

# Bewertung von Nahfeldgoniophotometern

Knut Bredemeier, Frank Gassmann, Udo Krüger, Franz Schmidt

TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, W.-v.-Siemens-Str. 5, 98693 Ilmenau  
eMail: [knut.bredemeier@technoteam.de](mailto:knut.bredemeier@technoteam.de)

## 1 Einleitung

Messverfahren mit klassischen Goniophotometern behandeln die leuchtenden 3D-Oberflächen von Lichtquellen wie Punktlichtquellen d.h. sie geben die Wirkung der Lichtausstrahlung nur für große Abstände als Lichtstärkeverteilungskörper an /4/.

Ein Nahfeldgoniophotometer ist ein Goniophotometer mit dem Messungen im Nahfeld der Lichtquelle ausgeführt werden und dessen Photometerkopf durch eine Leuchtdichtemesskamera ersetzt wurde /7/. Damit wird die Wirkung der Ausstrahlungscharakteristik für einzelne Elemente der realen oder einer virtuellen Oberfläche der Lichtquelle als Verteilung von Leuchtdichten erfasst und als Strahlenfeld gemessen.

Die Werte des Strahlenfeldes werden als Strahlen bezeichnet /1, 6, 5, 9/. Sie erlauben es, den Lichtstärkeverteilungskörper und den Lichtstrom der Lichtquelle zu berechnen. Die Bereitstellung des Strahlenfeldes ist Voraussetzung, um die Entwicklung von Leuchten und leuchtenden Baugruppen mit modernen Simulationswerkzeugen<sup>\*)</sup> zu ermöglichen (z.B. Reflektorberechnung, Entwicklung von lichtleitenden Elementen). Diese Vorgehensweise ist bei der Entwicklung neuer Halbleiterlichtquellen und Lampen für bestimmte Applikationen ebenso unverzichtbar, wie bei der Entwicklung, Konstruktion und Optimierung von Leuchten /3/.

Zur Verdeutlichung zeigt Abb. 1 von links nach rechts eine LED, die graphische Darstellung der Ausstrahlcharakteristik durch das zugehörige Strahlenfeld und die Simulation eines Scheinwerferreflektors für eine vorgegebene Richtungsverteilung des emittierten Lichtstroms unter Verwendung des Strahlenfeldes.

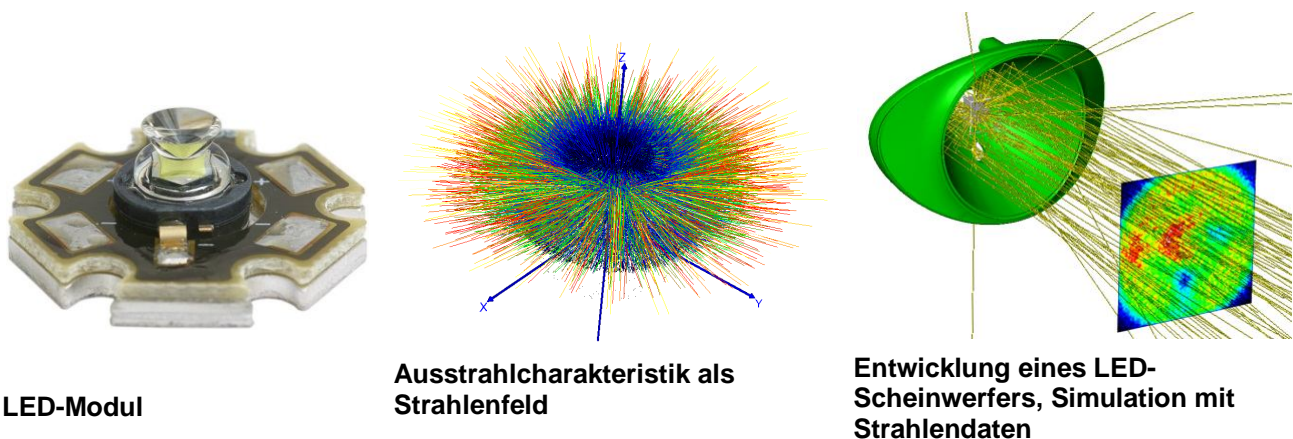


Abb. 1: von links nach rechts: LED-Modul, Darstellung der Ausstrahlcharakteristik durch das Strahlenfeld und Simulation eines Scheinwerferreflektors für eine vorgegebene Richtungsverteilung des emittierten Lichtstroms

<sup>\*)</sup> z.B. Speos, Asap, Light Tools, Zemax

## 2 Nahfeldgoniophotometer – Aufbau und Funktion

Zur Messung der Strahlen des Strahlenfeldes wird bei den Nahfeldgoniophotometern eine Leuchtdichtemesskamera auf einer Hüllfläche (bevorzugt Kugelfläche, z.B. unter Nutzung eines Goniophotometers) um das Messobjekt herumgeführt und in einem diskreten Winkelrastrer werden Leuchtdichtebilder aufgenommen. (/2/, siehe Abb. 2).

