungstemperatur einstellen zu können. Im Prinzip besteht ein Kardan-Goniophotometer, wie in Bild 4 gezeigt, aus 3 Rahmen wobei der äußere α -Rahmen der räumlichen Ausrichtung (durch Drehung um die y -Achse) der zu untersuchenden Lampe dient. Innerhalb dieses äußeren α -Rahmens ist der mittlere φ -Rahmen endlos drehbar um die z -Achse gelagert. Der innere ϑ -Rahmen ist wiederum drehbar im φ -Rahmen gelagert, jedoch ist seine Bewegung auf knapp 180° durch den nötigen Lampenhalter begrenzt. Alle 3 Rahmen sind mechanisch ausgeglichen und mit elektrischen Antrieben versehen. Ihre Rotationsgeschwindigkeiten waren per 10-Gang-Präzisionspotentiometer einstellbar, eine Folge der angewandten analogen Regelung der Achsantriebe. Die Winkelbestimmung der Achsen erfolgte mittels 13-bit-Winkelencodern. Das Photometer war am ϑ -Rahmen (Bild 4) platziert und ermöglichte so einen festen Messradius von 2500 mm. Es bestand die Möglichkeit, ein zweites Photometer

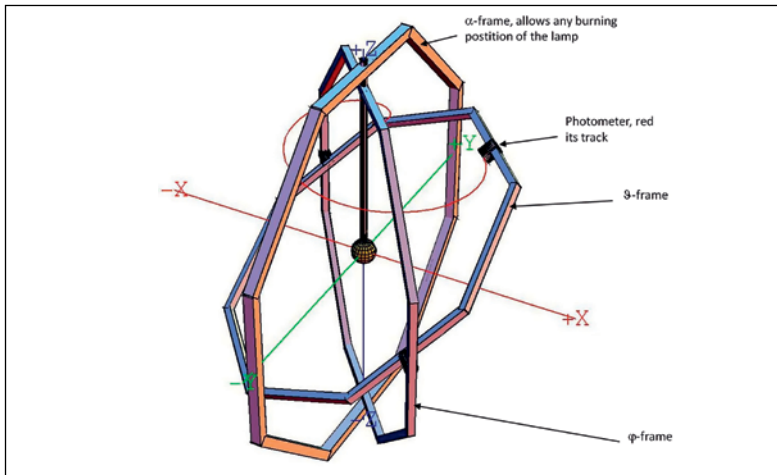


Bild 4: Großes Kardan-Goniophotometer 1976–2007

oder einen Farbmesskopf auf der gegenüberliegenden Seite des ϑ -Rahmens einzusetzen.

In diesem Fall war der Arbeitsbereich limitiert im Bereich $4^\circ \leq \vartheta \leq 176^\circ$, da jeweils Lampenhalter von rechts und links zur Aufnahme einer beispielsweise stabförmigen Leuchtstofflampe eingesetzt werden konnten (siehe auch Bild 3). Im Falle von einseitig gesockelten Lampen wurde meist nur ein Photometer/Farbmesskopf verwendet, was eine Drehung der gegenüberliegenden Messkopfaufnahme um 90° ermöglichte. Diese sogenannte „Kröpfung“ ließ dann Raum für den nun einseitigen Lampenhalter und der Arbeitsbereich vergrößerte sich zu $0^\circ \leq \vartheta \leq 176^\circ$.

Entsprechend der Gleichung (6) muss die gemessene Beleuchtungsstärkeverteilung über den vollen Raumwinkel 4π sr zum Wert des Lichtstroms integriert werden. So ist es naheliegend, digitale, über die Zeit integrierende Methoden, zur Erfassung und Speicherung der gemessenen Beleuchtungsstärkewerte zu verwenden. Bild 5 zeigt den Signalfluss. Sowohl Photometer- und/oder Farbmesskopf als auch Photostrom-/Fre-

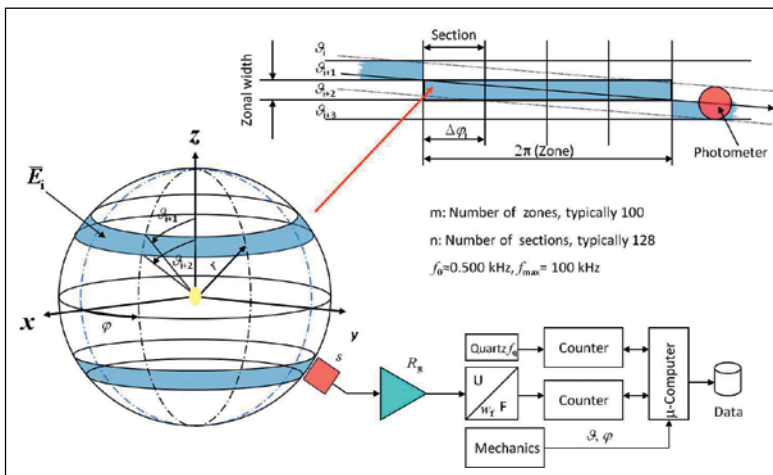


Bild 5: Signalfluss

quenz-Wandler waren temperaturstabilisiert.

Der Photostrom des Photometers mit seiner photometrischen Empfindlichkeit s , normalisiert auf die CIE-Lichtart A, wird mittels Rückkopplung R_g eines Photostromverstärkers in eine Spannung U gewandelt und weiter durch einen Spannungs-Frequenzwandler in eine Frequenz f mit dem zugehörigen Wandlungsfaktor w_f konvertiert. Diese Frequenz wird letztlich von einem digitalen Zähler kontinuierlich gezählt. Simultan wird die Quarz-Frequenz f_q durch einen zweiten digitalen Zähler erfasst, um während der späteren Datenanalyse die ursprünglichen Photoströme berechnen zu können. Diese Methode stellt damit die schon erwähnte Signal-Zeit-Integration sicher.

Die die zu untersuchende Lampe umgebene fiktive Kugel ist, wie Bild 5 zeigt, in Zonen und Sektoren unterteilt. Infolge der analogen Geschwindigkeitsregelung der zwei bewegten Rahmen sind positive und negative Beschleunigungsphasen am Anfang und am Ende einer vollständigen Abtastung und Lastreaktionen des rotierenden Systems und die damit verbundenen geringen Gleichlaufschwankungen unvermeidbar. Die Unterteilung jeder Zone in Sektoren mit der Länge $\Delta\varphi_j$ als Gewichtung reduziert jedoch diesen Einfluss. Damit berechnet sich die mittlere Beleuchtungsstärke \bar{E}_i nach Gleichung (10)

$$\bar{E} = \frac{1}{2\pi \cdot (s \cdot w_f \cdot R_g)} \cdot \sum_{j=1}^n \Delta\varphi_j \cdot \left(f_q \frac{\Delta y_{i,j}}{\Delta t_{i,j}} - f_0 \right) \quad (10)$$

mit der Dunkelfrequenz f_0 (Photometer abgeschattet) und den Differenzsignal-Zählungen Δy_{ij} und den Differenzzeit-Zählungen Δt_{ij} jeweils vom Sektoranfang bis zum Sektorende. Wiederum könnte der Lichtstrom nach Gleichung (8) bestimmt werden, jedoch werden jetzt noch Korrekturfaktoren für das Streulicht c_{str} , der spektralen Fehlanpassung des Photometers c_{spec} und Abweichungen von den nominalen elektrischen Betriebsbedingungen c_{elec} eingeführt, wie nun Gleichung (11) zeigt:

$$\Phi = c_{str} \cdot c_{spec} \cdot c_{elec} \cdot 2\pi r^2 \cdot \sum_{i=0}^{m-1} (\cos \vartheta_i - \cos \vartheta_{i+1}) \cdot \bar{E}_i \quad (11)$$

Im Verlauf einer Lichtstrommessung werden neben dem Photometer auch die Wände des Messraums von der zu untersuchenden Lampe beleuchtet. Diese Beleuchtung wird ebenfalls vom im Goniophotometer verwendeten Photometer „gesehen“ und führt zu einer Streubeleuchtung auf dem Lichteintrittsfenster dieses Photometers. Diese Streubeleuchtung hängt einerseits vom Reflexionsgrad der verwendeten Wandfarbe ($\rho \approx 3\%$) und vom Gesichtsfeld des sich vor dem

Photometer befindlichen Streulichtreduzierungs-tubus ab. Daher muss für jeden eingesetzten Tubus mit seinem individuellen Gesichtsfeld der wirksame spezifische Streulichtkorrekturfaktor c_{str} bestimmt werden. Diese können ermittelt werden, indem Blenden mit unterschiedlichen Durchmessern zwischen der zu untersuchenden Lampe und dem Photometer während normalen Lichtstrommessungen positioniert werden. Eine detaillierte Beschreibung kann [5] entnommen werden.

Die technische Realisierung eines Photometers ist immer nur eine Näherung für $V(\lambda)$. Dies bedeutet, dass im Prinzip in allen Fällen diese spektrale Fehlanpassung korrigiert werden muss. Allgemein kann der spektrale Korrekturfaktor c_{str} für alle Lampen mit beliebiger Strahlungsfunktion $S(\lambda)$ nach Gleichung (12) bestimmt werden.

$$c_{\text{spek}} = \frac{\int V(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda}{\int s_{\text{rel}}(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda} \bigg/ \frac{\int V(\lambda) \cdot P(\lambda, T_A) d\lambda}{\int s_{\text{rel}}(\lambda) \cdot P(\lambda, T_A) d\lambda} \quad (12)$$

Hierzu ist jedoch die Kenntnis der relativen spektralen Empfindlichkeit $s_{\text{rel}}(\lambda)$ des Photometers notwendig. $P(\lambda, T_A)$ bezeichnet dabei einen Planckstrahler mit einer Verteilungstemperatur von $T_A = 2856$ K.

Im Fall von Glühlampen ist ein etwas einfacher Weg für diese Korrektur ohne die Kenntnis von $s_{\text{rel}}(\lambda)$ möglich. Gleichung (13) beschreibt die Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke $E(T)$ von der Verteilungstemperatur T

$$E(T) = \frac{y(T)}{s} \left(\frac{T}{T_A} \right)^{m_y} \quad (13)$$

eines gemessenen Photostroms $y(T)$ und der photometrischen Empfindlichkeit s des Photometers für Lichtart A. Eine charakteristische Eigenschaft des Photometers ist der Exponent m_y , „ y^α “ indiziert den Exponent für ein $V(\lambda)$ - angepasstes Photometer oder den y -Kanal eines Dreibereichsfarbmesskopfes, wobei die anderen Kanäle unterschiedliche Werte für diese Exponenten haben. Ein ideales Photometer würde einen Wert von 0 für diese Exponenten aufweisen. Beispielsweise beschreibt $m_y = 0.018$ ein qualitativ durchaus gutes Photometer. Der Exponent m_y (und auch m_x und m_z) können aus einem Fit bekannter Paare $(E(T), T)$ einer Lichtstärke-Normlampe bei verschiedenen Arbeitspunkten, wie in [6, 7] beschrieben, gefunden werden. Damit kann der Korrekturfaktor c_{spec} für Glühlampen wie folgt geschrieben werden.

$$c_{\text{spec}} = \left(\frac{T}{T_A} \right)^{m_y} \quad (14)$$

Werden Glühlampen in der Nähe von CIE-Lichtart A betrieben, ist die Korrektur auf elektrische Nominalbedingungen c_{elec} ebenfalls nach Gleichung (15) sehr einfach, da der Lichtstrom eine Funktion des Betriebsstroms J ist.

$$c_{\text{elec}} = \left(\frac{J}{J_0} \right)^{-m_j} \quad (15)$$

Hier ist J_0 der Nominalstrom und $m_j \cong 6.84$. Mehr Information kann in [7] gefunden werden.

Die Datenanalyse für einen Dreibereichsfarbmesskopf erfolgt in gleicher Weise und man erhält die Normfarbwertanteile (x, y) aus den Gleichungen (16, 17).

$$x = \frac{\Phi_X}{\Phi_X + \Phi_Y + \Phi_Z} \quad (16)$$

$$y = \frac{\Phi_Y}{\Phi_X + \Phi_Y + \Phi_Z} \quad (17)$$

Leider konnten nur der Lichtstrom und die zugehörigen Normfarbwertanteile bestimmt werden, da aufgrund der geringen Speichermöglichkeit der verwendeten Computertechnik die räumliche Information verloren ging.

Daher wurden im Jahre 1991 alle Computer, Analogsysteme, die Verdrahtung und viele weitere Elemente durch moderne Ausrüstung ersetzt. Von nun an konnten *alle* Rohdaten mittels geeigneter Speichermedien dauerhaft bewahrt werden. Das galt auch für große Datenmengen des ab 1997 eingesetzten Array-Spektrometers zur Messung der relativen spektralen Leistungsverteilung der Strahlung synchron zur Lichtstrombestimmung. Leider wiesen Photometer und Einkoppeloptik des Array-Spektrometers unterschiedliche Gesichtsfelder auf und hatten etwas unterschiedliche Positionen auf dem Goniophotometer, was die Datenanalyse komplizierte. Dennoch konnten erstmalig räumliche, spektrale Informationen über zu untersuchende Lampen ermittelt werden. Damit erfüllte das große Kardan-Goniophotometer in seiner Ausbaustufe von 1997 die Anforderungen 1–14 aus Abschnitt 2. Die relative erweiterte Messunsicherheit für den Lichtstrom für $k = 2$ betrug jetzt 0,60 %.

2.2.2 Kleines Kardan-Goniophotometer

Für die Messung kleiner Lampen und LEDs wurde in den frühen 1980er-Jahren ein dem großen Kardan-Goniophotometer sehr ähnliches kleines Kardan-Goniophotometer mit einem Messradius von nur 300 mm entwickelt, hergestellt und

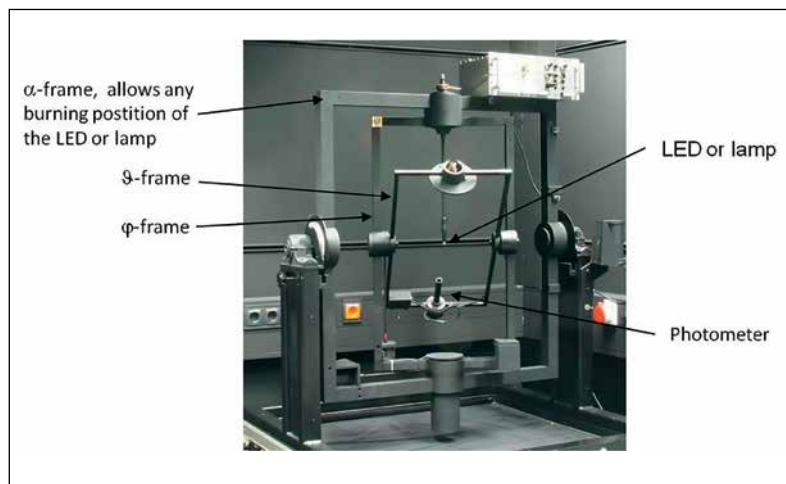


Bild 6:
Kleines Kardan-Goniophotometer 1982–2007

betrieben. Das Foto in Bild 6 zeigt dieses seinerzeit sogenannte „Mini-Goniophotometer“.

Die Messtechnik entsprach nahezu vollständig dem großen Kardan-Goniophotometer bis hin zum Signalfluss einschließlich Spannungsfrequenzwandler und nachgeschalteten Zählern. Damit sind alle Aspekte dieser Apparatur bereits in Abschnitt 2.2.1 diskutiert.

Im Jahre 2007 wurde dieses Instrument durch ein spezielles Goniophotometer für die Messung von LEDs ersetzt siehe auch Kapitel *Metrologie für moderne Lichtquellen: LEDs und OLEDs* [10].

2.3 Roboter-Goniophotometer (2006 bis heute)

Am Ende der 1990er-Jahre wurde die Planung eines neuen Goniophotometertyps mehr und mehr konkret. Nahezu gleichzeitig entschied sich die PTB für den Neubau eines modernen Gebäudes für die Abteilung Optik, dem heutigen Albert-Einstein-Bau. Infolge dieses Zusammentreffens

beider Ereignisse konnte bei der Planung das neue Gebäude quasi um das neue Roboter-Goniophotometer herum geplant und später auch so gebaut werden.

In 1995/1996 zeigte G. Sauter, dass Goniophotometrie mittels Robotern möglich ist und erhebliche Vorteile gegenüber den bisher verwendeten Kardan-Goniophotometern aufweist [8]. Wie weiterhin in [8] beschrieben sind sogenannte Service-Roboter gut geeignet, um ein Roboter-Goniophotometer zu realisieren. Diese zeichnen sich durch eine schlanke Konstruktion mit langen Armen bei gleichzeitig relativ geringem Gewicht aus. Sie verfügen über eine hohe Flexibilität, um beispielsweise ein Photometer auf gewünschten Bahnen mit unterschiedlichen Radien ($1000 \text{ mm} \leq r \leq 3000 \text{ mm}$) auf der fiktiven Kugeloberfläche um die Lampe herumzuführen. Jeder Roboter verfügt über 7 Freiheitsgrade (engl. *seven degrees of freedom*, 7 DOF). Dies garantiert die notwendige Flexibilität und das erforderliche Arbeitsvolumen. Zur Abdeckung des vollen Raumwinkels $4\pi \text{ sr}$ sind daher 2 der beschriebenen Roboter notwendig. Ein dritter, ähnlicher Roboter positioniert dabei die zu untersuchende Lampe in der gewünschten Brennstellung im Raum. Alle Roboter-Basen sind direkt mit dem Stahlbeton des Gebäudes verbunden, um eine langzeitstabile räumliche Positionierung der Roboter zu gewährleisten. Bild 8 zeigt das Roboter-Goniophotometer während der Messung einer LED-Signalleuchte.

