

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

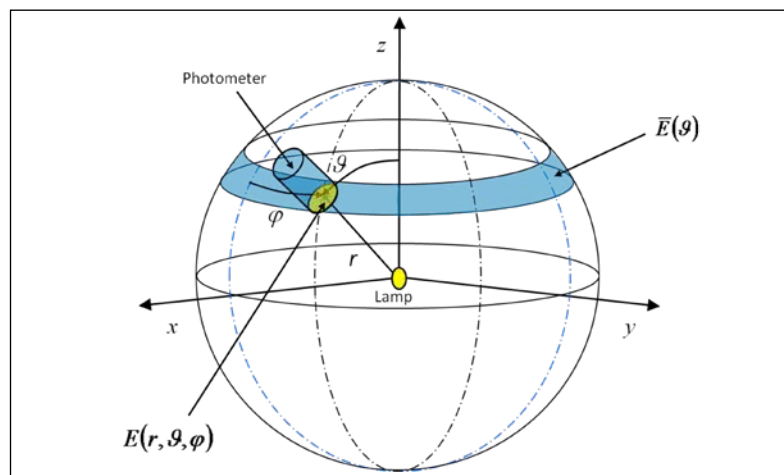


Bild 1:
Beleuchtungsstärke E als Funktion des Radiusvektors $r(\vartheta, \varphi)$

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

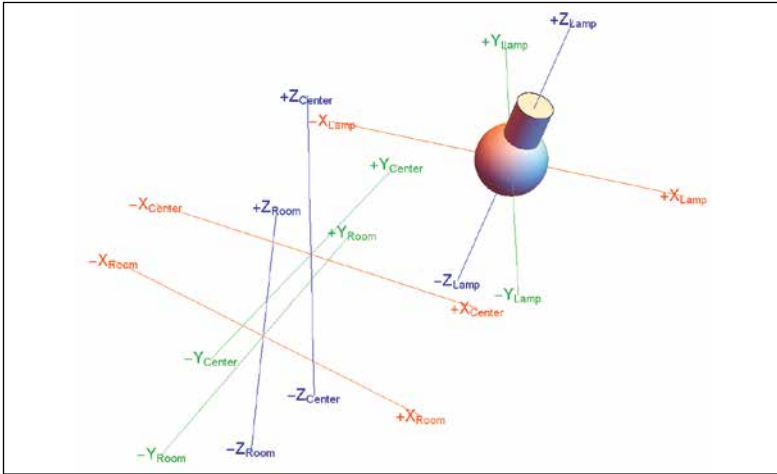


Bild 1a: Koordinatensysteme

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

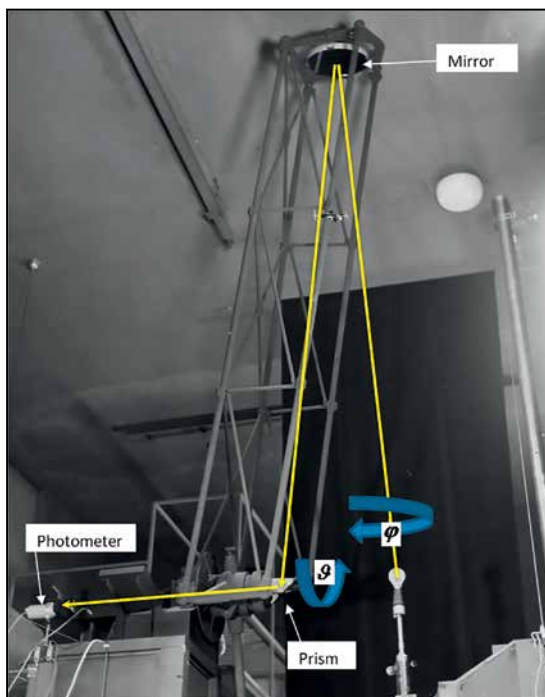


Bild 2: Einarm-Goniophotometer 1950–1975

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-Normlampe 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-