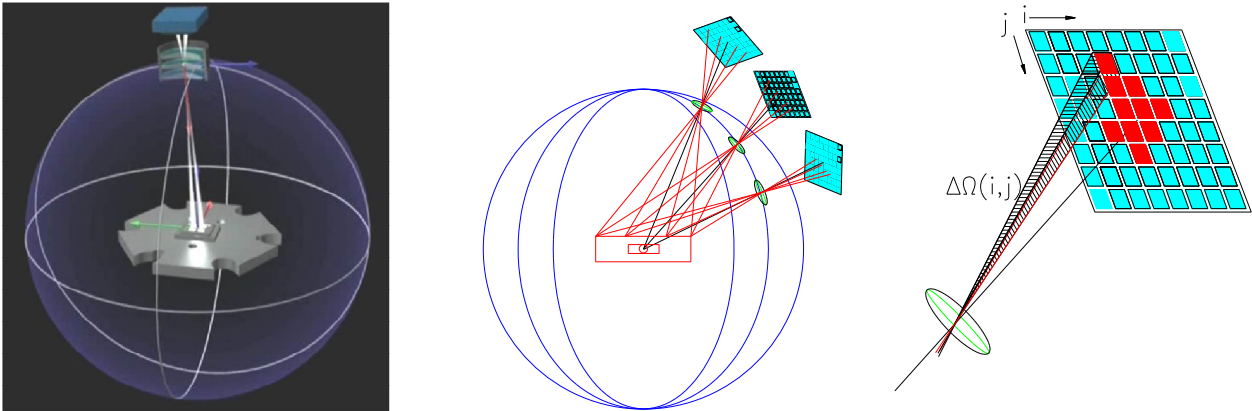


Abb. 2: Prinzip der Leuchtdichtebilderfassung in einem Nahfeldgoniophotometer

Das Goniophotometer übergibt die Leuchtdichtebilder mit den Positionen (Winkel  $\vartheta_{Dk}, \varphi_{Dl}$ ) an eine Recheneinheit (z.B. PC), die aus der Gesamtheit der Leuchtdichtebilder unter Kenntnis der geometrischen Verhältnisse im Moment der Bildaufnahme das Strahlenfeld berechnet.

### Strahlenberechnung

Ein Strahl  $\Delta\Phi(x, y, z, \vartheta, \varphi)$  wird ermittelt, indem die gemessene Leuchtdichte  $L(x, y, z, \vartheta, \varphi)$  auf dem Flächenanteil  $\Delta A(x, y, z)$  am Ort  $(x, y, z)$  für die Richtung  $(\vartheta, \varphi)$  über  $\Delta A(x, y, z)$  in dem Raumwinkelanteil  $\Delta\Omega(\vartheta, \varphi)$  nach folgender Gleichung berechnet wird:

$$\Delta\Phi(x, y, z, \vartheta, \varphi) = L(x, y, z, \vartheta, \varphi) \cdot \Delta A(x, y, z) \cdot \cos \vartheta \cdot \Delta\Omega(\vartheta, \varphi)$$

*für  $\forall \Delta A$  und  $\forall \Delta\Omega$*

$$\text{mit } \Delta A_p(x, y, z) = \Delta A(x, y, z) \cdot \cos \vartheta \quad (1)$$

$$\text{mit } \sum dA(x, y, z) = \text{Hüllfläche} \quad \text{und} \quad \sum d\Omega(\vartheta, \varphi) = 2\pi(\text{Halbraum})$$

Das Strahlenfeld ergibt sich, wenn alle Strahlen für alle Flächenanteile und dort für alle Raumwinkelanteile berechnet werden.