Im Gegensatz zu Kardan-Goniophotometern ist der Messradius variabel, in dem alle 7 Achsen in entsprechende Positionen gebracht werden. Wegen der großen Redundanz eines 7-DOF-Roboters kann die Zielposition einschließlich Orientierung durch eine sehr große Anzahl unterschiedlicher Einstellungen der 7 Achsen erreicht werden. Daher wird eine Strategie benötigt, um die jeweilige Achseinstellung zu finden. Diese

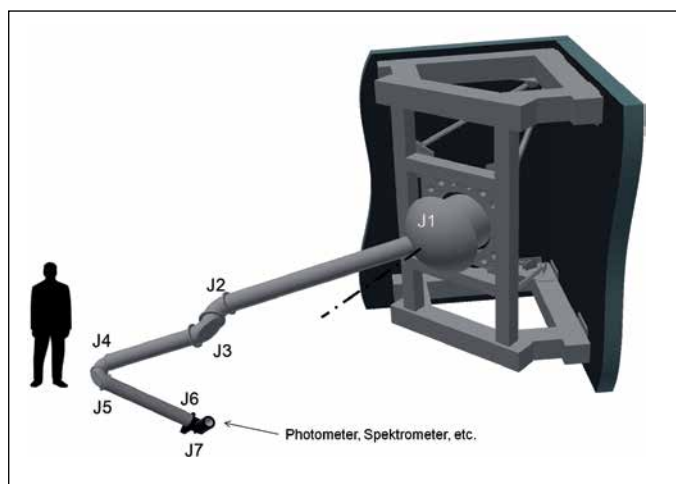


Bild 7:
Arm des Roboter-Goniophotometers



Bild 8:
Roboter-Goniophotometer 2006 bis heute

Strategie ist relativ simpel. Sie besagt, dass alle Achseinstellungen derart gefunden werden, dass sämtliche Bestandteile des Roboters einen maximalen Abstand zum Zentrum des Roboters haben sollen, um das von der Roboterstruktur reflektierte Streulicht möglichst gering zu halten. Eine besondere Software ist notwendig, um alle Achswinkel, ausgedrückt in *counts* jedes Winkelencoders, für jede Achse zu bestimmen um die gewünschten Kugelkoordinaten (r, ϑ, φ) anzufahren. Während der Messung der zu untersuchenden Lampe liest das Roboter-Kontrollsystem alle 10 ms diese *counts* jeder Achse und versucht, jede Achse entsprechend diese Vorgabe einzustellen. Nach dieser Einstellung, welche für alle 7 Achsen gleichzeitig erfolgt, werden die Ist-Winkel jeder Achse wiederum in *counts* synchron gelesen und mit den zugehörigen photometrischen Daten und elektrischen Daten des Lampenbetriebs in eine Datenbank gespeichert. Prinzipiell ist der Signalfluss dem des in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen großen Kardan-Goniophotometers sehr ähnlich. Aber es gibt ein zusätzliches wichtiges Element, den sogenannten Zeitstempel. Da ein weit verteiltes Datenerfassungssystem vorliegt, wird ein Mechanismus zur Datensynchronisierung in Form eines 1-Mhz-Taktes verwendet. Dieser ist im gesamten System verfügbar. Beim Messungsstart synchron gestartete Zähler erlauben daher die spätere Synchronisierung aller angefallenen Daten. Wie beschrieben ist die Position jeder Achse und damit die Position und Orientierung des Photometers das Ergebnis eines Regelprozesses. Somit ist es notwendig, die tatsächliche Position und Orientierung des Photometers aus den gespeicherten Daten der Winkelencoder zu berechnen.

In der Robotik ist es üblich, einen Roboter des

verwendeten Typs wie eine biegesteife mechanische Kette mit sogenannten *Denavit-Hartenberg-Parametern* (DH-Parameter) zu beschreiben [9]. Die Tabelle 1 zeigt diese DH-Parameter am Beispiel des Roboters 1.

Mit diesen Parametern und den aktuellen Winkeln θ_i für jede Achse ist die Berechnung der Position bzw. Orientierung der siebten Achse in Basis-Koordinatensystem des Roboters möglich. Hierzu werden 7 Matrizen nach Gleichung (18) verwendet. Jede Matrize beschreibt die Position (blau) und Orientierung (grün) jeder einzelnen Achse.

$$T_i = \begin{pmatrix} \cos(\Delta\theta_i + \theta_i) & -\sin(\Delta\theta_i + \theta_i) \cos \alpha_i & \sin(\Delta\theta_i + \theta_i) \sin \alpha_i & a_i \cos(\Delta\theta_i + \theta_i) \\ \sin(\Delta\theta_i + \theta_i) & \cos(\Delta\theta_i + \theta_i) \cos \alpha_i & -\cos(\Delta\theta_i + \theta_i) \sin \alpha_i & a_i \sin(\Delta\theta_i + \theta_i) \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (18)$$

Die Positionierung/Orientierung der Achse 7 ergibt sich aus dem Vektorprodukt $T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_4 \cdot T_5 \cdot T_6 \cdot T_7$.

Um jedoch die Koordinaten in Bezug auf das Koordinatensystem der fiktiven Kugel zu erhalten, müssen 2 weitere ähnliche Matrizen verwendet werden. Die sogenannte *Base Frame Matrix F* beschreibt die Positionierung und Orientierung des Roboter-Koordinatensystems zum Koordinatensystem der fiktiven Kugel, während die Matrix *W* die Positionierung und Orientierung des Photometers zur Achse 7 beschreibt. Nun lässt sich die Position und Orientierung des Photometers P^* im Koordinatensystem der fiktiven Kugel mit Gleichung (19) beschreiben.

$$P^* = F \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_4 \cdot T_5 \cdot T_6 \cdot T_7 \cdot W \quad (19)$$

Tabelle 1: DH-Parameter von Roboter 1

| axis ⁱ | $\Delta\theta_i$ offset to rotation around Z-axis | α_i rotation around X-axis | d_i translation in Z-axis | α_i translation in X-axis |
|-------------------|---|---|--------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | -1.438° | 45.024° | 0.000 mm | -0.400 mm |
| 2 | 191.088° | -90.026° | 2686.322 mm | 0.696 mm |
| 3 | 178.585° | 89.996° | 274.088 mm | 0.781 mm |
| 4 | 6.229° | -90.022° | 1410.499 mm | 0.474 mm |
| 5 | -0.141° | -89.955° | 173.036 mm | -0.779 mm |
| 6 | -0.924° | 90.032° | 1191.007 mm | 0.223 mm |
| 7 | 180.443° | 90.007° | 91.130 mm | 0.000 mm |

Bild 9 zeigt die Achsenkoordinatensysteme (1..7), das Base-Frame-Koordinatensystem und das Koordinatensystem des Photometers zur Achse 7 in schematischer Weise. Das Koordinatensystem der fiktiven Kugel fällt mit dem Zentrum des Goniophotometers zusammen und wird mit *Center* bezeichnet. *P** ist jetzt auf dieses *Center*-Koordinatensystem bezogen. Zusätzlich ist eine typische Bahn eingezeichnet. Wegen des allerdings nicht dargestellten Lampenhalters ist diese Bahn im oberen Bereich verdichtet, um eine Kollision mit dem Lampenhalter zu vermeiden. Wie bereits erwähnt, setzt die Verwendung von Gleichung (19) einen biegesteifen Roboter voraus, der in der Praxis nicht existiert. *P** ist also von statischen Gewichtskräften des Roboters, dynamischen Kräften infolge der Bewegung, als auch von thermischen Längenänderungen überlagert. Daher muss Gleichung (19) um eine entsprechende Korrektur *C* erweitert werden. Gleichung (20) zeigt nun das endgültige Modell zur Bestimmung von *P*.

$$P = C\left(\theta_1 \dots \theta_7, \frac{d\theta_1}{dt} \dots \frac{d\theta_7}{dt}, T_{amb}, R\right) \cdot F \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_4 \cdot T_5 \cdot T_6 \cdot T_7 \cdot W \tag{20}$$

wobei $C\left(\theta_1 \dots \theta_7, \frac{d\theta_1}{dt} \dots \frac{d\theta_7}{dt}, T_{amb}, R\right)$

diese finale Korrektur basierend auf den Winkeln $\theta_1 \dots \theta_7$ aller Achsen, ihren zeitlichen Ableitungen

$$\frac{d\theta_1}{dt} \dots \frac{d\theta_7}{dt}$$

und der Umgebungstemperatur T_{amb} beschreibt.

Der letzte Parameter *R* steht für einen großen Datensatz und beschreibt Eigenschaften des Roboters wie Abmessungen, Teilmassen usw. Die Berechnung von *C*() ist aufwendig und wurde vom Hersteller des Roboters ausgeführt. Aus Gründen des Wettbewerbs muss diese Berechnung vertraulich behandelt werden und kann daher hier nicht veröffentlicht werden. Jedoch kann die Wirkung von *C*() beispielhaft auf den Messradius mitgeteilt werden (siehe Bild 10).

Die nötige Radiuskorrektur r_{corr} bewegt sich im Bereich $-2 \text{ mm} < r_{corr} < 3 \text{ mm}$ je nach Position (θ, φ) des Photometers. Der Äquatorbereich benötigt eine größere Korrektur infolge hier wirksamer größerer Zentrifugalkräfte als die Polregion. Der Radius selbst lässt sich dann aus der Positionssubmatrix von *P* bestimmen.

Der Signalfluss stimmt im Wesentlichen mit dem wie in Bild 5 gezeigt überein. Prinzipiell kann der Lichtstrom mit den Gleichungen (11) und (10) berechnet werden, da aber nun 2 Photometer benutzt werden, muss dies für jede Hemisphäre, also für jeden Roboter, separat geschehen. Die Gleichungen (21) und (22) demonstrieren das

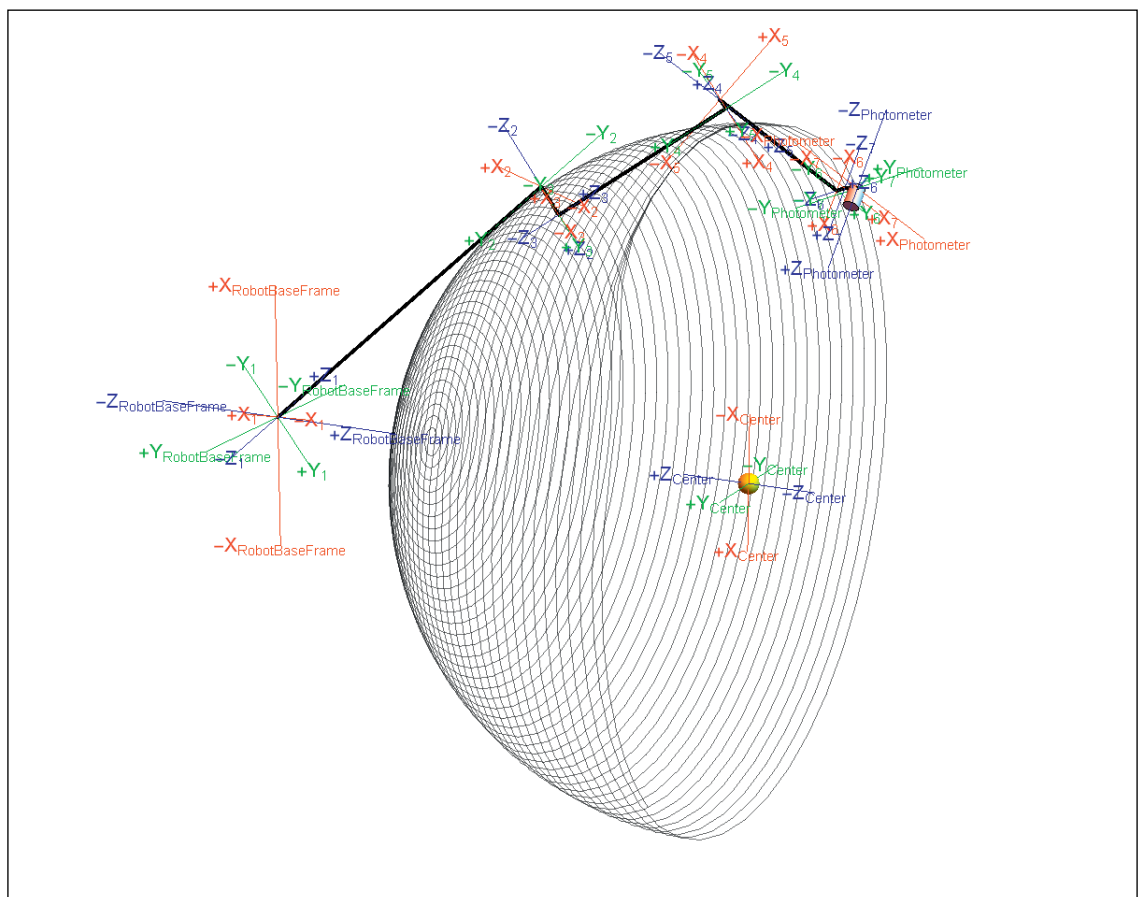


Bild 9:
Koordinatensystem
des Roboter-Gonio-
photometers und
Beispielbahn

für Roboter 1. Der Radius $r_{1,i}$ befindet sich dabei innerhalb der Summation von Gleichung (22). Das Roboter-Goniophotometer ist zusätzlich mit einem Monitorphotometer ausgerüstet. Dieses Photometer wird während der Messung nicht bewegt, ist aber ständig von einem fixen Punkt aus auf die zu untersuchende Lampe gerichtet und erlaubt somit die Korrektur einer möglichen Alterung der Lampe während des Messprozesses als Funktion der Zeit ($c_{\text{mon}}(t_{1,i})$).

$$\bar{E}_{1,i} = \frac{1}{2\pi (s_1 w_{1,f} R_{1,g})} \cdot \sum_{j=1}^{n_1} \Delta\varphi_{1,j} \left(f_q \frac{\Delta y_{1,i,j}}{\Delta t_{1,i,j}} - f_{1,0} \right) \tag{21}$$

$$\Phi_1 = c_{1,\text{str}} \cdot c_{1,\text{spec}} \cdot 2\pi \cdot \sum_{i=0}^{m_1-1} r_{1,i}^2 \cdot c_{\text{mon}}(t_{1,i}) \cdot (\cos\vartheta_{1,i} - \cos\vartheta_{1,i+1}) \cdot \bar{E}_{1,i} \tag{22}$$

Roboter 2 wird in gleicher Weise behandelt und der Lichtstrom ergibt sich somit aus der Summe von Φ_1 und Φ_2 korrigiert mit dem elektrischen Korrekturfaktor c_{elec} aus Gleichung (15).

$$\Phi = c_{\text{elec}} \cdot (\Phi_1 + \Phi_2) \tag{23}$$

Die Bestimmung der Streulichtkorrektur c_{str} unterscheidet sich methodisch von jener des Kardan-Goniophotometers. Es ist schwierig, Blenden zwischen Photometer und Lampe zu positionieren wie in [5] beschrieben. Hier wird die Streulichtkorrektur c_{str} direkt aus der Leuchtdichteverteilung auf den Wänden des Messraums bestimmt. Mit der Kenntnis der geometrischen und photometrischen Eigenschaften des Raumes, der räumlichen Lichtstärkeverteilung der Lampe und dem verwendeten Streulichttubus vor dem Photometer ließe sich die Streulichtkorrektur c_{str} berechnen. Hier jedoch wird diese Korrektur mit sogenannten *Back-Looking-Photometern* bestimmt [11].

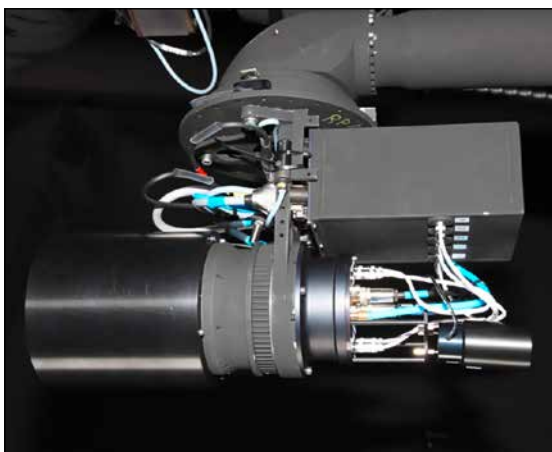


Bild 11: Photometer (links) und *Back-Looking-Photometer* (rechts)

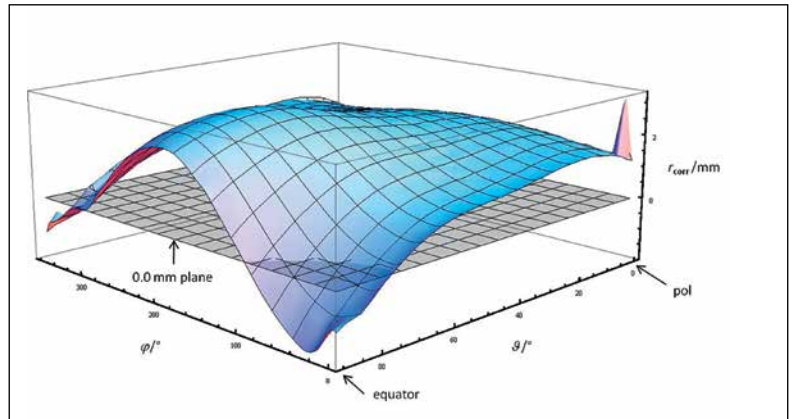


Bild 10: Wirkung der Radiuskorrektur

Bild 11 zeigt ein Foto der „Roboterhand“ mit montiertem Photometer und *Back-Looking-Photometer*. Letzteres ist ein wenig schräg ausgerichtet, um nicht im Bereich des Schattenwurfs des Photometers auf den Wänden zu messen.