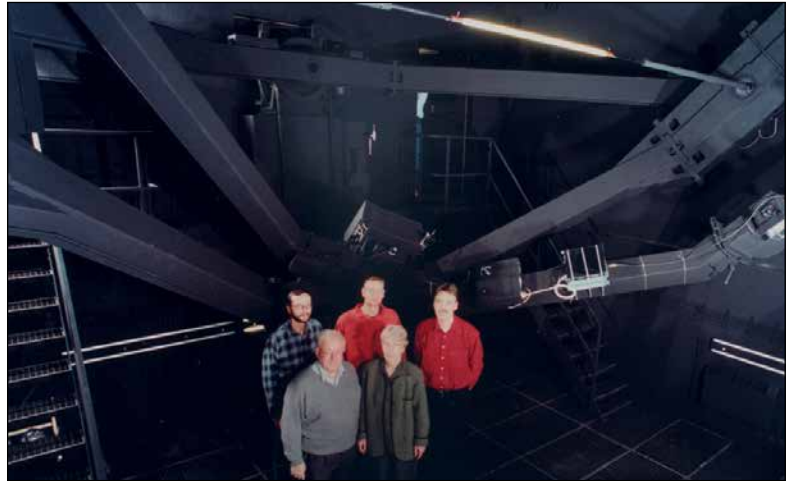


Bild 3:
Kardan-Goniophotometer 1976–2007

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 Goniophotometerraum ($7 \times 10 \times 8 \text{ m}^3$) 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

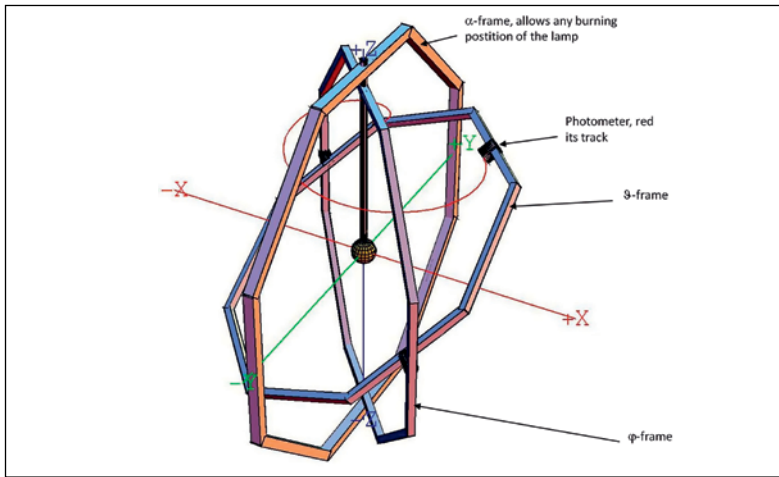


Bild 4: Großes Kardan-Goniophotometer 1976–2007

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-

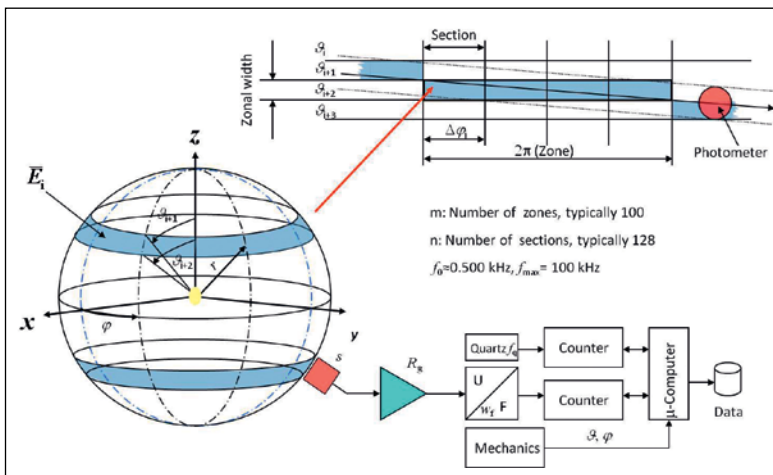


Bild 5: Signalfluss

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-Normallampe 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