Mit der Kenntnis des Strahlenfeldes sind auch weitere lichttechnische Größen bestimmbar. Die Summe aller Teillichtströme der einzelnen Strahlen ergibt den **Gesamtlichtstrom**.

$$\Phi_{\text{mess}} = \sum \Delta\Phi(x, y, z, \vartheta, \varphi) \quad \text{für alle Strahlen} \quad (2)$$

Werden die Lichtstromanteile aller Strahlen, die in ein Raumwinkelsegment  $\Delta\Omega(\vartheta_k, \varphi_l)$  zeigen, unabhängig von ihrer Herkunft  $(x, y, z)$  addiert und auf das Raumwinkelsegment bezogen, erhält man die **Lichtstärke**.

$$I(\vartheta_k, \varphi_l) = \frac{\sum_{x,y,z} \Delta\Phi(x_s, y_s, z_s, \vartheta_s, \varphi_s)}{\Delta\Omega(\vartheta_k, \varphi_l)} \quad \forall \vartheta_s, \varphi_s \in \Delta\Omega(\vartheta_k, \varphi_l) \quad (3)$$

### 3 Abgleichen, Justieren

Die Justierung (VIM 3.11) eines Nahfeldgoniophotometers erfolgt durch den Hersteller. Unter Justieren wird die Menge aller Operationen an einem Messgerät verstanden, die dazu führen, dass das Gerät Anzeigewerte entsprechend einer gegebenen Referenzgröße liefert.

Nahfeldgoniophotometer messen das Strahlenfeld  $\Delta\Phi_i(x, y, z, \vartheta, \varphi)$ . Dieses Strahlenfeld wird in Form von Strahlendaten (ray file) kodiert. Das Strahlenfeld ist ein sehr großes Datenfeld ( $10^5 \dots 10^9$  Strahlen).

Zur Justierung werden sinnvolle integrale Messgrößen und dazugehörige Normale verwendet. Die Integration über die komplette Hüllfläche und alle Ausstrahlrichtungen liefert den Gesamtlichtstrom.

Die Kalibrierung des Nahfeldgoniophotometers auf Lichtstrom erfolgt mit einer kalibrierten Lichtstromnormallampe.

Der Lichtstrom der Normallampe wird gemessen, d.h. die Summe aller Lichtstromanteile der gemessenen Strahlen entsprechend Gleichung ( 2 ) gebildet und mit dem Lichtstrom der Normallampe verglichen. Daraus kann ein Kalibrierfaktor ermittelt und damit das Nahfeldgoniophotometer justiert werden.

### 4 Messunsicherheit der Strahlendaten

Die Strahlen  $\Delta\Phi(x_D, y_D, z_D, \vartheta_D, \varphi_D)$  stellen Lichtstromanteile dar, die ausgehend von den Orten  $(x_D, y_D, z_D)$  in die Richtungen  $(\vartheta_D, \varphi_D)$  weisen. Allen Werten dieser Strahlenvektoren (Lichtstromanteil  $\Delta\Phi$ , Fußpunkt  $(x_D, y_D, z_D)$  und Richtungen  $(\vartheta_D, \varphi_D)$ ) sind Messunsicherheiten (MU) beigeordnet.

Beim Nahfeldgoniophotometer werden Messwerte als Leuchtdichtebilder mit der Leuchtdichtemesskamera ermittelt und zusammen mit Werten für Orte und Richtungen vom Goniophotometer zu Strahlendaten umgeformt. Für diese Messwerte bewirken viele unterschiedliche Ursachen jeweils Beiträge zu den genannten Messunsicherheiten.

Bei der Bestimmung von Messunsicherheiten für die Strahlendaten sind folgende MU der verwendeten Daten zu berücksichtigen. Dabei sind auch die Korrelationen zwischen den Messwerten der Koeffizienten zu berücksichtigen:

#### 4.1 MU der Leuchtdichtebilder

Daten	MU
$L_{i,j}(\vartheta_C, \varphi_C)$	MU der Messwerte der Leuchtdichten in den Leuchtdichtebildern
$\vartheta_{Cj} = f_{\vartheta_C}(j), \varphi_{Cj} = f_{\varphi_C}(j)$	MU der Verzeichnungsdaten des Objektivs der Leuchtdichtemesskamera, Restabweichungen nach der geometrischen Kalibrierung der Leuchtdichtemesskamera
$\Delta\Omega_j = f_{\Omega}(j)$	Wird aus $f_{\vartheta_C}(j), f_{\varphi_C}(j)$ errechnet, MU-Fortpflanzung