Bild 12 zeigt beispielhaft eine typische, in finite Flächenelemente gerasterte Streulichtsituation im Goniophotometermessraum, wie sie durch die zu untersuchende Lichtquelle generiert wird. Dieses Beispiel arbeitet mit finiten Flächen der Größe $0,5 \text{ m} \cdot 0,5 \text{ m}$, um die Flächen sichtbar zu machen. Zur realen Berechnung werden Flächen der Größe $0,1 \text{ m} \cdot 0,1 \text{ m}$ verwendet. Natürlich ist der Streulichtanteil auf der aktiven Fläche des

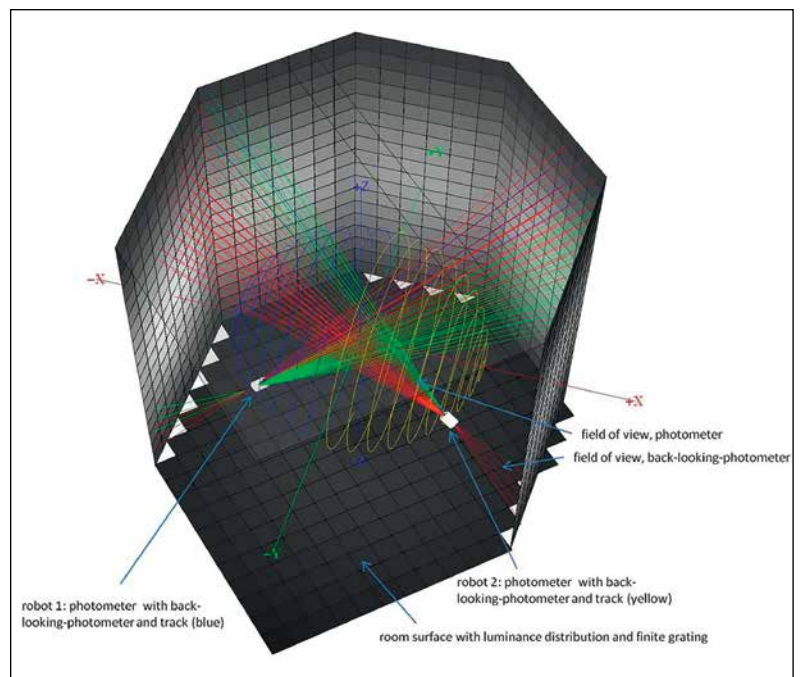
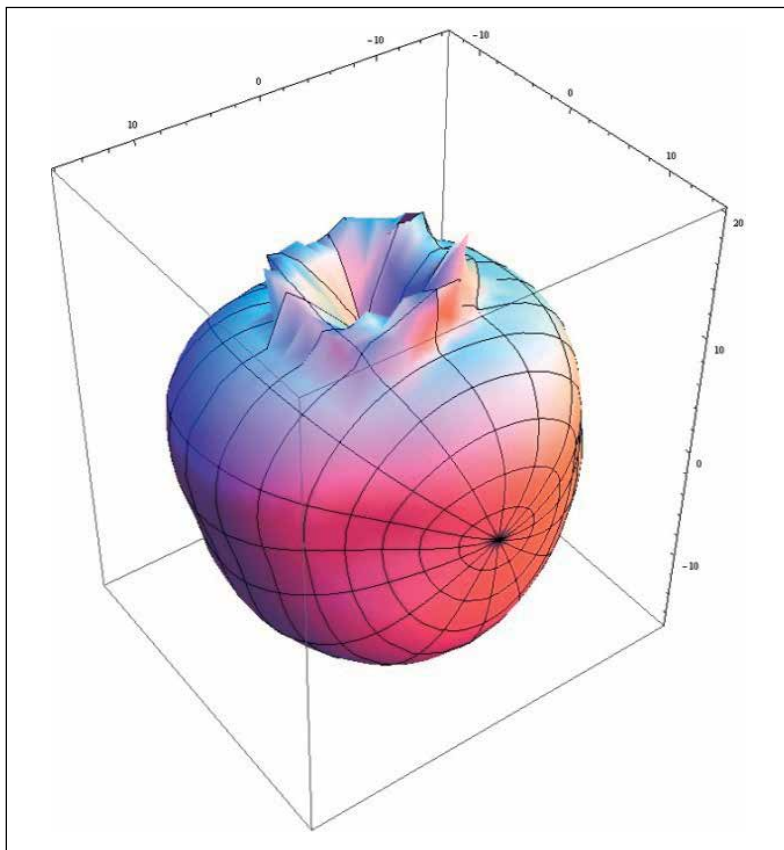


Bild 12: Wirkung des Streulichts und seine Bestimmung



Photometers eine Funktion des Gesichtsfeldes des jeweils verwendeten Streulichttubus vor dem Photometer. Derzeit werden 2 Tuben, je nach Größe der Lichtquelle, mit Öffnungswinkeln von ca. 15° und ca. 22,5°, verwendet. Ihre typischen Korrekturwerte betragen etwa 0,9995 und 0,9990. Da jeder Messroboter mit diesem *Back-Looking-Photometer* ausgerüstet ist, kann so der Streulichtanteil für jedes Photometer bestimmt werden. Da die *Back-Looking-Photometer* „rückwärts“ gerichtet sind, wird also jeweils die Streulichtkorrektur für den gegenüberliegenden Messroboter bestimmt. Damit ist es möglich, den Wert des Lichtstroms mit zugehöriger Messunsicherheit zu bestimmen. Tabelle 2 illustriert Ergebnisse einer vereinfachten *Monte-Carlo-Simulation* (MC) am Beispiel einer OSRAM-Wi4-Lichtstrom-Normallampe. Ihre Lichtstärkeverteilung ist in Bild 13 wiedergegeben.

Die MC basiert auf den folgenden Gleichungen (24), Werte der wichtigsten Beiträge zur Messunsicherheit können der Tabelle 2 entnommen werden.

Eine detailliertere Beschreibung der Roboter und Analyse der Messunsicherheit kann [12] entnommen werden.

Bild 13: Räumliche Lichtstärkeverteilung einer OSRAM-Wi4-Lichtstrom-Normallampe

Tabelle 2: Unsicherheitsbudget

| Quantity | Symbol | Value | Uncertainty |
|--------------------------------------|--------------------------|---------------|-------------|
| Luminous responsivity 1 | s_1 | 3.065E-10 | 9.195E-13 |
| Luminous responsivity 2 | s_2 | 4.111E-10 | 1.2333E-12 |
| Spectral matching exponent 1 | $m_{2,y}$ | 0.021 | 0.015 |
| Spectral matching exponent 2 | $m_{2,y}$ | 0.036 | 0.015 |
| CCT or distribution temperature | T | 2762 | 10 |
| Uncertainty in r | Δr | 0.000 | 0.0020 |
| Calibration factor for frequency F | c_{FH} | 1.000 | 0.0005 |
| Calibration factor for frequency f | c_{FD} | 1.000 | 0.0050 |
| Voltage to frequency converter 1 | $w_{1,f}$ | 50084.9 | 25 |
| Voltage to frequency converter 2 | $w_{2,f}$ | 50056.1 | 25 |
| Amplification gain 1 | $R_{1,g}$ | 1.000E+09 | 99996 |
| Amplification gain 2 | $R_{2,g}$ | 9.997E+08 | 99966 |
| Calibration factor for c_{mon} | c_{cm} | 1.000 | 0.0005 |
| Correction factor for stray light | c_{str} | 0.9995 | 0.0005 |
| Luminous flux | Φ | 1154.1 | |

$$\Phi = c_{str} \cdot \left(\frac{J}{J_0}\right)^{-m_j} \cdot \left[\left(\frac{T}{T_A}\right)^{m_{1,y}} \sum_{i=0}^{m_{1,x}-1} (\Delta r + r_{1,i})^2 \cdot c_{cm} \cdot c_{mon}(t_{1,i}) \cdot (\cos \vartheta_{1,i} - \cos \vartheta_{1,i+1}) \cdot \frac{\sum_{j=1}^{n_1} \Delta \varphi_{1,j} \cdot (c_{FH} \cdot F_{1,i,j} - c_{FD} \cdot f_{1,0})}{s_1 \cdot w_{1,f} \cdot R_{1,g}} + \left(\frac{T}{T_A}\right)^{m_{2,y}} \sum_{i=0}^{m_{2,x}-1} (\Delta r + r_{2,i})^2 \cdot c_{cm} \cdot c_{mon}(t_{2,i}) \cdot (\cos \vartheta_{2,i} - \cos \vartheta_{2,i+1}) \cdot \frac{\sum_{j=1}^{n_2} \Delta \varphi_{1,j} \cdot (c_{FH} \cdot F_{2,i,j} - c_{FD} \cdot f_{2,0})}{s_2 \cdot w_{2,f} \cdot R_{2,g}} \right] \tag{24}$$

Somit ergibt sich zurzeit eine erweiterte Messunsicherheit von 0,56 % für $k = 2$. Dies entspricht etwa der Messunsicherheit, welche mit dem großen Kardan-Goniophotometer erreichbar war. Im Unterschied zum Kardan-Goniophotometer (fester Messradius) verfügt das Roboter-Goniophotometer jedoch über die nötige hohe Flexibilität (z. B. durch Variation des Messradius), die nötig ist, um künftige Anforderungen erfüllen zu können. Eben diese hohe Flexibilität führt bei der Bestimmung des Messradius zu relativ großen Messunsicherheiten. Hier könnte die Verwendung einer Lookup-Table oder eine On-Line-Verfolgung mittels Tracer-Systemen der Bahnen diese Unsicherheit verkleinern. Mittlerweile ist das Roboter-Goniophotometer vollständig charakterisiert und wird für beleuchtungsstärkebasierte Lichtstromkalibrierungen und auch für internationale Vergleiche eingesetzt. Damit werden auch die Anforderungen (15–17) erfüllt. Im nächsten Schritt wird das Roboter-Goniophotometer mit Leuchtdichtemesskameras ausgerüstet

werden, um es als „Nahfeld-Goniophotometer“ einzusetzen. Es wird dann die direkte Messung der Leuchtdichteverteilung erlauben, aus welcher nahezu alle nötigen photometrischen Größen abgeleitet werden können. Dieser künftige Schritt wird dann auch den letzten Punkt (18) der Anforderungen erfüllen.

3 Zusammenfassung

Die Geschichte der Goniophotometrie in der PTB über einen Zeitraum von mehr als 50 Jahren wird präsentiert. Verschiedene Goniophotometer, angefangen vom manuell bewegten Einarm-Goniophotometer mit visuellem Photometer, über das große und kleine Kardan-Goniophotometer bis hin zum „State-of-the-art-Roboter-Goniophotometer“ für das 21. Jahrhundert werden beschrieben. Das Letztere hat das Potenzial, in der traditionellen Betriebsart aber auch im Nahfeldmodus über viele Jahre eingesetzt zu werden. Neu aufkommende

| Unit | Sensitivity | Contribution / lm | Relative contribution |
|--------------------|-------------|-------------------|-----------------------|
| A lx ⁻¹ | 1.88E+12 | 1.73 | 0.00150 |
| A lx ⁻¹ | 1.43E+12 | 1.77 | 0.00153 |
| 1 | 20 | 0.30 | 0.00026 |
| 1 | 18 | 0.27 | 0.00023 |
| K | 0.012 | 0.12 | 0.00011 |
| m | 901 | 1.80 | 0.00156 |
| 1 | 1141 | 0.57 | 0.00049 |
| 1 | 10.4 | 0.05 | 0.00005 |
| Hz V ⁻¹ | 0.012 | 0.31 | 0.00027 |
| Hz V ⁻¹ | 0.0118 | 0.29 | 0.00026 |
| Ω | 6.223E-07 | 0.06 | 0.00005 |
| Ω | 5.430E-07 | 0.05 | 0.00005 |
| 1 | 1162 | 0.58 | 0.00050 |
| 1 | 1134 | 0.57 | 0.00049 |
| | | 3.27 | 0.0028 |

Anforderungen für die Rückführung photometrischer Einheiten, wie beispielsweise im Solid-State-Lighting-Bereich, können so erfüllt werden.

Literatur

- [1] Y. Ohno; 1995; Realization of NIST Luminous Flux Scale Using an Integrating Sphere with an External Source; CIE Proceedings; 23rd Session; New Delhi
- [2] R. Sewig; 1938; Handbuch der Lichttechnik; Band 1; pp. 319, 321; Berlin; Springer Verlag
- [3] D. Förste; 1966; Zur Lichtstrommessung an Lampen mit ungleichmäßiger Lichtverteilung; PTB-Mitteilungen; 1/66; pp. 18–20; Braunschweig; PTB
- [4] D. Förste; 1979; Ein Goniophotometer zur genauen Bestimmung des Lichtstroms; Licht-Forschung; 1. Jahrgang; 3/79; pp. 30–36; Heidelberg; Hüthig Verlag
- [5] D. Förste; 1980; Elimination des Fremdlichts bei der Lichtstrombestimmung mit dem Goniophotometer; Licht-Forschung; 2. Jahrgang; 1/80; pp. 27–29; Heidelberg; Hüthig Verlag
- [6] W. Erb; 1997; PTB Network for realization and maintenance of the candela; Metrologia; 34/97; pp. 115–124; Bristol; UK
- [7] G. Sauter; 1996; Kalibrierung von Lichtstärke-Normallampen und Angabe der Messunsicherheit; PTB interner Bericht; Braunschweig; PTB
- [8] G. Sauter; 1996; Goniophotometry: new calibration method and instrument design; Metrologia; 32 (1995/96); pp. 685–688; Bristol; UK
- [9] http://en.wikipedia.org/wiki/Denavit-Hartenberg_Parameters
(letzter Aufruf: 03.12.2015)
- [10] M. Lindemann; 2009; Photometry and Colorimetry of Reference LEDs by Using a Compact Goniophotometer; MAPAN – Journal of Metrology Society of India; Vol. 24; No 3; pp. 143–152; New Delhi; India
- [11] G. Bizjak; 2009; Determination of Stray Light at the PTB Goniophotometer Facility; MAPAN – Journal of Metrology Society of India; Vol. 24; No 3; pp. 163–173; New Delhi; India
- [12] M. Lindemann et al.; 2015; Robot goniophotometry at PTB; Metrologia 52; pp. 167–194; Bristol; UK

Metrologie für moderne Lichtquellen: LEDs und OLEDs

Thorsten Gerloff*

* Thorsten Gerloff,
Arbeitsgruppe
„Photometrie“, E-Mail:
thorsten.gerloff@ptb.de

1. Eine einleitende Beschreibung von Glühlampen, LEDs und OLEDs

Der Einsatz *Licht Emittierender Dioden* (LED) in der Allgemeinbeleuchtung hat in den vergangenen Jahren erheblich zugenommen. Ein entscheidender Vorteil der LED gegenüber der traditionellen Glühlampe liegt in ihrer überlegenen Lichtausbeute η_v – dem Verhältnis des emittierten Lichtstroms Φ_v und der aufgenommenen elektrischen Leistung P_{el} , angegeben in Lumen/Watt.

Dieser Vorteil beruht auf den Unterschieden der zugrunde liegenden Technologien der Lichterzeugung beider Lampentypen. Bei einer (Halogen-) Glühlampe wird der Glühfaden durch elektrischen Strom auf Temperaturen um 3000 K aufgeheizt. Obwohl hierbei fast die gesamte elektrische Leistung in Strahlung umgewandelt wird – Verluste durch thermische Konvektion oder Wärmeleitung sind gering – kann das menschliche Auge lediglich einen geringen spektralen Anteil, der ungefähr 5 % der Gesamtstrahlungsleistung ausmacht, wahrnehmen. Der Großteil der Strahlungsleistung liegt im infraroten Spektralbereich und kann nicht für Beleuchtungszwecke genutzt werden. In Bild 1 ist die spektrale Verteilung einer Glühlampe bei einer Temperatur von 2856 K im Spektralbereich

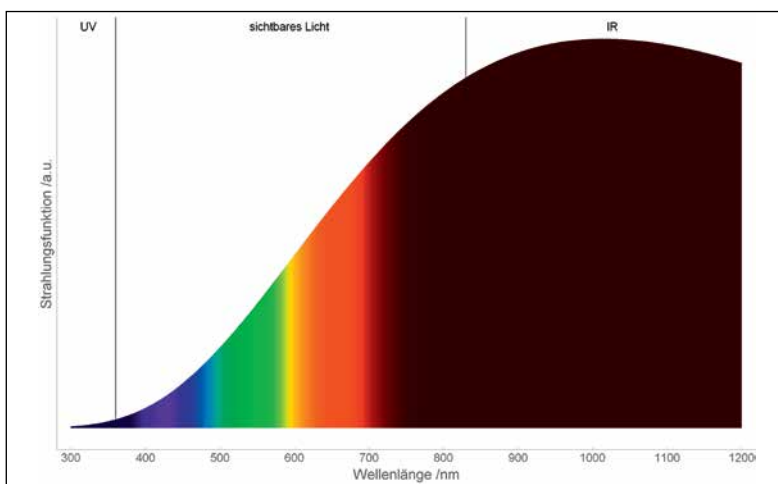


Bild 1:
Spektrale Verteilung einer Glühlampe und spektraler Hellempfindlichkeitsgrad ($V(\lambda)$ -Funktion)

von 300 nm bis 1200 nm dargestellt. Das sichtbare Licht im Spektralbereich zwischen 360 nm und 830 nm ist mit den entsprechenden Spektralfarben hinterlegt. Oberhalb 830 nm beginnt der für das menschliche Auge unsichtbare infrarote Anteil der Strahlung.

Der für photometrische Messungen normativ festgelegte spektrale Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$, also die Hellempfindlichkeit des Auges eines „Normalbeobachters“, ist mit seinem Maximum bei 555 nm schwarz eingezeichnet.

Da die Glühlampe eine *thermische Strahlungsquelle* ist, verschiebt sich mit zunehmender Temperatur die Lage des Strahlungsmaximums entsprechend des *Wienschen Verschiebungsgesetzes* zu kürzeren Wellenlängen. Um die Lichtausbeute von Glühlampen zu erhöhen, müsste man das Strahlungsmaximum durch Temperaturerhöhung in den kurzwelligeren Bereich des sichtbaren Lichts verschieben. Die Maximaltemperatur ist jedoch bei Glühfäden aus Wolfram auf etwa 3000 K begrenzt – bei höheren Temperaturen nimmt die Lebensdauer drastisch ab.

Das Funktionsprinzip einer LED-Lichtquelle basiert auf dem Phänomen der Elektrolumineszenz. Der prinzipielle Aufbau einer LED ähnelt einer pn-Halbleiterdiode. Durch Anlegen einer Gleichspannung rekombinieren Ladungsträger in der p-n-Grenzschicht der Leuchtdiode unter Emission von Strahlung. Durch gezielte Auswahl der verwendeten Halbleitermaterialien und ihrer Dotierung wird deren Bandlücke und somit die Farbe des emittierten Lichtes bestimmt. Im Jahr 1992 gelang der Durchbruch in der Entwicklung hocheffizienter blauer LEDs, die den Einsatz von LEDs zur Allgemeinbeleuchtung erst ermöglichen. Die zugrunde liegenden Forschungsarbeiten wurden 2014 mit dem Nobelpreis für Physik gewürdigt [1].

Eine schmalbandige Lichtemission ist charakteristisch für LEDs. Dementsprechend verfügt ihr Licht über eine hohe Farbsättigung. Durch die Bedeckung des LED-Chips mit breitbandig photolumineszierenden Farbstoffen wird ein Teil der Strahlung in energieärmeres, langwelligeres Licht konvertiert und es entstehen Mischfarben wie



Infokasten LED

Im Folgenden soll ein kleiner Leitfaden gegeben werden, der in allgemeinverständlicher Form die grundlegenden Ideen wichtiger lichttechnischer Größen erläutern soll. Komplexe Details der zugrunde liegenden Normen und Definitionen werden hierbei nicht berücksichtigt!

Lichtausbeute einer Strahlungsquelle η_v

Die Lichtausbeute einer Strahlungsquelle gibt das Verhältnis aus ausgestrahltem Lichtstrom und aufgenommener elektrischer Leistung an. Die Einheit ist *Lumen/Watt* (lm/W). Je höher die Lichtausbeute ist, umso energieeffizienter ist die Beleuchtung. Glühlampen besitzen Lichtausbeuten zwischen 10 und 20 lm/W.

Lichtstrom Φ_v

Der Lichtstrom berücksichtigt den Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ des Auges und gibt die in alle Raumrichtungen abgegebene „Lichtleistung“ einer Lampe an. Der Lichtstrom enthält keine Information darüber, wie die Lampe das Licht im Raum verteilt. Der Lichtstrom gibt an, wie hell ein beleuchteter Raum dem Menschen erscheint.

Spektraler Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$

Der exakt definierte spektrale Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ ist eine Bewertungsfunktion für elektromagnetische Strahlung. Hiermit wird der „Helligkeitseindruck eines menschlichen Durchschnittsauges“ berechnet. Dies ermöglicht den objektiven Vergleich von Lichtquellen mit physikalischen Messmethoden. Subjektive Wahrnehmungen einzelner Menschen können damit nicht exakt wiedergegeben werden.