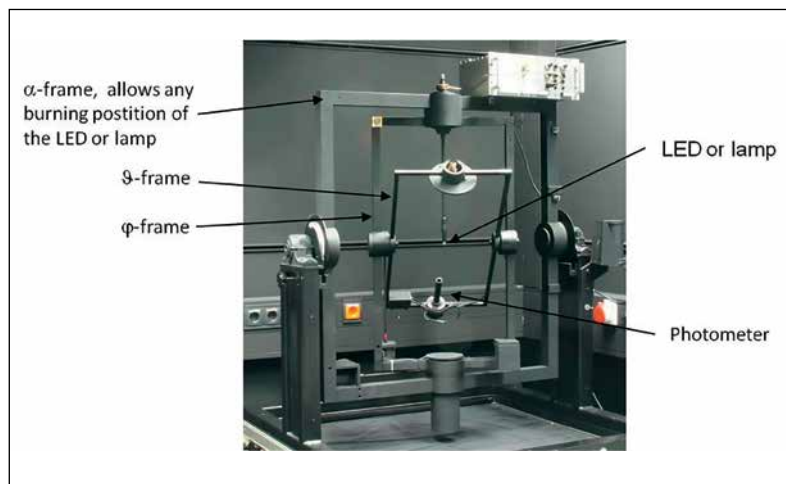


Bild 6:
Kleines Kardan-Goniophotometer 1982–2007

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

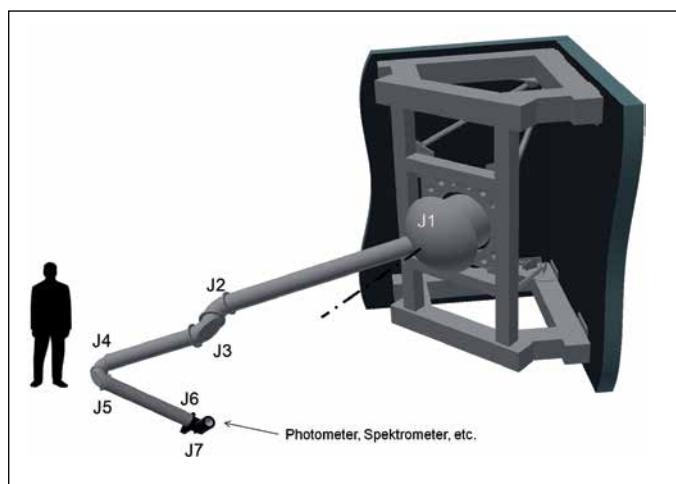


Bild 7:
Arm des Roboter-Goniophotometers



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	a_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