#### 4.2 MU der Positionen und Richtungen

Daten	MU
Kameraposition bei Bilderfassung $(R_D, \vartheta_{Di}, \varphi_{Di})$	hier geht ein: Unsicherheit der Winkelpositionen im Goniophotometerkoordinatensystem, Windschiefe der Achsen; Verwindung

des Gestells

Unsicherheit des Radius der Kamerakugel (Lage der Eintrittspupille)

Blickrichtung der Kamera zum Schnittpunkt der Achsen

hier geht ein:

Blickrichtung der Kamera, welche Bildkoordinate entspricht dem Ursprung des Gerätekoordinatensystems (Windschiefe der Achsen; Verwindung des Gestells)

Verdrehung der Kamera

Bei ähnlichen mechanischen Bewegungseinheiten sind diese Unsicherheitsparameter als „Täumelkugel“ zusammengefasst.

Objektoberfläche (Art und Lage in  $(x_D, y_D, z_D)$ )

MU der Beschreibung der Lage des Messobjektes im Gerätekoordinatensystem

## 5 Kenngrößen für die Charakterisierung von Nahfeldgoniophotometern

Zur Charakterisierung von Nahfeldgoniophotometern werden die Kenngrößen nach Tabelle 1 herangezogen. Für ein ideal messendes Nahfeldgoniophotometer werden die Kenngrößen  $f_x = 0$ .

<b>Symbol</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Ermittlungsart</b>
$f_\Phi$	Abweichung des Lichtstromes	orts- und winkelunabhängig
$f_I$	Abweichungen in der LVK	winkelabhängig
$f_M$	Abweichungen in der spez. Ausstrahlung	ortsabhängig

Tabelle 1: Kenngrößen von Nahfeldgoniophotometern

### 5.1 Abweichung des Lichtstroms

Zur Bewertung der Lichtstrommessung eines Nahfeldgoniophotometers wird das Strahlenfeld einer rückgeführten Normallampe gemessen und entsprechend Gleichung ( 2 ) daraus der Lichtstrom  $\Phi_{mess}$  bestimmt und mit dem Lichtstrom der Normallampe  $\Phi_N$  verglichen. Die Differenz der Lichtströme sowie die erweiterbare Messunsicherheit der Lichtstrommessung sind anzugeben.

Als Normallampen werden kalibrierte Glühlampen eingesetzt. Diese liefern näherungsweise Normlichtart A.

Als Kenngröße der Abweichung der Lichtstrommessung wird  $f_\Phi$  verwendet:

$$f_\Phi = \frac{|\Phi_{mess} - \Phi_N|}{\Phi_N} \quad (4)$$

Weichen die Messobjekte in ihrer spektralen Ausstrahlcharakteristik stark von Normlichtart A ab, z.B. bei Messung von Objekten mit LED oder mit Entladungslampen, kann eine zusätzliche Kalibrierung (und danach gegebenenfalls eine Justierung) mit einer Normallampe auf der Basis einer ähnlichen spektralen Ausstrahlcharakteristik wie die des Messobjektes sinnvoll sein. Alternativ müssen entsprechende Korrekturen verwendet werden.

## 5.2 Abweichung der Lichtstärkeverteilung

Bei der Messung im Nahfeld entsteht eine Lichtstärke erst aus der Zusammenfassung aller Strahlen, die in dieselbe Richtung weisen (Gleichung ( 3 )). Für die Bewertung der Lichtstärkemessung durch ein Nahfeldgoniophotometer sind die Strahlendaten eines rückgeführten „Lichtstärkeverteilungs-Normal“ zu messen und daraus die Lichtstärkeverteilung  $I_{k,l}(\vartheta_k, \varphi_l)$  zu bestimmen. Diese ist mit der Lichtstärkeverteilung des Normals  $I_N(\vartheta_k, \varphi_l)$  zu vergleichen. Die Lichtstärkeverteilung wird in diskreten Schritten

( $k = 0 \dots N-1$ ,  $\Delta\vartheta_k = \vartheta_k - \vartheta_{k-1} = 180/N$  und  $l = 0 \dots M-1$ ,  $\Delta\varphi_l = \varphi_l - \varphi_{l-1} = 360/M$ ) angegeben.