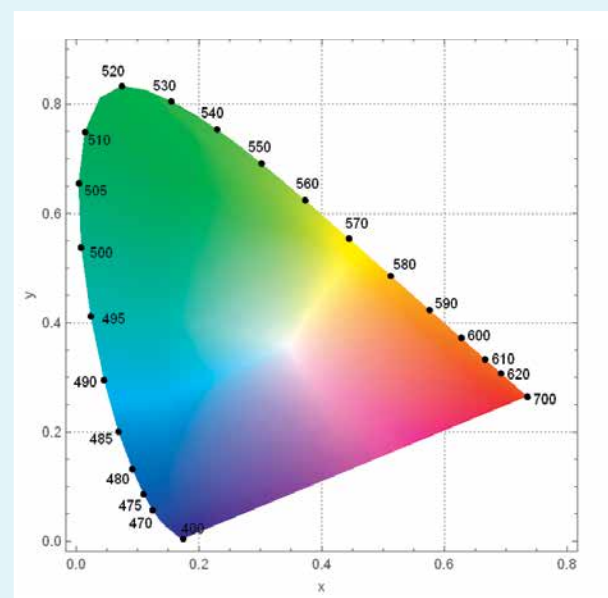
Ähnlichste Farbtemperatur T_N

Es gibt unterschiedliche Farbtemperaturen in der Photometrie. Verhältnis- und Verteilungstemperatur sind nur bei thermischen Strahlern wie der Glühlampe anwendbar. Nur die ähnlichste Farbtemperatur (englisch *Correlated Colour Temperature*, CCT) lässt sich für Lichtquellen mit beliebiger spektraler Zusammensetzung berechnen, sofern die Normfarbwertanteile ähnlich einem thermischen Strahler sind. Die ähnlichste Farbtemperatur wird in der Einheit *Kelvin* (K) angegeben. Sie gibt an, ob das Licht warmweiß (ca. 3000 K), neutralweiß (ca. 4500 K) oder tageslichtweiß (>5500 K) erscheint.

Normfarbwertanteile (x, y)

Für die Angabe von Farbe gibt es neben dem spektralen Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ noch weitere definierte Bewertungsfunktionen. Hiermit lässt sich die Farbwahrnehmung eines fiktive Normalbeobachters aus der gemessenen spektralen Verteilung des Lichts durch Angabe von nur zwei Werten (x und y) angeben. Diese Werte geben die Koordinaten auf der Normfarbtafel (s. Abbildung) an.

Normfarbtafel



Farbwiedergabeindex R_a

Der Farbwiedergabeindex ist eine Kennzahl für Lichtquellen, der bewertet die Qualität der Farbwiedergabe. Je höher der Wert, desto besser ist die Farbwiedergabe. Der Maximalwert liegt bei 100. Werte zwischen 90 und 100 geben eine ausgezeichnete Farbwiedergabe an. Werte unter 80 sind für viele Anwendungen nicht ausreichend.

Pastellfarbtöne oder auch weißes Licht.

In Bild 2 sind die spektralen Verteilungen einer LED mit und ohne Leuchtstoff abgebildet. In der linken Abbildung erkennt man die schmalbandige blaue Emission des LED-Chips. In der rechten Abbildung wird ein Teil dieser Strahlung durch einen Leuchtstoff in längerwelliges Licht konvertiert und die Mischfarbe erscheint weiß.

Der Vorteil einer LED gegenüber einer Glühlampe bezüglich der Lichtausbeute ist offensichtlich: Es wird – von unvermeidbarer thermischer Verlustleistung abgesehen – nur Strahlung im sichtbaren Wellenlängenbereich emittiert. Darüber hinaus ist die Farbe des Lichts von LEDs durch Kombination verschiedener Leuchtstoffe und LEDs nahezu beliebig einstellbar und man ist nicht auf ähnlichste Farbtemperaturen von ca. 3000 K, wie bei der Glühlampe, begrenzt.

Allerdings gibt es auch Nachteile gegenüber dem Licht einer Glühlampe: Dem typischen Spektrum einer LED-Lichtquelle fehlen im Gegensatz zu Sonnenlicht oder Glühlampenlicht einzelne Spektralfarben. Dies macht sich negativ bei der Qualität der Farbwiedergabe bemerkbar.

Die Farbe des emittierten Lichts einer LED lässt sich durch additive Farbmischung sehr ähnlich zu Sonnenlicht oder auch Glühlampenlicht einstellen. Wenn jedoch Objekte mit Licht beleuchtet werden, kommt es auch auf die spektrale Zusammensetzung des Lichts an. Nehmen wir einen Blumenstrauß aus roten Rosen, der im Tageslicht steht. Im Sonnenlicht sind alle Spektralfarben vorhanden und diese beleuchten die Rosen. Die roten Blütenblätter absorbieren einige spektrale Anteile des Lichts und reflektieren im Wesentlichen rotes Licht, welches in das Auge des Betrachters fällt. Wenn die Rosen von einer anderen Lichtquelle beleuchtet werden, in der die roten Spektralanteile zumindest teilweise fehlen, können diese nicht reflektiert werden und die Farben der Rosen erscheinen unnatürlich.

Dies ist von weitreichender Bedeutung für die Wahl einer geeigneten Lichtquelle, da wir einen Kompromiss aus Licht mit guter Farbwiedergabe und hoher Lichtausbeute schließen müssen. Licht mit hoher Farbwiedergabe setzt sich aus möglichst vielen Spektralfarben zusammen und Lichtquellen mit hoher Lichtausbeute sollten nur Spektralfarben beinhalten, für die das menschliche Auge besonders empfindlich ist. In den Außenbezirken vieler Städte werden zur Nachtbeleuchtung der Gehwege häufig Natriumdampflampen mit orangefarbenem Licht eingesetzt. Die Lichtausbeute dieser Lampen ist mit etwa 150 lm/W außerordentlich hoch, da das menschliche Auge in diesem Spektralbereich sehr empfindlich ist. Diese Beleuchtung ist jedoch ungeeignet, um Farben natürlich wiederzugeben. Aufgrund des Aufbaus des menschlichen Auges ist es also nicht möglich, eine Beleuchtung mit sehr hoher Qualität der Farbwiedergabe bei gleichzeitig sehr hoher Lichtausbeute zu realisieren.

Weißer LEDs zur Allgemeinbeleuchtung nutzen in der Regel Leuchtstoffe, die teilweise qualitativ hochwertige Farbwiedergabeeigenschaften besitzen. Eine weitere Methode zur Erzeugung von weißem Licht ist das Mischen von rotem, grünem und blauem Licht (RGB-Verfahren), welches die Grundlage jedes Displays ist. Hierbei sind neben weißem Licht auch andere Lichtfarben möglich – die Farbwiedergabeeigenschaften sind allerdings schlecht. Für die Endverbraucher sind in der Regel die Farbwiedergabeeigenschaften von Lichtquellen als R_a -Werte auf der Verpackung angegeben.

Organische Licht Emittierende Dioden (OLED) sind eine junge Beleuchtungstechnologie, die noch keinen Zugang zum Massenmarkt erhalten hat. Die weltweit erste kommerzielle OLED-Leuchte wurde 2008 vertrieben. Der für den Nutzer wesentliche Unterschied zwischen OLEDs und LEDs besteht im Aufbau. Der leuchtende Kristall

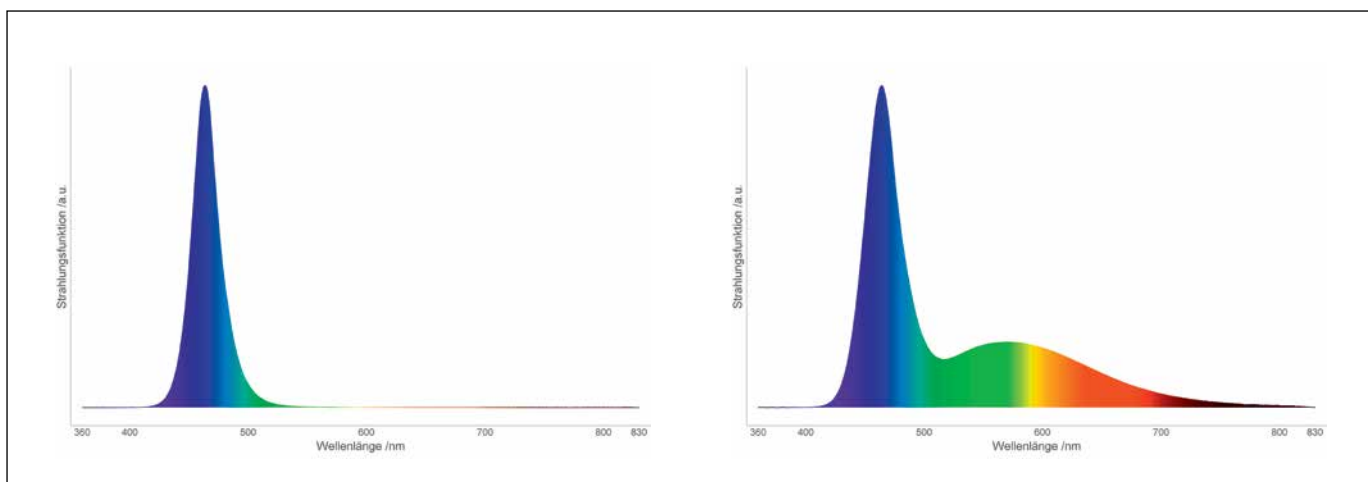


Bild 2: Spektrale Verteilung einer blauen LED (links) und einer weißen LED (rechts), bei der ein Teil des blauen Lichts zu gelbem Licht konvertiert wurde

anorganischer LEDs besitzt eine maximale Kantenlänge von etwa einem Millimeter. Bei OLEDs wird das Licht in großflächigen, amorphen organischen Schichten erzeugt. Momentan sind OLEDs mit leuchtenden Flächen von bis zu $20 \times 20 \text{ cm}^2$ erhältlich. Das Licht wird ähnlich wie bei LEDs durch Ladungsträgerrekombination unter Auftreten von Elektrolumineszenz erzeugt. Dabei ist das Emissionsspektrum der verwendeten organischen Emittiermaterialien wesentlich breitbandiger als das einer LED (vgl. Bild 3). Daher wird das weiße Licht von OLEDs in der Regel durch Verwendung von roten, grünen und blauen Emittiermaterialien erzeugt, ohne dass die Farbwiedergabeeigenschaften sehr stark darunter leiden.

2. Entwicklung von (O)LED-Transfernormalen in der PTB

Eine der Kernaufgaben der PTB ist die Weitergabe der gesetzlichen Einheiten. Bis zum heutigen Tage bieten Transferrnormale in Form von speziellen Glühlampen die besten Eigenschaften, um als Maßverkörperung der Einheiten Candela oder Lumen zu dienen. Da der Anwender in der Regel jedoch die Substitutionsmethode bei seinen Messungen anwendet, um notwendige Korrekturen auf ein Minimum zu reduzieren (Gleiches mit Gleichem vergleichen), sind auch Transferrnormale auf Basis der LED-Technologie von Interesse.

Bereits in den 80er-Jahren des vergangenen Jahrhunderts wurden LEDs in der PTB kalibriert. Diese waren für Beleuchtungszwecke noch ungeeignet und dienten lediglich als Signallampen. Zeitgleich wurden die ersten PTB-LED-Transferrnormale entwickelt, deren optische Eigenschaften durch thermische Regelung des LED-Chips stabilisiert wurden. Die mechanische Ausrichtung der LEDs leistet aufgrund des typischerweise stark gerichteten Abstrahlprofils der LEDs einen großen Beitrag auf die Messunsicherheit. Daher werden die LEDs seit

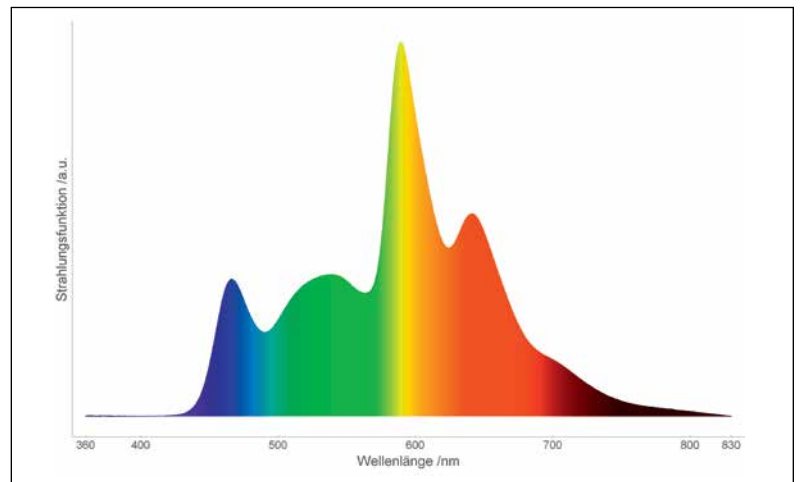


Bild 3:
Exemplarische spektrale Verteilung einer weißen OLED

2002 in ein rotationssymmetrisches, robustes VA-Stahl-Gehäuse eingebaut, welches sich sehr reproduzierbar ausrichten lässt (vgl. Bild 4).

Diese Transferrnormale werden unter Konstant-Strom-Bedingungen und – durch gezieltes Aufheizen des LED-Chips durch den Heizwiderstand – unter Konstant-Spannung-Bedingungen betrieben. Aufgrund der halbleitenden Eigenschaften sinkt mit steigender Temperatur die Betriebsspannung und sowohl der Lichtstrom als auch die Peakwellenlänge des emittierten Lichts verändert sich. Die Sollspannung wird auf einen Wert festgelegt, der unterhalb der Gleichgewichtsspannung durch Eigenerwärmung im Betrieb ohne Heizwiderstand bei einer Umgebungstemperatur von etwa 35 °C liegt. Somit ist auch ein Einsatz der Transferrnormale in Laboren ohne Klimatisierung möglich.

Für LEDs mit höheren Leistungen wurde im Jahr 2011 ein weiterer Prototyp eines Transferrnormals vorgestellt (vgl. Bild 5). Da die hier verwendeten LEDs eine höhere Leistungsaufnahme besitzen, werden sie wärmer. Das reduziert die Lebensdauer und Reproduzierbarkeit der photometrischen

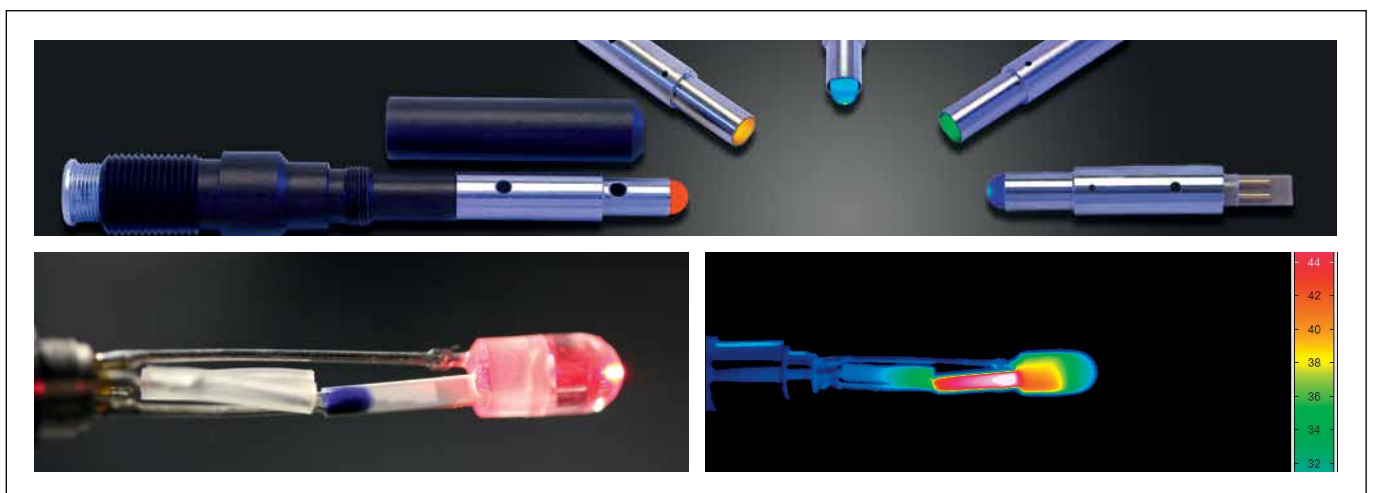


Bild 4:
Temperaturgeregeltes LED-Transferrnormal auf Basis von Kleinleistungs-LEDs mit Lichtströmen von bis zu 10 Lumen.

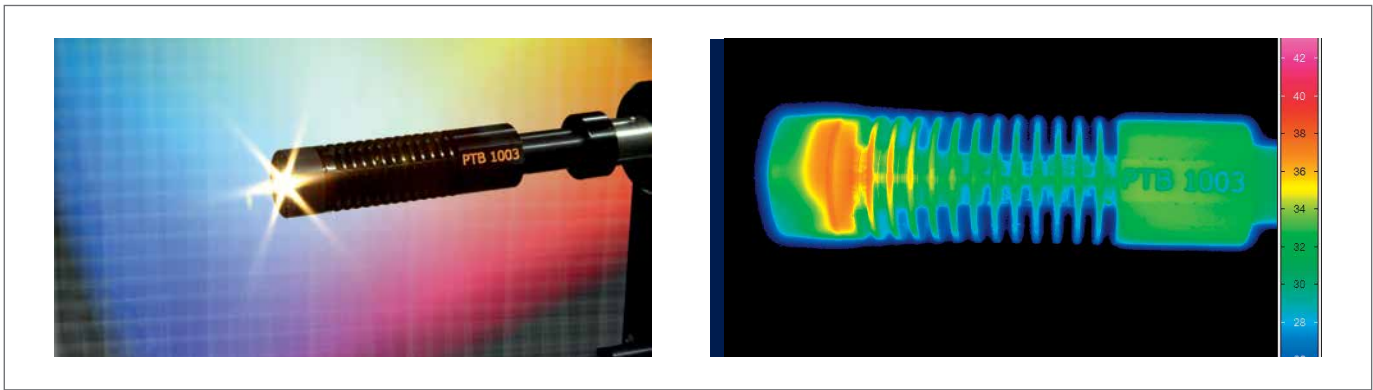


Bild 5: Temperaturgeregeltes LED-Transfernormal auf Basis von Hochleistungs-LEDs mit Lichtströmen von bis zu 100 Lumen. Im rechten Bild ist die Temperaturverteilung in Grad Celsius während des Betriebs abgebildet.