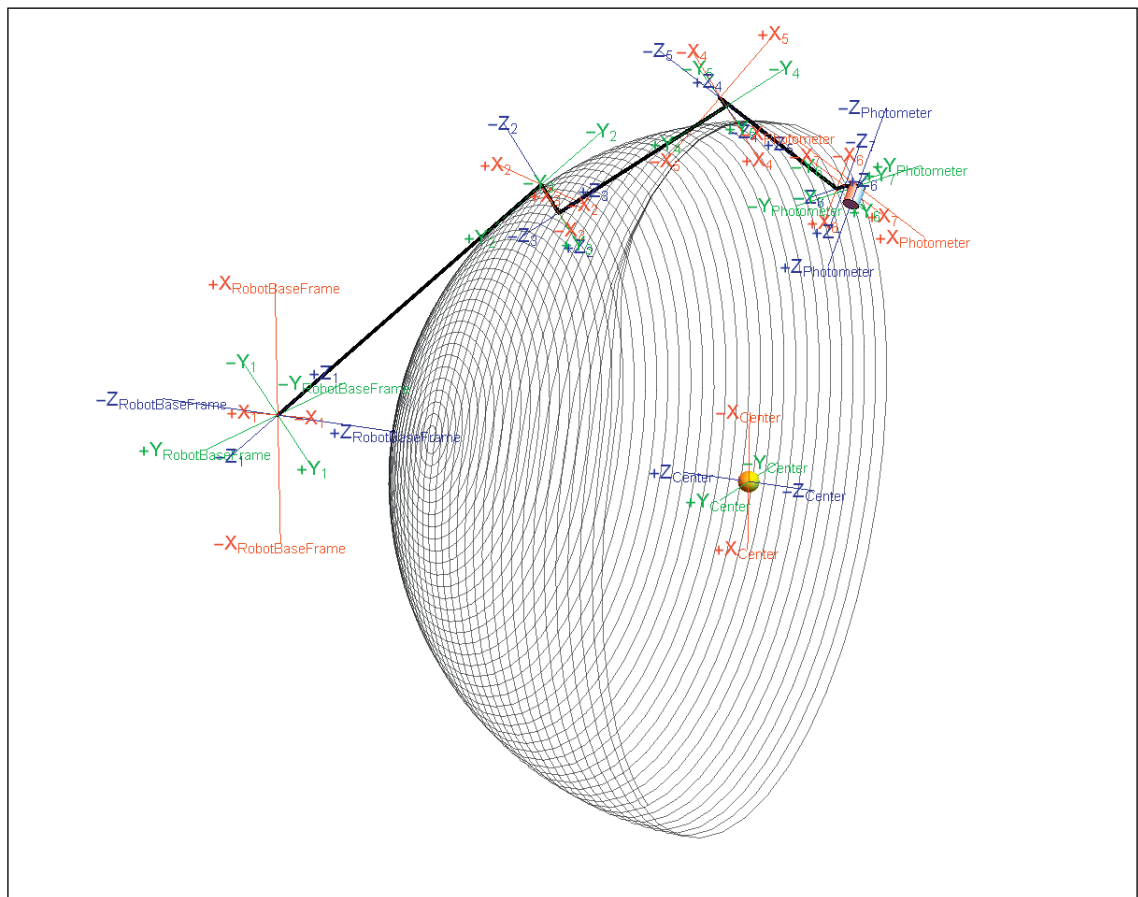


Bild 9: Koordinatensystem des Roboter-Goniophotometers und Beispielbahn

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].

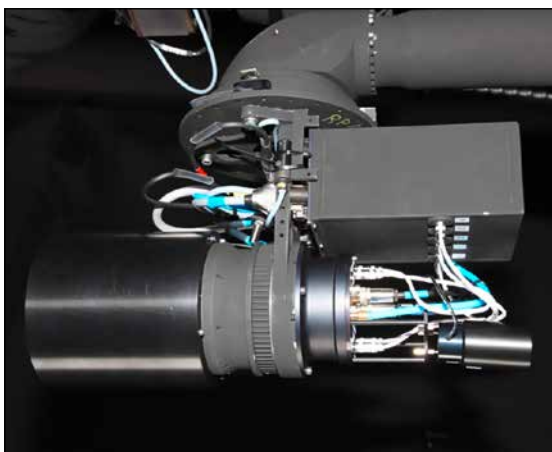


Bild 11: Photometer (links) und *Back-Looking-Photometer* (rechts)