Für jedes rückgeführte Lichtstärkenormal stehen Norm-Lichtstärkeverteilungen in den Auflösungen  $0.5^\circ$ ,  $1^\circ$ ,  $2.5^\circ$  und  $5^\circ$  zur Verfügung. Die Auflösung der gemessenen Lichtstärkeverteilung muss einer Auflösung der Norm-Lichtstärkeverteilung entsprechen.

Die Kalibrierung erfolgt durch Vergleich der durch Vermessung eines rückführbaren Lichtstärkenormals ermittelten Lichtstärkeverteilung  $I_{k,l}(\vartheta_k, \varphi_l)$  mit einer dem Lichtstärkenormal zugeordneten Norm-Lichtstärkeverteilung  $I_N(\vartheta_k, \varphi_l)$  an den jeweils gleichen Winkelpositionen.

Als Normale für Lichtstärkeverteilungen wurden Normale mit charakteristischer Lichtstärkeverteilung (siehe Abb. 4) entwickelt.

Die Abweichungen der gemessenen Lichtstärkeverteilung von der Normlichtstärkeverteilung wird durch die Kenngröße  $f_l$  (die mittlere quadratische Abweichung der Lichtstärken-root mean square error) entsprechend Gleichung ( 5 ) beschrieben (hier als Lichtstromabweichung bezogen auf den Norm-Lichtstrom formuliert):

$$f_l = \sqrt{\frac{1}{\sum_{k,l} \Omega_{k,l}} \sum_{k=0}^N \sum_{l=0}^M (I(\vartheta_k, \varphi_l) - I_N(\vartheta_k, \varphi_l))^2 \cdot \Delta\Omega_{k,l} \cdot \frac{\sum_{k,l} \Omega_{k,l}}{\Phi_N}} \quad (5)$$

Extreme Abweichungen werden durch den Kennwert  $f_{l \max}$  entsprechend Gleichung ( 6 ) beschrieben:

$$f_{l \max} = \max_{k,l} |I(\vartheta_k, \varphi_l) - I_N(\vartheta_k, \varphi_l)| \quad (6)$$

Da sich eine Verdrehung des Lichtstärkenormals im Goniophotometer in einer äquivalenten Verdrehung der Lichtstärkeverteilung manifestiert, ist vor der Messung eine präzise mechanische Justierung der Richtung des Normals vorzunehmen. Dem Lichtstärkenormal ist ein Koordinatensystem  $(x_S, y_S, z_S)$  „mitzugeben“ (z.B. durch einen am Lichtstärkenormal montierten Tripelspiegel oder einen Laser).

Die Ausrichtung der Normale im Goniophotometer erfolgt durch den Nutzer anhand der mechanischen und/oder optischen Positions- und Richtungsreferenzen des Normals.

Alternativ können die LVKs aneinander gefittet werden, d.h. eine LVK wird durch eine Koordinatentransformation so verdreht, dass sie „bestmöglich auf die andere passt“. Hier ist aber zu beachten, dass gegebenenfalls auch Messabweichungen durch die Anpassung ausgeglichen werden und an anderer Stelle neue Messabweichungen entstehen können.

Demgegenüber äußert sich eine Verschiebung des Normals weder in der Form noch in der Lage der Lichtstärkeverteilung.

Der Kalibriervorgang ist deshalb für eine zentrale Position sowie für drei weitere Positionen des Lichtstärkenormals (jeweils um  $0,75 \cdot \text{Radius}$  des möglichen Messfeldes entlang einer Koordinatenachse verschoben (z.B. wie in Abb. 3), durchzuführen. Als Kennwert  $f_i$  wird der maximale Wert der an den vier Positionen bestimmten  $f_{1i}$  genommen.

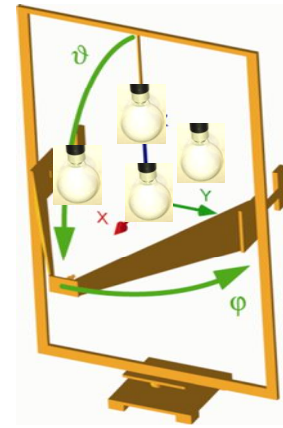


Abb. 3: Messpositionen zur Kalibrierung der Lichtstärkeverteilung

### 5.3 $L^3$ -Normale

Da Nahfeldgoniophotometer Strahlendaten messen und daraus die lichttechnischen Größen Lichtstärkeverteilung und Lichtstrom ermitteln können, sind Normale sinnvoll, die diese lichttechnischen Größen kalibrierfähig zur Verfügung stellen.