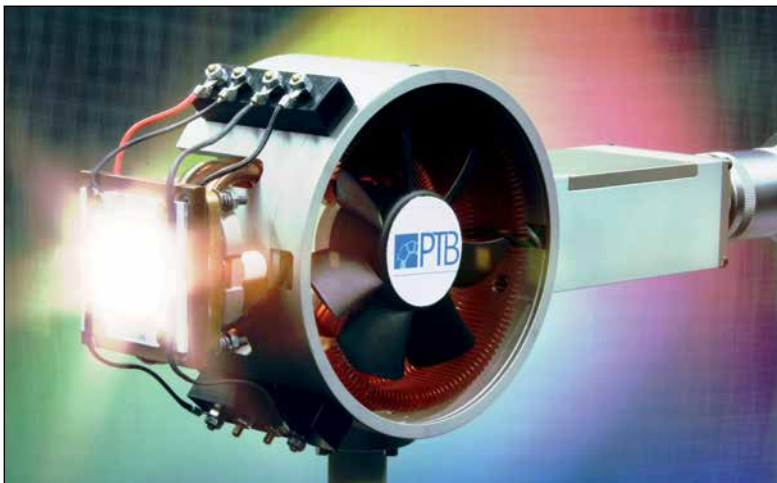


Bild 6: Temperaturgeregeltes LED-Transfernormal auf Basis von Höchstleistungs-LEDs mit Lichtströmen von bis zu 2500 Lumen



Bild 7: Temperaturgeregeltes OLED-Transfernormal auf Basis kommerziell erhältlicher OLEDs

Größen deutlich. Daher müssen sie gekühlt werden. Hierfür kommt bei diesen Normalen ein Peltier-Element zum Einsatz, welches geregelt Wärme in einen dahinterliegenden Kühlkörper leitet und hierdurch das emittierte Licht stabilisiert. Diese Transfernormale zeichnen sich durch ein geringes

Gewicht bei einer Länge von ca. 100 mm und einem Durchmesser von etwa 20 mm aus. Allerdings ist die Verwendung von LEDs mit sehr hohen Leistungen nicht möglich, da die Abwärme lediglich passiv an den Raum abgegeben wird. Eine detaillierte Beschreibung der Eigenschaften dieses Transfernormals wurde 2012 veröffentlicht [2]

Für die thermische Stabilisierung von LEDs mit sehr hohen Leistungen wurde ein weiteres Transfernormal unter Einsatz von Peltier-Elementen, Heatpipes und aktivem Kühlsystem in der PTB entwickelt (vgl. Bild 6).

Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts OLED100.eu wurde in der PTB weiterhin das weltweit erste Transfernormal unter Einsatz einer organischen Leuchtdiode entwickelt (vgl. Bild 7). Dieses Normal wurde für den Einsatz in einer Ulbricht-Kugel konzipiert und in ein mattes Aluminiumgehäuse eingebaut. Eine Besonderheit dieses Normals ist die Stand-Alone-Versorgungseinheit, die ohne Rechner o. ä. sämtliche relevanten elektrischen und thermischen Größen regelt und auf einem USB-Stick speichert.

3. LED-Messtechnik in der PTB

Neben LED-Transfernormalen mit guter Reproduzierbarkeit ist eine hochentwickelte Messtechnik für deren Kalibrierung mit minimaler Messunsicherheit erforderlich.

Die photometrische Beschreibung von LEDs erfolgt durch Angabe ihrer Lichtstärke I_{LED} mit der Einheit Candela und ihrem Lichtstrom Φ_{LED} mit der Einheit Lumen. Diese Größen werden in der PTB unter Verwendung rückgeführter Photometer bestimmt. Hierfür wird die Beleuchtungsstärke E_{LED} unter definierten geometrischen Bedingungen für alle Abstrahlrichtungen der LED mit einem Goniophotometer gemessen.

Für die Bestimmung der colorimetrischen Werte kommen Spektralradiometer zum Einsatz. Hiermit werden spektrale Bestrahlungsstärken gemessen und daraus die abgeleiteten colorime-

trischen Kenngrößen, wie z. B. die *Normfarbwertanteile* (x, y), bei weißen LEDs die ähnlichste Farbtemperatur T_N mit der Einheit Kelvin und bei farbigen LEDs die *dominante Wellenlänge* λ_{dom} , berechnet. Grundlegende Informationen und Definitionen über die photometrischen und colorimetrischen Größen und deren Messung sind in [3], [4] und [5] zu finden.

In Bild 8 ist der Aufbau des LED-Messplatzes an der PTB zu sehen. Für die Bestimmung der Messgrößen in alle räumlichen Abstrahlwinkel wird die LED durch ein Goniophotometer bewegt.

Die LED wird in horizontaler Betriebslage zentrisch normal zur Referenzebene des Photometerkopfes ausgerichtet. Ein Translationstisch ermöglicht dabei eine Variation des Abstandes d zwischen Photometer und LED. Eine horizontale Rotationsachse (φ -Achse) und eine senkrechte Rotationsachse (ϑ -Achse), die sich an der LED-Spitze im rechten Winkel schneiden, erlauben durch Drehung der LED eine Bestimmung der Beleuchtungsstärke E_{LED} in alle Raumrichtungen. Beide Rotationsachsen werden während der Messung zeitgleich bewegt. Hierdurch bewegt sich die relative Position der lichtempfindlichen Empfängeröffnung bezüglich des Schnittpunkts beider Drehachsen auf der Oberfläche einer virtuellen Kugel entlang einer Spiralbahn von „Pol zu Pol“ dieser Kugel.

Die Bestimmung des Lichtstroms Φ_{LED} erfolgt analog der Beschreibung in dem Kapitel *Kurze Geschichte der Goniophotometrie in der PTB*. Der wesentliche Unterschied zu goniophotometrischen Messungen an Glühlampen besteht darin, dass bei LED-Messungen die Lichtquelle typischerweise bewegt werden kann, ohne dass sich ihre optischen Eigenschaften ändern. Aufgrund des stetig wachsenden Bedarfs an rückgeführten Kalibrierungen von High-Power-LEDs sind Masse und Abmessungen der Transferrnormale erheblich gestiegen. Daher wurde der Messplatz 2015 um ein weiteres Goniophotometer für schwere und große Objekte erweitert (vgl. Bild 9).

Neben den photometrischen Empfängern befinden sich auch Einkoppeloptiken für Spektラルradiometer auf dem drehbaren Empfängerkarussell. Alle Empfänger lassen sich hiermit automatisch während einer Messung zu den LEDs ausrichten. Vor jeder LED-Kalibrierung werden die Spektラルradiometer bezüglich Ihrer spektralen Empfindlichkeit und Wellenlänge kalibriert. Die entsprechenden Normallampen befinden sich neben dem Empfängerkarussell (vgl. Bild 10) und ermöglichen so ebenfalls eine automatisierte Messung.

Den spektralen Messungen an LEDs kommt neben der Notwendigkeit für die Bestimmung colorimetrischer Kennzahlen noch eine besondere Bedeutung für die photometrischen Messun-

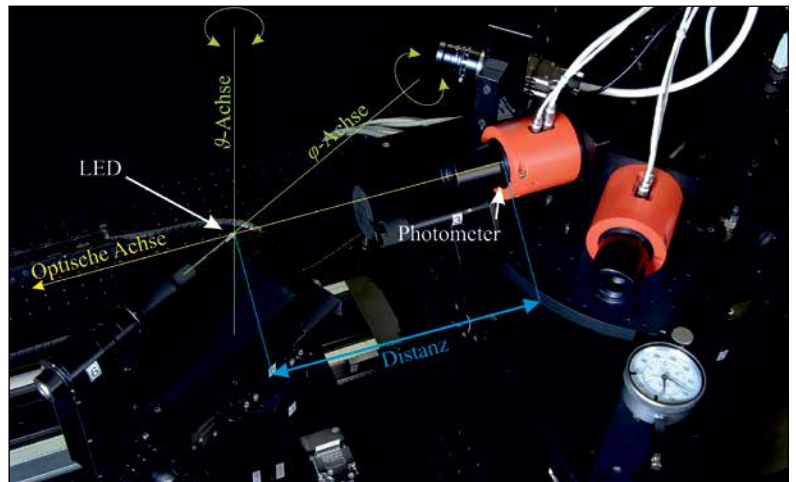


Bild 8: Goniophotometer für photometrische Messungen an Kleinleistungs-LEDs

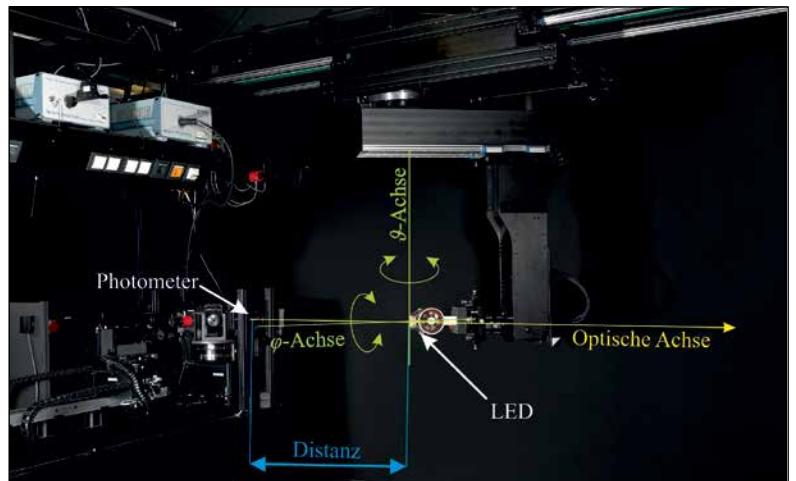


Bild 9: Goniophotometer für photometrische Messungen an Hochleistungs-LEDs

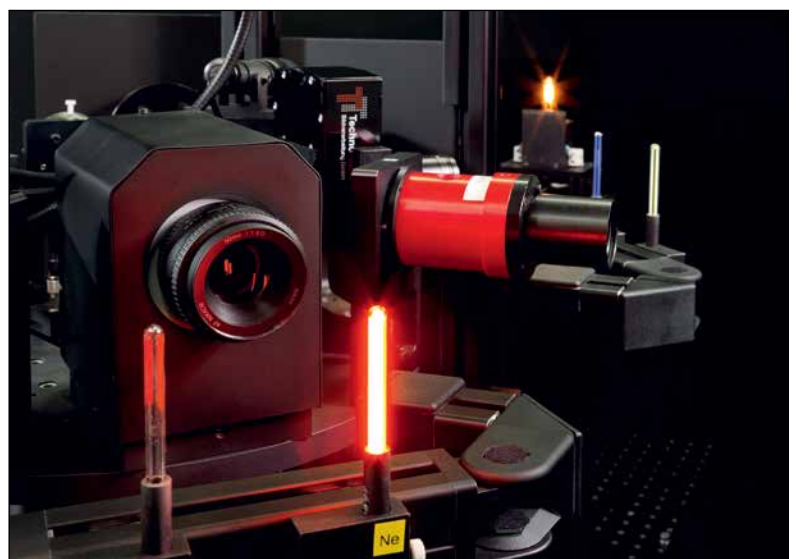


Bild 10: Entladungslampen mit verschiedenen Gasfüllungen dienen der Wellenlängenkalibrierung der Spektrometer. Im Hintergrund ist eine Bestrahlungsstärke-Normalampe für die spektrale Empfindlichkeitskalibrierung zu sehen.

gen zu: Wie in der Einleitung erklärt, unterscheiden sich die spektralen Verteilungen von LEDs und Glühlampen deutlich voneinander. Photometerköpfe bestehen in der Regel aus einer Silizium-Photodiode, deren spektrale Empfindlichkeit durch den Einsatz von Glasfiltern möglichst gut an den Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ angepasst wird. Aufgrund internationaler Standardisierung wird die photometrische Empfindlichkeit von Photometerköpfen fast ausschließlich für Normlichtart A kalibriert. In der Praxis werden hierfür Glühlampen mit einer Verteilungstemperatur von 2856 K verwendet. Wenn man ein solches Photometer für Messungen an anderen Glühlampen verwendet, sind die spektralen Verteilungen meist so ähnlich, dass nur geringe oder gar vernachlässigbare Korrekturen aufgrund der spektralen Fehlanpassung, also der Abweichung der realen spektralen Empfindlichkeit des Photometers von dem Hellempfindlichkeitsgrad, notwendig sind. Wenn man ein solches Photometer jedoch bei LEDs, insbesondere farbigen LEDs, einsetzt, können die Abweichungen aufgrund der spektralen Fehlanpassung sehr groß werden (>10 % für hochwertige Photometerköpfe sind möglich).

Mit Kenntnis der relativen spektralen Verteilung der Leuchtdiode $S_{\text{LED}}(\lambda)$ und der relativen spektralen Empfindlichkeit $s_{\text{rel}}(\lambda)$ lässt sich die spektrale Fehlanpassung durch folgenden Korrekturfaktor c_{Spek} korrigieren:

$$c_{\text{Spek}} = \frac{\int V(\lambda) S_{\text{LED}}(\lambda) d\lambda}{\int s_{\text{rel}}(\lambda) S_{\text{LED}}(\lambda) d\lambda} \bigg/ \frac{\int V(\lambda) P(\lambda, T_A) d\lambda}{\int s_{\text{rel}}(\lambda) P(\lambda, T_A) d\lambda}$$

$P(\lambda, T_A)$ beschreibt Lichtart A durch das Plancksche Strahlungsgesetz für $T_A = 2856$ K.

Eine detaillierte Auflistung und Diskussion aller zu berücksichtigenden Details bei Kalibrierungen von LEDs und das dazugehörige Messunsicherheitsbudget soll an dieser Stelle nicht gegeben werden. Interessierte Leser können hierfür Informationen in einer früheren Veröffentlichung [6] oder in den Ergebnissen eines internationalen Vergleichs von LED-Messungen [7] finden.

Fazit und Ausblick

Der Verzicht auf LEDs ist für Beleuchtungsanwendungen nicht mehr vorstellbar. Durch ihre kontinuierliche Weiterentwicklung erobern LEDs immer weitere Anwendungsfelder (z. B. Haushalts-, Straßen- und Automobilbeleuchtung), mit denen der Endkunde in Kontakt kommt. Bei diesen Anwendungen sind die Anforderungen an die Lichtquellen vielfältig und für eine quantitative Beschreibung ihrer Eigenschaften muss auch die Messtechnik entsprechend umfassend und ausge-reift sein.

Neben dem allgemeinen Forschungs- und Entwicklungsbedarf für bessere LED-Messverfahren und -geräte, die die Grundlage ihrer technologischen Weiterentwicklung bilden, gibt es eine weitere Herausforderung. Aufgrund der nahezu unbegrenzten Möglichkeiten, eine bestimmte Lichtfarbe durch additive Farbmischung zu erhalten, sind LEDs verschiedener Hersteller mit unterschiedlichen Emissionsspektren aber einer nominell gleichen ähnlichsten Farbtemperatur erhältlich. Dennoch ist teilweise ein Unterschied der Lichtfarbe mit bloßem Auge erkennbar, wenn sich unterschiedliche LEDs nebeneinander befinden.

Es ist ungewöhnlich, dass man ohne technische Hilfsmittel nominell gleiche Lichtfarben faktisch unterscheiden kann. Um die Charakterisierung von LEDs soweit zu verbessern, dass dies nicht mehr möglich ist, ist einerseits eine Reduzierung der Messunsicherheit bei der Bestimmung der Normfarbwertanteile (Lichtfarbe) notwendig. Andererseits muss man sich bewusst machen, dass photometrische und colorimetrische Messverfahren auf rein physikalischen Zusammenhängen basieren. Individuelle menschliche Wahrnehmung und Sehen werden bei photometrischen Messungen nicht berücksichtigt – diese werden durch Festlegung von exakt definierten Wichtungsfunktionen, wie dem Hellempfindlichkeitsgrad für einen fiktiven Normalbeobachter, ausgegrenzt. Diese Wichtungsfunktionen können gegebenenfalls auch noch optimiert werden, um die objektive Beurteilung von Lichtquellen mit physikalischen Messmethoden zu verbessern. Somit gibt es auch in Zukunft noch interdisziplinäre Herausforderungen für die Metrologie moderner Lichtquellen.

Literatur

- [1] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/ (letzter Aufruf: 14.10.2015)
- [2] T. Gerloff, M. Lindemann, S. Shirokov, M. Taddeo, S. Pendsa, A. Sperling; Development of a new high-power LED transfer standard; CIE Proceedings 2012
- [3] CIE S 017/E; 2011; ILV; International Lighting Vocabulary; <http://eilv.cie.co.at/> (letzter Aufruf: 03.12.2015)
- [4] CIE 127; 2007 (2nd edition); Measurement of LEDs
- [5] CIE S 025/E; 2015; Test Method for LED Lamps; LED Luminaires and LED Modules
- [6] M. Lindemann, R. Maass; Photometry and Colorimetry of Reference LEDs by Using a Compact Goniophotometer; MAPAN – Journal of Metrology Society of India; Vol. 24; No. 3; 2009
- [7] www.bipm.org; APMP.PR-S3a (Averaged LED Intensity); APMP.PR-S3b (Total Luminous Flux of LEDs); APMP.PR-S3c (Emitted Colour of LEDs)

Effektpigmente: Eine Herausforderung für die optische Messtechnik

Egbert Buhr*, Alfred Schirmacher**, Andreas Höpe***

Einleitung

Farbe ist für Menschen die wohl auffälligste subjektive Stoffeigenschaft. Bereits den Frühmenschen war diese visuelle Qualität bekannt, deren Wahrnehmung allen Primaten eigen ist. So wurde 2008 in Südafrika eine ca. 100.000 Jahre alte steinzeitliche „Malerwerkstatt“ entdeckt [1]. Auch heutzutage spielt Farbe in der Gestaltung unserer Umwelt eine wichtige Rolle. Jedes Jahr präsentiert uns die *Mode* die neuen *Farben* der Saison. Farben dienen zur Regelung des Verkehrs. Ohne bunte Farben wäre unsere Welt trist und öde.

Es ist wichtig festzustellen, dass Farbe ein physiologischer Sinneseindruck ist, wie z. B. auch Tasten oder Riechen. D. h. Farbe ist keine immanente physikalische Eigenschaft eines Gegenstandes, wie z. B. seine Masse oder Wärmeleitfähigkeit. Die physiologische Wahrnehmungskette ist hierbei folgende: Das vom betrachteten Gegenstand reflektierte Licht trifft auf das Auge und löst hierbei einen Farbreiz aus. Dieser Farbreiz beruht auf der spektralen Zusammensetzung des empfangenen Lichts, d. h. er ist abhängig von der verwendeten Lichtquelle und dem spektralen Reflexionsvermögen des betrachteten Objektes. Die Anregung der licht- und farbempfindlichen Zellen in der Netzhaut führt zu einer Farbvalenz, die über den Sehnerv an das Gehirn weitergeleitet wird. Die eigentliche Farbempfindung, die wir dann mit einem Gegenstand verknüpfen, entsteht erst im Gehirn [2]. Liegt z. B. eine Farbfehlsichtigkeit vor, so kann der Farbeindruck des betroffenen Menschen auch ein ganz anderer sein. Auch viele Tiere mit ihren teilweise erheblich abweichenden visuellen Systemen, nehmen Farbe ganz unterschiedlich als wir Menschen wahr. Im Folgenden soll mit Farbe immer die Körperfarbe, auch Gegenstandsfarbe, Objektfarbe, bzw. Oberflächenfarbe genannt, einer nicht selbstleuchtenden Fläche bezeichnet werden, die durch Reflexion von Licht an einem Körper entsteht.

Die genannten Zusammenhänge machen die mathematisch-physikalische Beschreibung von Farbe schwierig und aufwendig, da auch die spezifischen Eigenarten der menschlichen Wahrnehmungskette nachgestellt werden müssen.