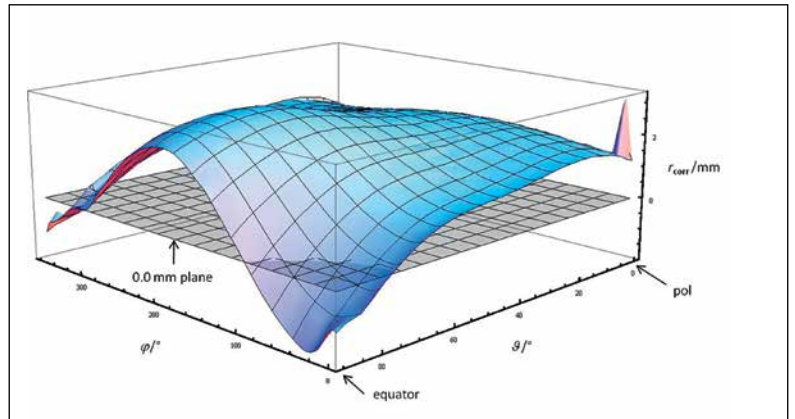


Bild 10: Wirkung der Radiuskorrektur

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

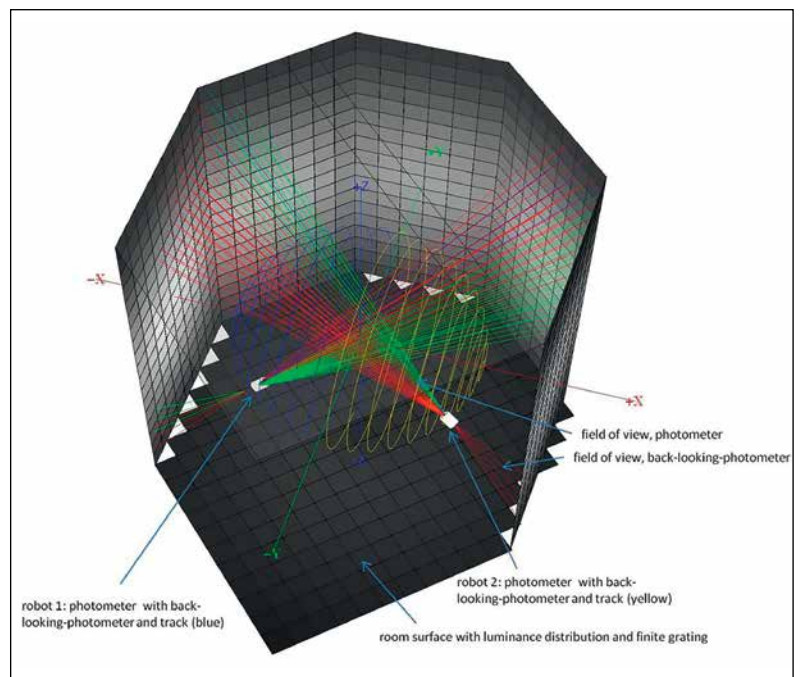
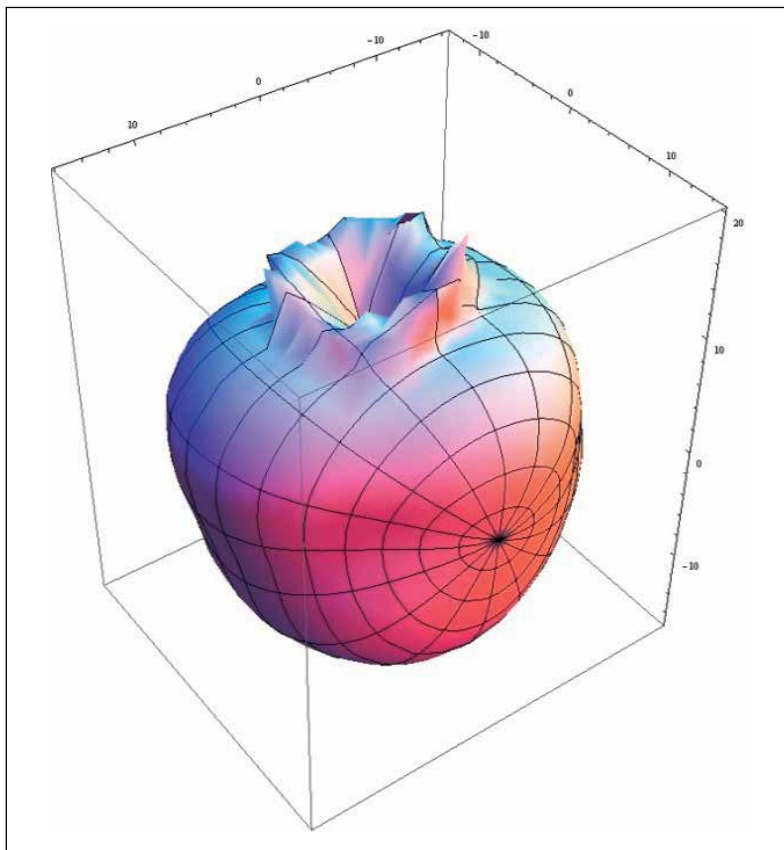


Bild 12: Wirkung des Streulichts und seine Bestimmung



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