Diesem Umstand wird versucht über die verschiedenen Farbmaßsysteme Rechnung zu tragen, welche die Farbe eines Objektes mithilfe von quantifizierbaren Zahlenwerten kennzeichnen [3].

Generell können farbige Flächen je nach Tageszeit und Lichteinfall sehr unterschiedlich wirken. Die Änderungen basieren hierbei auf der unterschiedlichen spektralen Zusammensetzung des Tageslichts und den winkelabhängigen Glanz- und Struktureigenschaften von Oberflächen. Ganz besonders deutlich ist dies bei auf dem Interferenzeffekt basierenden Effektpigmenten der Fall: Deren visuelles Erscheinungsbild, im englischen mit *Visual Appearance* bezeichnet, kann sich bei variierendem Beobachtungswinkel und unterschiedlichen Lichtverhältnissen komplett verändern. Man spricht hierbei von sogenannten Flop-Lacken, wobei man zwischen Hell-Dunkel-Flop und Farb-Flop unterscheiden kann [4].

Generell kann man sagen, dass Farbe und visuelle Effekte einen entscheidenden Anteil am Verkaufserfolg eines Produktes haben, denn Farben wecken Emotionen und verschiedene Neuromarketingstudien belegen, dass ca. 95 % aller Kaufentscheidungen emotional geprägt sind [5]. Deshalb spielt eine moderne Farbgestaltung unter Nutzung aktueller Effektpigmente im Produktdesign eine entscheidende Rolle, denn durch den Einsatz solcher Pigmente kann Gegenständen eine höhere Attraktivität verliehen werden. Daher findet man moderne Effektpigmente heutzutage in vielen, teilweise sehr unterschiedlichen Industrieprodukten, wie z. B. in Autolackierungen, Häuserfassaden, Kosmetikartikeln, oder sogar bei Pralines, wie dies in Bild 1 zu sehen ist.

Pigmente

Als Pigmente, aus dem Lateinischen kommend von *pigmentum* für „Färbestoff, Schminke“, bezeichnet man aus Teilchen bestehende, im Anwendungsmedium praktisch unlösliche Substanzen, die als Farbmittel oder wegen anderer spezieller physikalischer und chemischer Eigenschaften als funktionale Farbzentren verwendet werden [6].

* Dr. Egbert Buhr, Fachbereich „Bild- und Wellenoptik“, E-Mail: egbert.buhr@ptb.de

** Dr. Alfred Schirmacher, Arbeitsgruppe „Reflexion und Transmission“, E-Mail: alfred.schirmacher@ptb.de

*** Dr. Andreas Höpe † ehemals Arbeitsgruppe „Reflexion und Transmission“

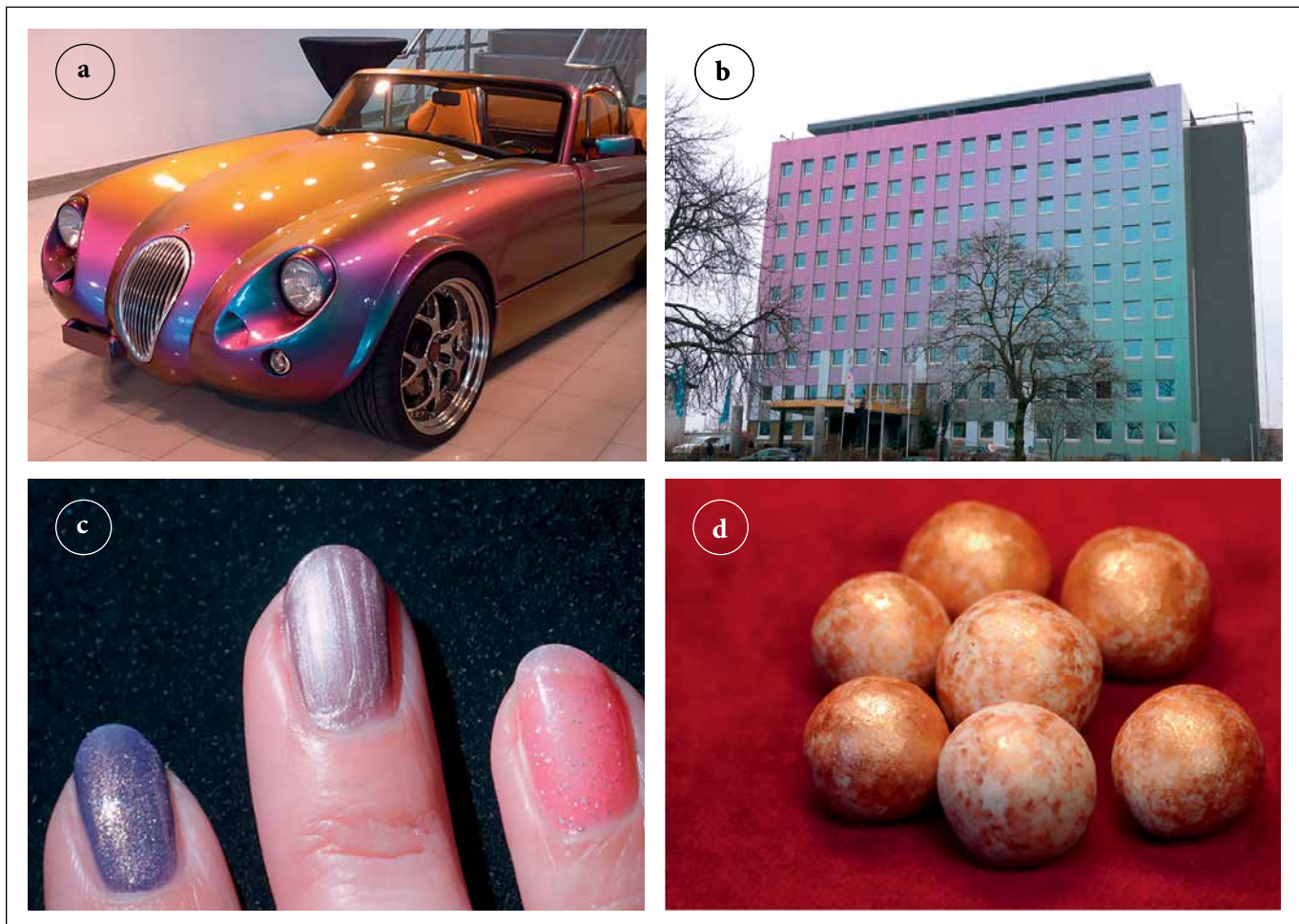


Bild 1:
 a) Roadster mit ChromaFlair®-Effektpigmentlackierung, b) Verwaltungsgebäude in Braunschweig verkleidet mit Alucobond®-spectra-colours-Verbundplatten, c) Effektpigmente im Nagellack, d) Praliné mit Effektpigmentüberzug

In der Natur vorkommende anorganische Pigmente sind schon seit prähistorischen Zeiten bekannt. Schon die Menschen der Steinzeit benutzen mineralische Pigmente für die ersten Höhlenzeichnungen. Sie erkannten, dass sie mit unterschiedlichen Erdsorten farbig malen konnten. Eisenoxidhaltige Erden liefern gelbrote bis braunrote, Kalk und Gips weiße, Manganoxide sowie Holz- und Knochenkohle schwarze Farbtöne.

Aus heutiger, industrieller Sicht ist ein Pigment ein fein aufgeteilter und unlöslicher Feststoff mit der Hauptfunktion, das Erscheinungsbild des verwendeten Mediums zu verbessern oder es zu färben. Pigmente werden dem Medium immer durch physikalisches Mischen beigegeben, dies unterscheidet sie von Farbstoffen, die in ihrem Medium löslich sind.

Pigmente können nach den optischen Prinzipien ihrer Wechselwirkung mit Licht unterschieden und in verschiedene Klassen eingeteilt werden. Wichtige Pigmentklassen sind Weiß-, Bunt-, Schwarz- und Effektpigmente, die alle wegen ihrer speziellen farbgebenden Eigenschaften eingesetzt werden. Bei den Effektpigmenten

kann in einer ersten, vereinfachten Einteilung noch zwischen Metalleffekt- und den sogenannten speziellen Effektpigmenten unterschieden werden.

Der Begriff „spezielle Effektpigmente“ umfasst die Gruppen der Perlglanzpigmente und der allgemeinen Interferenzpigmente, welche, insbesondere bei aktuellen Pigmententwicklungen, nicht scharf abgegrenzt werden können. Perlglanzpigmente sind Effektpigmente, die aus transparenten Plättchen mit hohem Brechungsindex bestehen. Sie erzeugen durch die spezielle Form der Mehrfachreflexion des transmittierten Lichts an mehreren Pigmenten einen perlenähnlichen Effekt, bei dem die auftreffende Strahlung verteilt reflektiert wird, wodurch der Eindruck einer mit der Tiefe abnehmenden diffusen Helligkeit entsteht. Für das Auge ergibt sich so eine scheinbar dreidimensionale Glanzcharakteristik, die aus der Tiefe des Objektes zu kommen scheint. Interferenzpigmente dagegen sind Effektpigmente, deren farbgebende Wirkung ganz oder vorwiegend auf dem Effekt der Vielstrahlinterferenz von Licht an dünnen, hochbrechenden Schichten beruht. Interferenzpigmente können dabei sowohl auf transparenten oder auch nichttransparenten Plättchen basieren.

Die heute verwendeten Pigmente lassen sich somit grob in fünf verschiedene Klassen einteilen:

- 1.) Weißpigmente: Die Pigmente streuen das gesamte auftreffende Licht nahezu verlustfrei in alle Richtungen durch diffuse, ungerichtete Reflexion.
- 2.) Buntpigmente: Die Pigmente streuen einen Teil des Lichtes diffus und absorbieren wellenlängenselektiv einen anderen Teil des Lichtes.
- 3.) Schwarzpigmente: Die Pigmente absorbieren alle Wellenlängen des für das menschliche Auge sichtbaren Spektralbereiches.
- 4.) Metalleffektpigmente: Die aus dünnen Metallplättchen, vorwiegend Aluminium, bestehenden Metalleffektpigmente sind lichtundurchlässig und reflektieren das gesamte auftreffende Licht durch spekulare, gerichtete Reflexion. Die Pigmentpartikel wirken dabei wie Mikrospiegel und führen bei paralleler Ausrichtung im Anwendungsmedium zu einem spiegelnden Metallglanz, dem Metallic-Effekt.
- 5.) Spezielle Effektpigmente: Perlglanz- bzw. Interferenzpigmente deren optische Wirkung auf der Mehrfachreflexion an überwiegend flächig ausgebildeten und ausgerichteten transparenten, semitransparenten oder lichtundurchlässigen Partikeln beruht.

Weiß-, Bunt- und auch Schwarzpigmente weisen typische Durchmesser im Bereich von 100 nm bis zu 1 µm auf. Ihre Größe liegt damit zum Teil im Bereich der Wellenlänge des sichtbaren Lichtes, welches den Bereich von 380 nm bis 780 nm überdeckt. Einige Schwarzpigmente wie z. B. Rußpigmente, liegen mit ihren Durchmessern jedoch auch zum Teil auch deutlich darunter. Effektpigmente besitzen dagegen Teilchendurchmesser, die zumeist im Bereich von 5 µm bis 100 µm, in einigen Fällen auch darüber, liegen. Sie sind damit, bezüglich der mittleren Plättchendurchmesser, wesentlich größer als die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes. Die Dicke der Plättchen liegt, von einigen Ausnahmen abgesehen, unter 1 µm ebenso wie die Dicke der Interferenzschichten. Demzufolge weisen Effektpigmente in der Regel ein hohes Aspektverhältnis auf (Verhältnis der lateralen Ausdehnung einer Struktur zu ihrer Höhe), welches bis zu 200 betragen kann.

**Interferenzpigmente –
Wie die Farben entstehen**

Die Farbe von Interferenzpigmenten hängt von der Schichtdicke der Metalloxidbeschichtung und dem Einstrahlungs- und Betrachtungswinkel ab. Beide Parameter bestimmen die effektive optische Weg-

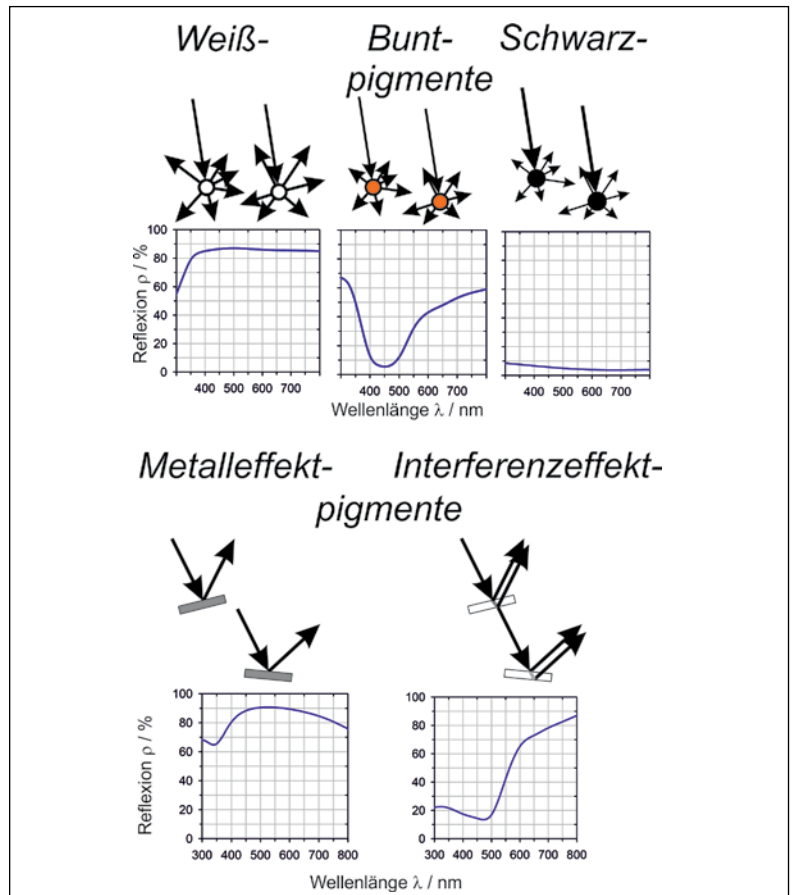


Bild 2: Schematische Diagramme zum spektralen Verhalten verschiedener Pigmenttypen

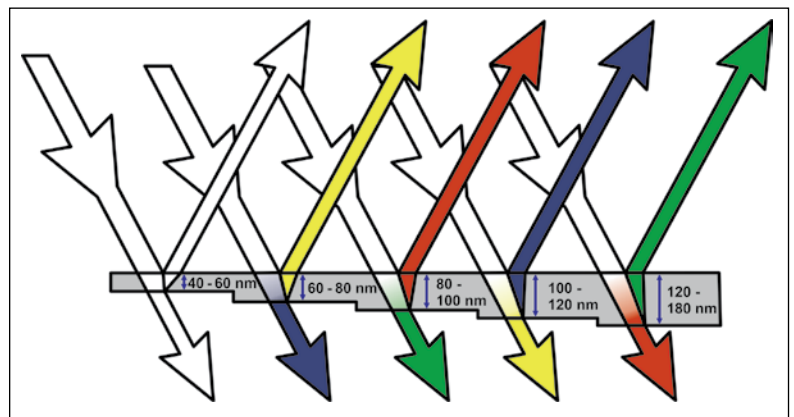


Bild 3: Die Schichtdicke der Metalloxidbeschichtung und der kombinierte Einstrahlungs- und Betrachtungswinkel bestimmen die optische Weglänge und somit die sich ergebenden Interferenzfarben in Reflexion und Transmission

längendifferenz für das einfallende weiße Licht zwischen oberer und unterer Grenzfläche und die somit auftretenden Interferenzfarben, siehe Bild 3.

Interferenzpigmente zeigen somit einen ausgeprägten „Farbflop“. Die Winkelabhängigkeit der Farbe wird hierbei auch als Goniokromasie bezeichnet. Richtig bunt geht es zu, wenn ein Interferenzpigment auf einen bereits bunten Untergrund aufgebracht wird. Die Transparenz der Pigmente lässt die Untergrundfarbe durch-

Bild 4:
Merck-Xirallic®-Solaris-Red-Effektpigmente appliziert auf einem mit Standard-Absorptionspigmenten hellblau lackierten Metallblech. In Richtung des Glanzwinkels auf der rechten Seite zeigt sich der langsame Aufbau der winkelabhängigen Interferenzfarbe.

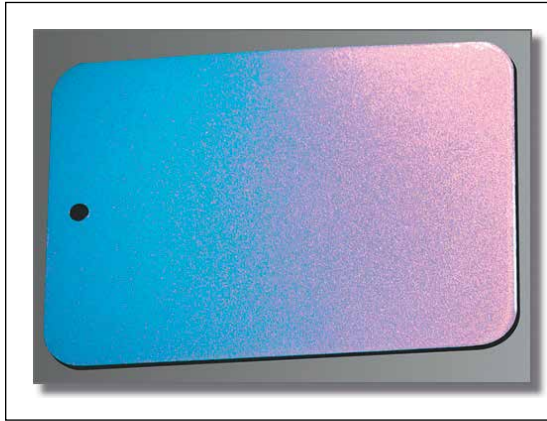


Bild 5:
Die Effekte Sparkling (1) und Coarseness (2) des Effektpigmentes Xirallic® Crystal Silver in einer vergrößerten Aufnahme auf weißem (links) und schwarzem Hintergrund (rechts).

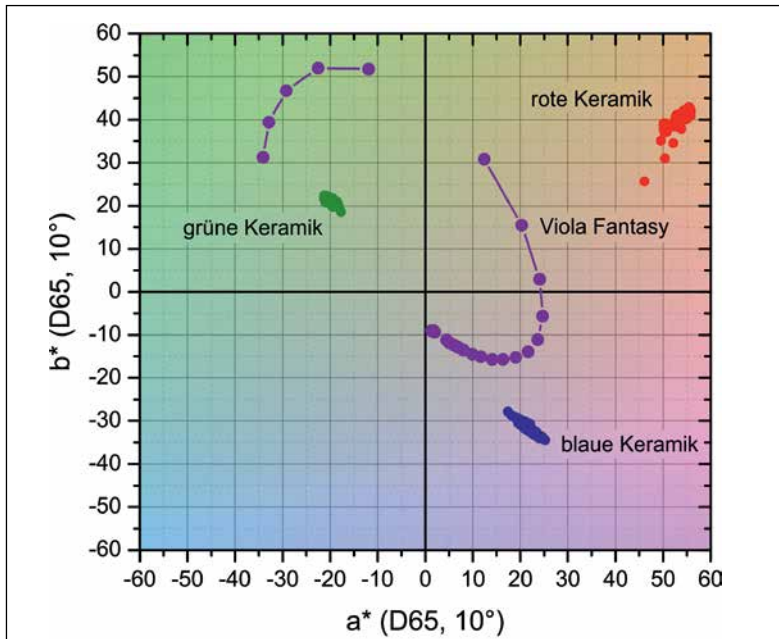
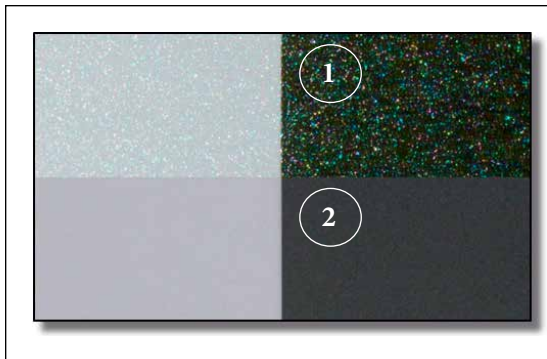


Bild 6:
CIELab Farbkoordinaten einer winkelabhängigen Reflexionsmessung an vier verschiedenen Proben: drei Keramiken der Farben rot, grün, blau und eine Effektpigmentlackierung mit Merck Colorstream® Viola Fantasy. Das untergelegte Farbschema zeigt näherungsweise die den Koordinaten entsprechende Farbe.

scheinen, im Glanzwinkel wird sie aber von der Interferenzfarbe überstrahlt, wie dies in Bild 4 zu sehen ist.

Der Effekt eines Helligkeitsunterschiedes unter verschiedenen Betrachtungswinkeln wird als Helligkeitsflop bezeichnet und ist an sich nichts Neues. Sind jedoch die einzelnen Pigmentteilchen

aufgrund ihrer planaren Reflexionsoberflächen in gerichteter Beleuchtung direkt beobachtbar, was für mittlere Teilchengrößen von 30 µm und größer der Fall ist, so ergibt dies einen Effekt, welcher mit dem Begriff *Sparkle* (Glitzern, Funkeln) bezeichnet wird (Bild 5). Ändert sich die Beleuchtung von einer gerichteten Einstrahlung, wie es an einem wolkenlosen sonnigen Sommertag der Fall ist, hin zu einer diffusen, ungerichteten Einstrahlung, wie an einem stark bewölkten Herbsttag, so verschwindet das Sparkling der Pigmente und verwandelt sich in eine Körnigkeit der Oberfläche. Dieses optische Phänomen wird als *Coarseness* (Bildkörnigkeit) bezeichnet und ist unabhängig vom Betrachtungswinkel (Bild 5).

Als neuer Archetypus des Sparkle-Begriffes haben sich in den letzten Jahren die Xirallic® Pigmente (*High Chroma Chrystal Effect Pigments*) der Firma Merck KGaA entwickelt. Durch die Beschichtung von Aluminiumoxidplättchen mit hochbrechenden Metalloxiden und einer optimierten Dicke und Ebenheit aller am Pigment beteiligten Schichten entstehen außergewöhnlich stark reflektierende Effektpigmente, die einen besonders intensiven Sparkle-Effekt aufweisen. Man spricht hierbei auch von sogenanntem *Living Sparkle*, welcher sich in einem scheinbaren „Tanzen“ der leuchtenden Punkte in der Probenoberfläche bei Veränderung der Beobachtungsgeometrie äußert [7, 8].

Generell gilt, dass die Farbe von Objekten mit Effektlackierung nicht mehr, wie jahrzehntelang üblich und ausreichend mit konventionellen Farbmessgeräten mit nur einer festen Messgeometrie, wie z. B. in der 45°:0° Geometrie (Einstrahlung unter 45°: Reflexionsmessung unter 0°), bestimmt werden kann. Dieser Umstand wird sehr gut durch die Grafik in Bild 6 illustriert. Dargestellt sind die winkelabhängig gemessenen Farbkoordinaten von drei verschiedenen keramischen Farbstandards der Farben rot, grün und blau, sowie eines mit dem Effektpigment Viola Fantasy der Firma Merck lackierten Blechs. Der Einfallswinkel des Lichts auf die Proben betrug hierbei immer 45° zur Oberflächennormalen. Das von den Proben reflektierte Licht wurde an 26 Positionen, in einem 5° Raster, in planaren, die Oberflächennormale enthaltenden Messgeometrien, im Winkelbereich von -70° bis +70° aufgenommen. Bei den aus absorptiven Pigmenten bestehenden Keramiken zeigt sich eine nur sehr geringe Winkelabhängigkeit der Farbe, welche größtenteils auf unterschiedlicher, winkelabhängiger Helligkeit, d. h. den Glanzeigenschaften der Oberfläche beruht. Das Effektpigment dagegen zeigt einen extremen winkelabhängigen Farb-Flop (Goniochromasie), welcher einen Farbverlauf von Grün über Rot-Gelb hin ins Blau-Violett bietet.

Aber auch die neuen Lackfarben aus der Gruppe der Effektlackierungen müssen messtechnisch

erfasst und rückgeführt werden, um eine gleichbleibende Qualität in der Produktion gewährleisten zu können. Gerade diese vielfältigen, zusätzlichen Eigenschaften stellen die Farbmess-technik vor neue Herausforderungen.

Farbmessung

Bisherige kommerzielle Farbmessgeräte charakterisieren Probenoberflächen fast ausschließlich in den eben schon erwähnten, sogenannten *in-plane* Reflexionsgeometrien. Dabei liegen die Richtungen des eingestrahlichten und des reflektierten Lichts, sowie die Oberflächennormale der Probe in einer Ebene. Diese Einschränkung entspricht jedoch in keiner Weise der täglichen Realität, bei der Oberflächen aus beliebigen Richtungen beleuchtet und betrachtet werden. Seitens der Messgerätehersteller und Anwender gibt es daher einen Trend zur erweiterten Charakterisierung bezüglich zusätzlicher Winkelkombinationen im dreidimensionalen Raum. Spitzenreiter dieser Entwicklung am Markt ist derzeit ein tragbares Mehrwinkel-Spektralphotometer mit insgesamt 19 verschiedenen Reflexionsgeometrien [9]. Hiermit scheint aber auch das Ende dieser Entwicklung im Bereich der portablen, handgeführten Geräte erreicht. Der Wunsch der Anwender geht aktuell wieder zurück zu einer geringeren Anzahl von Winkelkombinationen, denn es ist unklar, wie man aus dem Mehr an winkelaufgelösten Reflexionsdaten die für die Charakterisierung der Farbeigenschaften relevanten Informationen gewinnen kann. Daher stellt sich die Frage, welches sind „gute“, d. h. an die Messaufgabe adaptierte, optimal geeignete Messgeometrien?

Um diese Frage zu beantworten betreibt die AG 4.24 „Reflexion und Transmission“ der PTB zwei roboterbasierte Gonioreflektometer, die eine winkelaufgelöste Reflexionsmessung in beliebigen bidirektionalen Geometrien ermöglichen [10–12]. Diese beiden Apparaturen sind in Bild 7 dargestellt.

Das Standard-Gonioreflektometer ist hierbei das nationale Normal für die Messgröße spektraler Strahlendichtefaktor in gerichteten Geometrien. Es dient der Realisierung, Bewahrung und Weitergabe der gerichteten Reflexionsskala in Form von Kalibrierungen. Die zweite Apparatur, bezeichnet mit dem Acronym ARGon³ (*3D Appearance Robot-based Gonioreflectometer*), ist ein flexibles Forschungsgerät, mit dem experimentelle Untersuchungen u. a. im Rahmen des EMRP-Projektes *Multidimensional Reflectometry for Industry* der EU [13] durchgeführt werden. Im Vergleich zum Standard-Gonioreflektometer ist dieses Gerät mit einer photometrischen Leuchtdichtekamera und einer Zeilenkamera ausgerüstet. Die Leuchtdichtekamera erlaubt mit einer speziellen

Abbildungsoptik Messungen der ortsaufgelösten Leuchtdichte auf einer Längenskala bis hinab zu 28 μm auf der zu untersuchenden Probe, siehe Bild 8.

Mit der Zeilenkamera sind Messungen von kompletten Reflexionsspektren im sichtbaren Spektralbereich zwischen 380 nm und 780 nm, dem sogenannten $V(\lambda)$ -Bereich, auf einer Zeitskala von 2 Minuten möglich. Hieraus lassen sich dann Farbkoordinaten der untersuchten Proben in den unterschiedlichsten Farbraumsystemen berechnen. Eine absolute Messung in 114 Winkelkombinationen (siehe Bild 9), im Polarwinkel-

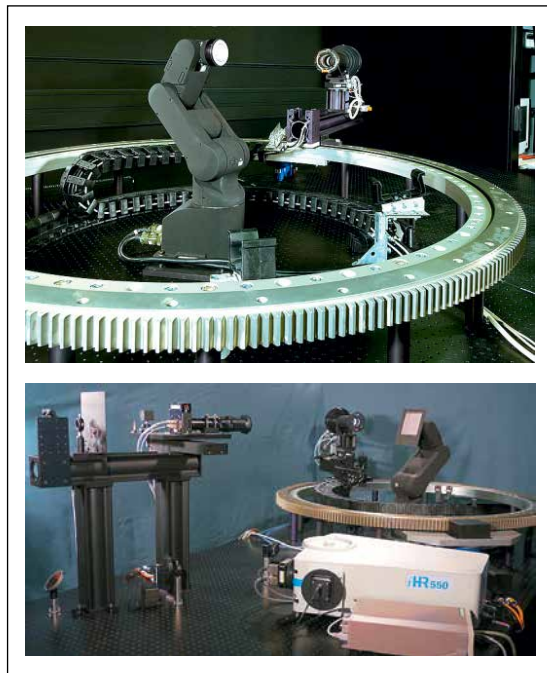


Bild 7: Die beiden roboterbasierten Gonioreflektometer der PTB, oben: Standard-Gonioreflektometer für Kundenkalibrierungen, unten: ARGon3-Messplatz für Forschungsanwendungen.

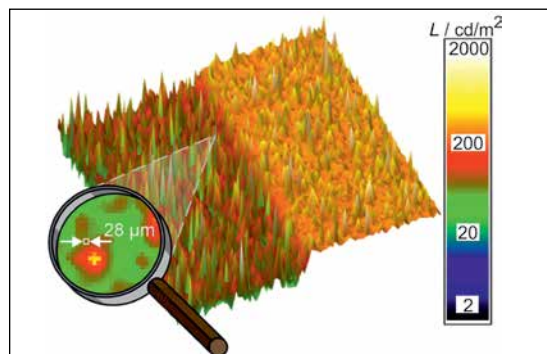


Bild 8: Visualisierung des Sparkling-Effektes von Xirona®-Volcanic-Sparks-Pigmenten als Falschfarbendarstellung der ortsaufgelösten Leuchtdichte. Die „Nadeln“ zeigen die Position der Pigmente an.

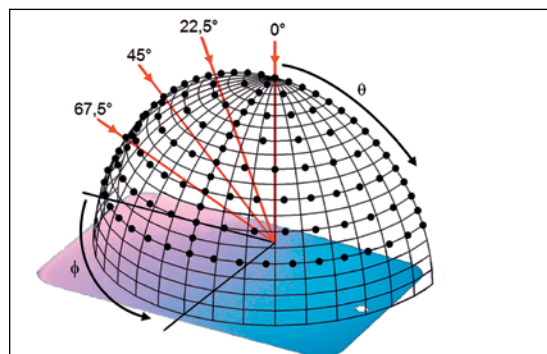


Bild 9: Beispielgeometrien zur Messung der winkelabhängigen Reflexionseigenschaften. Realisiert wurden 4 Einstrahlungsrichtungen (rote Pfeile) mit jeweils 114 Reflexionswinkeln (schwarze Punkte) im Bereich der Viertelkugel oberhalb der Probenoberfläche.

bereich 0° bis 70° gleichmäßig verteilt über den Viertelraum oberhalb der Probe dauert hierbei ca. 4 Stunden [14]. Die so erhaltenen Daten bilden die Basis für künftige Verbesserungen in der Messtechnik für Anwender und Hersteller.

Im Rahmen des EMRP-Projektes *Multidimensional Reflectometry for Industry* [13] sind damit die winkelabhängigen Reflexionsspektren von insgesamt 66 verschiedenen Effektpigmentproben gemessen worden [15, 16]. Bei den vier verschiedenen Einstrahlungsrichtungen, verbunden mit jeweils 114 Reflexionswinkeln im Bereich der Viertelkugel oberhalb der Probenoberfläche, ergeben sich somit über 30.000 Reflexionsspektren.

Zielsetzung der Untersuchungen ist die Verbesserung der Metrologie zur Materialcharakterisierung mit reduzierter Messunsicherheit. Dazu werden neue Messvorschriften und neue Standardmessartefakte entwickelt, mit denen die Industrie die visuelle Wahrnehmung der von ihr produzierten Oberflächen gezielt charakterisieren und kontrollieren kann. Solche Messungen sollten einfach auszuführen sein und die Ergebnisse müssen soweit wie möglich mit der visuellen menschlichen Wahrnehmung korrelieren. Im europäischen und internationalen Rahmen sollen die Ergebnisse in die Normung einfließen, um die allgemeine Vergleichbarkeit solcher Messungen zu gewährleisten.

Literatur

- [1] C.S. Henshilwood et al.; A 100,000-Year-Old Ochre-Processing Workshop at Blombos Cave, South Africa; *Science*; Vol. 334; No. 6053; 219–222; 2011
- [2] Mark D. Fairchild; *Color Appearance Models*; 2nd Ed.; John Wiley & Sons Ltd.; 2005
- [3] *Colorimetry: Understanding the CIE System*; ed. by J. Schanda; Wiley-Interscience NJ; 2007
- [4] W.R. Cramer; Der richtige Blickwinkel; *Farbe & Lack* 09/2006; 26–30; 2006
- [5] G. Zaltman; *How Customers Think: Essential Insights into the Mind of the Market*; Harvard Business Review Press; 2003
- [6] DIN ISO 18451-1:2015-11; Pigmente, Farbstoffe und Füllstoffe – Begriffe – Teil 1: Allgemeine Begriffe
- [7] W.R. Cramer; Ohne Glimmer, aber mit Glanz; *Farbe & Lack* 04/2003; 132–136; 2003
- [8] W.R. Cramer; Es glitzert wie am Sternenhimmel; *Fahrzeug + Karosserie* 04/12; 20–22; 2012
- [9] E. Kirchner, W. Cramer; Making sense of measurement geometries for multi-angle spectrophotometers; *Color Res. Appl.*, Vol. 37, No.3; 186–198; 2012
- [10] D. Hünerhoff, U. Grusemann, A. Höpe; New robot-based gonireflectometer for measuring spectral diffuse reflection; *Metrologia* 43; S11–S16; 2006
- [11] A. Höpe, D. Hünerhoff, K.-O. Hauer; Robot-based gonireflectometer; *Industrial Robotics: Programming, Simulation and Applications*; Low; Kin-Huat; Ed.; Pro Literatur-Verlag; Mammendorf; 623–632; 2007
- [12] A. Höpe, T. Atamas, D. Hünerhoff, S. Teichert, K.-O. Hauer; ARGon³ – „3D Appearance Robot-based Gonireflectometer“ at PTB; *Rev. Sci. Instrum.* 83(4); 045102-1–045102-8; 2012
- [13] European Metrology Research Program; Project IND52; „xD-Reflect“ Multidimensional Reflectometry for Industry; www.xdreflect.eu (letzter Aufruf: 03.12.2015)
- [14] T. Atamas, K.-O. Hauer, A. Höpe; Appearance measurements of goniochromatic colours; *Predicting Perceptions: Proceedings of the 3rd International Conference on Appearance*; 149–154; 2012
- [15] A. Höpe, A. Koo, F.M. Verdu, F.B. Leloup, G. Obein et al.; „Multidimensional reflectometry for industry“ (xD-Reflect) an European research project; *Proc. SPIE 9018; Measuring, Modeling, and Reproducing Material Appearance*; SPIE-IS&T/ Vol. 9018; 901804-1–901804-11; 2014
- [16] A. Höpe, K.-O. Hauer, S. Teichert, D. Hünerhoff, C. Strothkämper; Goniochromatic and Sparkle properties of effect pigmented samples in multidimensional configuration; *Proc. SPIE 9398; Measuring, Modeling and Reproducing Material Appearance 2015*; SPIE Proc. Vol. 9398 Appearance; 939800-1–7; 2015

Aktuelles aus der OIML

(Internationale Organisation für das Gesetzliche Messwesen)

Bericht über die 50. Sitzung des CIML in Arcachon, Frankreich

Susanne Ludwig*, Roman Schwartz**

Die 50. Sitzung des Internationalen Komitees für das gesetzliche Messwesen (CIML) fand vom 20. bis 22. Oktober 2015 in Arcachon, Frankreich, statt. Im Vorfeld der CIML-Sitzung fand ein ein-tägiges OIML-Seminar über *Countries and Economies with Emerging Metrology Systems* (CEEMS) statt, über das weiter unten berichtet wird.

Das CIML ist der Lenkungsausschuss der OIML. Es trifft sich jährlich und besteht aus je einem Repräsentanten der Mitgliedstaaten, der korrespondierenden Mitglieder und den Vertretern internationaler und regionaler Organisationen, die als Beobachter teilnehmen können. Das CIML ist zuständig für die Vorbereitung und Durchführung der Entscheidungen der Konferenz, die alle vier Jahre stattfindet. Es überwacht die Arbeiten der Technischen Komitees und Unterkomitees und des Internationalen Büros für das gesetzliche Messwesen (BIML) in Paris.

An der 50. CIML-Sitzung nahmen 144 Teilnehmer aus 43 Mitgliedstaaten und 13 korrespondierenden Mitgliedstaaten teil. Zur deutschen Delegation gehörten neben den o. g. Autoren auch die Herren Johann Fischer, Direktor des Landesamts für Mess- und Eichwesen Berlin-Brandenburg, sowie Prof. Olaf Kühn, Direktor des Thüringer Landesamts für Verbraucherschutz, als Vertreter der Bundesländer, Dr. Peter Ulbig, Leiter der Abteilung Wissenschaftlich-technische Querschnittsaufgaben der PTB, und Prof. Manfred Kochsiek, Vizepräsident a. D. der PTB, ehemaliger CIML-Präsident und Ehrenmitglied der OIML. Frau Dr. Anna Cypionka, persönliche Referentin des Präsidenten der PTB, nahm am OIML-Seminar für CEEMS teil. Vertreten waren auch wieder internationale und regionale Organisationen, zu denen die OIML Verbindungen unterhält, wie das *Internationale Büro für Maß und Gewicht* (BIPM), die *GSO-GCC Standardization Organization* (Saudi-Arabien), die *International Laboratory Accreditation Cooperation* (ILAC) und der Europäische Verband der Waagenhersteller (CECIP).

Alle Beschlüsse der 50. CIML-Sitzung können auf den Internetseiten der OIML aufgerufen werden [1, 2].

Die wichtigsten Entscheidungen und Entwicklungen werden nachfolgend vorgestellt.

1. Personalangelegenheiten

Der Vertrag von Willem Kool als *Assistant Director* wurde um vier Jahre, der Vertrag des BIML-Direktors Stephen Patoray um drei Jahre verlängert.

2. Einführung des PG Workspace im Internet

In seinem Bericht im Zusammenhang mit der Etablierung des neuen Webauftritts der OIML hob der CIML-Präsident, Peter Mason (UK), die erfolgreiche Einführung des *Workspace* für Projektgruppen hervor. Durch die Online-Arbeit wird erwartet, dass die technische Arbeit an neuen bzw. zu revidierenden OIML-Dokumenten vereinfacht und insgesamt effizienter wird.

3. Revision der technische Richtlinien für die OIML (B 6 Directives for OIML technical work)

In einem neuen Projekt sollen die in den vergangenen Jahren revidierten OIML-Richtlinien für die technische Arbeit erneut überarbeitet werden, um u. a. den Prozess der Entwicklung und Überarbeitung von OIML-Publikationen noch weiter zu beschleunigen und den neuen internetbasierten Technologien und Arbeitsweisen Rechnung zu tragen.

4. Umfassende, strukturelle Überarbeitung des OIML Certificate System

Das CIML verabschiedete die Gründung einer Projektgruppe mit der Aufgabe einer substanziellen Überarbeitung des OIML-Zertifizierungssystems, das z. Zt. aus dem Basiszertifizierungssystem und dem MAA³ besteht. Ursprünglich ausgehend von der Annahme, die Akzeptanz des MAA-Zertifizierungssystem müsse verstärkt werden, eine größere Verbreitung finden und mehr Messgerätearten abdecken, erscheint es

* Susanne Ludwig, OIML-Geschäftsstelle der PTB, E-Mail: susanne.ludwig@ptb.de

** Dir. u. Prof. Dr. Roman Schwartz, Vizepräsident der PTB, deutsches Mitglied im Internationalen Komitee für das Gesetzliche Messwesen (CIML) und CIML-Vizepräsident, E-Mail: roman.schwartz@ptb.de

³ Mutual Acceptance Arrangement (Abkommen zur gegenseitigen Anerkennung von Bauartprüfungen)

inzwischen sinnvoller und wurde so auch vom CIML beschlossen, zum 1.1.2017 ein einziges OIML-Zertifizierungssystem einzuführen. Eine Projektgruppe (*Certification System Project Group* = CSPG) unter dem Vorsitz des CIML-Vizepräsidenten, Dr. Roman Schwartz, wurde damit beauftragt, die notwendigen Dokumente und Prozeduren auszuarbeiten.

5. OIML-Seminar für *Countries and Economies with Emerging Metrology Systems* (CEEMS)

Im Vorfeld der CIML-Sitzung wurde ein eintägiges Seminar zum Thema *Developing an OIML Package for Assistance to Countries with Emerging Metrology Systems* (CEEMS) abgehalten. In vier Sitzungen diskutierten 125 Teilnehmer aus 49 Ländern über Möglichkeiten, Länder beim Aufbau von nationalen Metrologiesystemen zu unterstützen. In der ersten, von Frau Dr. Cypionka geleiteten Sitzung *Capacity Building*, ging es um die allgemeinen Herausforderungen bei der Gestaltung von Programmen zur Förderung von Handlungskompetenzen und Vermittlung von Wissen für die Metrologie. In zwei weiteren Sitzungen wurden unter den Themen *Helping CEEMS Improve Regulation in their Markets* (Leitung Prof. Dr. Manfred Kochsiek) und *New Ideas – Doing Legal Metrology Differently* (Leitung Stuart Carstens,

Südafrika) konkrete inhaltliche Lösungsvorschläge vorgestellt und diskutiert. Die Ergebnisse wurden in der 50. CIML-Sitzung vorgestellt und fanden ihren Niederschlag in der Resolution Nr. 2015/10 [2]; sie sollen auch noch auf den OIML-Webseiten veröffentlicht werden [1].

6. OIML-Publikationen

Folgende OIML-Publikationen wurden verabschiedet:

R 139-3 Compressed gaseous fuels measuring systems for vehicles. Part 3: Test report format.

New Recommendation (R 145): *Ophthalmic instruments — Impression and applanation tonometers.*

Alle OIML-Publikationen stehen im Internet frei zur Verfügung [3].

Gleichzeitig wurde die Revision der folgenden OIML-Publikation beschlossen:

Revision of R 79: Labeling requirements for prepackages.

Folgende neue Projekte wurden verabschiedet:

Revision des OIML-Dokuments *B 6-1 Directives for OIML technical work.*

Bild 1: Teilnehmer der 50. Sitzung des Internationalen Komitees für Gesetzliches Messwesen (CIML) in Arcachon, Frankreich



TC 8/SC 1: *Revision R 71 Fixed storage tanks — General requirements.*

TC 8/SC 1: *Revision R 85 Automatic level gauges for measuring the level of liquid in stationary storage tanks.*

7. Personalien und Ehrungen

Die von Dr. Seiler, dem ehemaligen Leiter des Fachbereichs „Technische Zusammenarbeit“ der PTB, initiierte OIML-Auszeichnung für „exzellente Beiträge von Entwicklungsländern zum gesetzlichen Messwesen“ ging in diesem Jahr an

- Nam Hyuk Lim, *Director of Korea Testing Certification*

und

- *The Metrology Department, Saint Lucia Bureau of Standards.*

Die OIML-Medaille für besondere Verdienste um die OIML-Arbeit ging an Ngo Quy Viet, Vietnam und Cartaxo Reis aus Portugal.

8. Termine

Ein Gastgeberland für die 51. CIML-Sitzung und 15. OIML-Konferenz im Jahr 2016 konnte noch nicht bekannt gegeben werden, es wird aber wahrscheinlich wieder Frankreich sein. Weitere OIML-Veranstaltungen und -Termine finden sich auf der OIML-Webseite unter [4].

9. Literatur

- [1] <https://www.oiml.org/en>
(letzter Aufruf: 19.11.2015)
- [2] <https://www.oiml.org/en/structure/ciml/pdf/50-ciml-resolutions-english.pdf>
(letzter Aufruf: 19.11.2015)
- [3] https://www.oiml.org/en/publications/recommendations/publication_view?p_type=1&p_status=1
(letzter Aufruf: 19.11.2015)
- [4] <https://www.oiml.org/en/events/calendar>
(letzter Aufruf: 19.11.2015)



Abbildung des E27-Kugelscanners: Eine stark fokussierende Lampe, die computergesteuert in alle Richtungen leuchten kann.

Vorteile:

- Schneller Einbau in E27-Fassung
- Computergesteuertes Abscannen der gesamten Ulbrichtkugel
- Flexible Messmöglichkeiten
- Für genauere Lichtstrommessungen
- Wichtig für die Qualitätssicherung

Ansprechpartner:

Dr. Bernhard Smandek
Beauftragter für Technologietransfer
Telefon: +49 531 592-8303
Telefax: +49 531 592-69-8303
E-Mail: technologietransfer@ptb.de

Dr. Stefan Winter
Fachbereich
Photometrie und Radiometrie

www.technologietransfer.ptb.de

PTB-Nummer 0172

E27-Scanner für Ulbrichtkugeln

Mit dem besonders einfach ohne Umbau einsetzbaren E27-Scanner können Anwender und Hersteller die Homogenität ihrer Ulbrichtkugeln bestimmen und die Ergebnisse zur Berechnung genauerer Lichtströme und zur Dokumentation der Qualität ihrer Messungen nutzen.

Hintergrund

Wie viel Licht eine Lampe insgesamt in alle Richtungen abstrahlt, wird durch ihren Lichtstrom ausgedrückt. Um den für die Bestimmung der Energieeffizienz von Lampen notwendigen Lichtstrom schnell zu ermitteln, setzt die Lampenindustrie Ulbrichtkugeln ein. An einer Stange in der Mitte der Ulbrichtkugel befindet sich eine E27-Lampenfassung, in die nacheinander die Lichtstrom-Normallampe und die zu kalibrierende Lampe eingeschraubt werden. Das indirekt auf den Messkopf fallende Licht erzeugt einen Photostrom, der im Idealfall proportional zu dem von der Lampe abgestrahlten Lichtstrom ist, unabhängig von der Richtung, in die das Licht abgestrahlt wird.

Dies ist jedoch bei einer ungleichmäßigen Beschichtung der Kugel sowie bei einer im Laufe der Zeit nicht zu verhindernden Verstaubung nicht der Fall. Deshalb wird mit einem Kugelscanner die Homogenität der Kugel regelmäßig vermessen und ein Korrekturfaktor bestimmt, der von der jeweiligen Abstrahlcharakteristik der zu untersuchenden Lampe abhängt.

Technische Beschreibung

Der Kugelscanner wird einfach in eine E27-Fassung geschraubt und das sonst für die Lampenversorgung eingesetzte Netzgerät wird durch die Steuereinheit ersetzt. Diese übernimmt sowohl die elektrische Versorgung als auch die Befehlsübermittlung zum Kugelscanner. Die Steuereinheit wird via USB oder RS232 an einen Computer angeschlossen. Das mitgelieferte Messprogramm stellt automatisiert alle gewünschten Richtungen ein und speichert die zugehörigen von der Steuereinheit gemessenen Photoströme des Photometers.

Wirtschaftliche Bedeutung

Für Lampenindustrie und Hersteller von Ulbrichtkugeln:

- Genauere Messung des Lichtstroms
- Bestimmung des Zeitpunkts einer Neubeschichtung
- Überwachung beim Beschichten
- Dokumentation des Zustands der Ulbrichtkugel

Entwicklungsstand

Der E27-Kugelscanner wurde in der PTB entwickelt. Er wird laufend für Kalibrierungen eingesetzt. Die Technologie wurde an die Firma Czibula & Grundmann transferiert und wird dort mit einer PTB-Lizenz gebaut und vertrieben: www.photo-meter.com.

Umwandlung gepulster Laser-Strahlung in konstante Strahlung

In weiten Bereichen der optischen Metrologie ist eine Strahlungsquelle von großem Nutzen, die sich spektral vom UV-C bis ins mittlere IR durchstimmen lässt. Lediglich Laser mit gepulster Strahlung erfüllen diese Anforderung bei ausreichend großem Ausgangssignal bisher lückenlos. Femtosekunden-Lasersysteme wären aufgrund ihrer gut automatisierbaren und spektral weiten Durchstimbarkeit die ideale Strahlungsquelle für z. B. radiometrische Anwendungen – wenn ihre Strahlung nicht gepulst wäre.

Durch das extreme Puls-Pausen-Verhältnis von 10^{-5} entstehen hohe Spitzenleistungen, die wiederum zu Sättigungseffekten bei Detektoren und in der Folge zu nichtlinearem Verhalten führen können. Mit dem in der PTB entwickelten Puls-zu-CW-Konverter wird dieses Problem gelöst.

Technische Beschreibung

Bei dieser Methode werden Pulse gepulster Strahlungsquellen ausreichend hoher Repetitionsrate in CW-Strahlung umgewandelt. Dabei wird jeder Puls in viele kleine Teilpulse aufgeteilt, die auf unterschiedlich langen Wegstrecken unterschiedliche Laufzeiten erfahren. Am Ausgang des Systems erscheinen sie dann zeitlich gleichmäßig verteilt. Realisiert wird dieser Puls-zu-CW-Konverter über ein Glasfaserbündel, bei dem jede Einzelglasfaser eine individuell festgelegte Länge besitzt.

Mit der Entwicklung des Puls-zu-CW-Konverters wurde das entscheidende Manko beim Einsatz leistungsstarker Femtosekunden(fs)-Lasersysteme im Bereich der Metrologie beseitigt und erstmalig gepulste Laserstrahlung in CW-Strahlung umgewandelt. Diese Neuentwicklung ermöglicht es nun, herkömmliche Monochromatorsysteme durch fs-Lasersysteme zu ersetzen, die eine bis zu 1000-mal höhere spektrale Ausgangsleistung besitzen.

Wirtschaftliche Bedeutung

Durch den neuen Puls-zu-CW-Converter können in wirtschaftlich bedeutenden Bereichen wie z. B. der Photovoltaik, der Photometrie, der UV-Strahlungsmesstechnik und der Reflektometrie die Referenz- und Transfornormale mit einer deutlich reduzierten Messunsicherheit kalibriert werden. Hier werden bislang wesentliche Messunsicherheitsanteile durch zu geringe Strahlungsleistungen aus herkömmlichen Monochromatorsystemen verursacht.

Entwicklungsstand

Unter DE 10 2010 011 615 B4 wurde für den CW-Konverter ein Patent erteilt.



Puls-zu-CW-Konverter

Vorteile:

- Zeitliche Glättung gepulster Laserstrahlung
- Keine störenden Interferenzen
- Nur minimale Absorption des Messsignals
- Auch bei kürzeren Wellenlängen ohne Ulbrichtkugel verwendbar
- Kontinuierliche Verteilung des Ausgangspulses
- Pulsvervielfachung
- Höhere Strahlungsleistung

Ansprechpartner:

Dr. Bernhard Smandek
Beauftragter für Technologietransfer
Telefon: +49 531 592-8303
Telefax: +49 531 592-69-8303
E-Mail: technologietransfer@ptb.de

Dr. Stefan Winter
Arbeitsgruppe
Solarzellen

www.technologietransfer.ptb.de

PTB-Nummer 0254



Stahlungsmessplatz der PTB zur Kalibrierung von Temperaturstrahlern und Wärmebildkameras

Vorteile:

- Schnelle Kalibrierung von Flächensensoren (FPA)
- Schnelle Kalibrierung von Flächenstrahlern
- Strahlquellen höchster Homogenität
- Für Thermografie und Photometrie

Ansprechpartner:

Dr. Bernhard Smandek
 Beauftragter für Technologietransfer
 Telefon: +49 531 592-8303
 Telefax: +49 531 592-69-8303
 E-Mail: technologietransfer@ptb.de

Dipl.-Ing. Berndt Gutschwager
 Arbeitsgruppe
 Infrarot-Strahlungsthermometrie

www.technologietransfer.ptb.de

PTB-Nummer 00374

Homogenisierung von Strahlungsquellen und Focal Plane Arrays (FPA)

Ein neuartiges Verfahren ermöglicht softwaregestützt eine deutlich verbesserte Kalibrierung von Mehrelement-Sensoren (FPA) und bildgebenden Systemen (Kameras). Bei flächigen Strahlungsquellen kann zusätzlich eine gezielte Ansteuerung von Flächenelementen zu einer bisher im Allgemeinen nicht erreichbaren Flächenhomogenität führen.

Technische Beschreibung

Flächenstrahler dienen der Kalibrierung von ortsauflösenden Strahlungssensoren, wobei davon ausgegangen wird, dass die Emissionsfläche des Strahlers im Wesentlichen homogen bezüglich ihrer Strahldichte bzw. Strahlungstemperatur ist. Um kleine Inhomogenitäten eines Flächenstrahlers zu charakterisieren, ist es ein gängiges Verfahren, die Emissionsfläche punktweise mit einem Einzeldetektor abzutasten.

Das neue PTB-Verfahren ist wesentlich schneller, da es den Mehrelement-Sensor (FPA), das *device-under-test*, selbst nutzt und damit immer ein Gesamtbild der Quelle aufnimmt. Werden jetzt weitere Bilder zeilen- oder spaltenversetzt aufgenommen, so erlaubt ein mathematischer Algorithmus bei nur drei Bildern eine komplette Charakterisierung des Sensors, aber auch der Quelle.

Sind Flächenelemente der Strahlungsquelle einzeln ansteuerbar, so ist es sogar möglich, mittels der ermittelten Korrekturwerte zu Strahlquellen extrem hoher Homogenität im *on-line*-Betrieb zu gelangen.

Wirtschaftliche Bedeutung

Bildgebende Strahlungssensoren und homogene Strahlungsquellen sind relevant für die Forschung und Entwicklung, für die Prozesstechnik, für die Charakterisierung der Energieeffizienz von Bauteilen, bei der Entwicklung neuer Bauteile mit hoher thermischer Belastung und in vielen weiteren Bereichen. Der mathematische Algorithmus ist aber auf unterschiedliche Arten von Kamerasystemen anwendbar und damit auch für die Qualitätssicherung von CCD-Kameras bis hin zum Konsumgütermarkt anwendbar.

Entwicklungsstand

Eine deutsche Patenterteilung erfolgte im September 2015. Eine PCT-Anmeldung ist anhängig. Kooperations- und Lizenzpartner aus den Bereichen Thermografie, Radiometrie und Photometrie zur Umsetzung des Konzeptes werden gesucht.

Impressum

Die PTB-Mitteilungen sind metrologisches Fachjournal der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. Als Fachjournal veröffentlichen die PTB-Mitteilungen wissenschaftliche Fachaufsätze zu metrologischen Themen aus den Arbeitsgebieten der PTB. Die PTB-Mitteilungen stehen in einer langen Tradition, die bis zu den Anfängen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (gegründet 1887) zurückreicht.

Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7
28195 Bremen
Internet: www.schuenemann.de
E-Mail: info@schuenemann-verlag.de

Herausgeber

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB),
Braunschweig und Berlin
Postanschrift:
Postfach 33 45,
38023 Braunschweig
Lieferanschrift:
Bundesallee 100,
38116 Braunschweig

Redaktion/Layout

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, PTB
Sabine Siems
Dr. Dr. Jens Simon (verantwortlich)
Prof. Dr. Stefan Kück,
(wissenschaftlicher Redakteur)
Telefon: (05 31) 592-82 02
Telefax: (05 31) 592-30 08
E-Mail: sabine.siems@ptb.de

Leser- und Abonnement-Service

Karin Drewes
Telefon (0421) 369 03-56
Telefax (0421) 369 03-63
E-Mail: drewes@schuenemann-verlag.de

Anzeigenservice

Karin Drewes
Telefon (0421) 369 03-56
Telefax (0421) 369 03-63
E-Mail: drewes@schuenemann-verlag.de

Erscheinungsweise und Bezugspreise

Die PTB-Mitteilungen erscheinen viermal jährlich. Das Jahresabonnement kostet 39,00 Euro, das Einzelheft 12,00 Euro, jeweils zzgl. Versandkosten. Bezug über den Buchhandel oder den Verlag. Abbestellungen müssen spätestens drei Monate vor Ende eines Kalenderjahres schriftlich beim Verlag erfolgen.

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieser Zeitschrift darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages vervielfältigt oder verbreitet werden. Unter dieses Verbot fällt insbesondere die gewerbliche Vervielfältigung per Kopie, die Aufnahme in elektronische Datenbanken und die Vervielfältigung auf CD-ROM und in allen anderen elektronischen Datenträgern.

Printed in Germany ISSN 0030-834X

Die fachlichen Aufsätze aus dieser Ausgabe der PTB-Mitteilungen sind auch online verfügbar unter:
doi: 10.7795/310.20150499



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, das nationale Metrologieinstitut, ist eine wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, das nationale Metrologieinstitut, ist eine wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.



Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin
Nationales Metrologieinstitut

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Telefon: 0531 592-3006
Fax: 0531 592-3008
E-Mail: presse@ptb.de
www.ptb.de