Auf der Basis von Leistungs-LED wurden Normale für die Größen Lichtstrom, Lichtstärke, Leuchtdichte –  $L^3$  entwickelt.

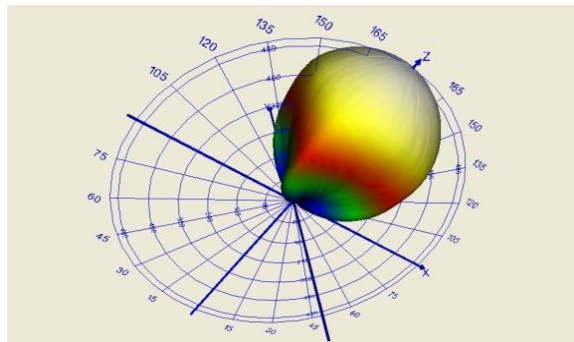


Abb. 4:  $L^3$ -Normal (Lichtstrom, Leuchtdichte, Lichtstärke) mit Lichtstärkegradienten

Die Stabilität der lichttechnischen Größen wird über eine Temperaturregelung mit einem Peltier-Element und eine Intensitätsregelung mit einer spektral angepassten Fotodiode realisiert. In dem geschlossenen Gehäuse mit wechselbarem Abschlussdeckel wird je  $L^3$ -Normal eine vorgealterte und selektierte HighPower-LED verwendet, die bei etwa  $2/3$  ihres Nennstromes betrieben wird. Die Eigenschaften sind im Folgenden aufgeführt:

- Hohe Stabilität der realisierten Werte (bezogen auf Leuchtdichte):
- Umgebungstemperatur  $25 \pm 10^\circ\text{C}$  (Temperaturkoeffizient  $< 0,1\%/K$ )
- Alterung:  $< 1\%/100\text{h}$
- Verschiebung der dominanten Wellenlänge:  $< 1\text{nm}/100\text{h}$
- Kurze Einschaltzeiten:  $< 5\text{min}$  (dann Abweichung vom Endwert  $< 0,1\%$ )
- Sehr gute Homogenität der Leuchtdichte, in vielen Farben lieferbar
- Annähernd lambertförmige Ausstrahlcharakteristik (ohne Kronenaufsatz)
- Exakte Lichtaustrittsfläche: Durchmesser 20mm Passung: H7
- Kompaktes Gehäuse (Durchmesser: 50 mm, Länge: 80 mm)
- Internes Datenlogging (Betriebsstunden, Betriebsparameter,...), USB-Interface

Zum Betrieb des  $L^3$ -Normals wird weitere Unterstützung bereitgestellt:

- ActiveX-Control zum Auslesen der Daten durch Fremdsoftware
- Windowsapplikation zur Konfiguration, Anzeige und Protokollierung der Daten über MS Excel

## 5.4 Abweichung der Geometrie

Zur Kalibrierung der Geometrie wird eine Anordnung aus zwei oder mehr Lichtquellen (z.B. Kugellampen oder Lambertstrahler) mit bekanntem Abstand im Nahfeldgoniophotometer vermessen. Aus den Strahlendaten (Abb. 7) wird die spezifische Ausstrahlung berechnet. Dies kann erfolgen, indem alle Lichtstrahlen auf eine Ebene, in der die Lichtschwerpunkte der beiden Quellen liegen, zurückverfolgt werden. In dieser Ebene muss die Verteilung der Strahlen zwei deutliche Häufungen ergeben (Abb. 6). Von diesen Häufungen wird der Schwerpunkt bestimmt. Der Abstand der beiden Schwerpunkte wird mit dem tatsächlichen Abstand der beiden Quellen verglichen.

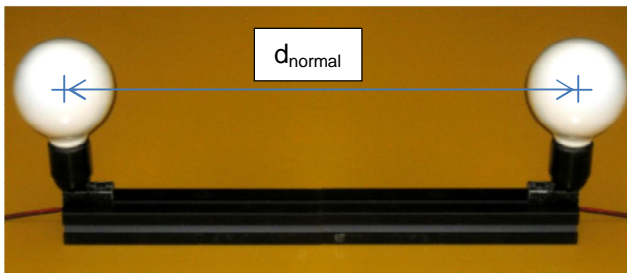


Abb. 5: Anordnung zweier Lichtquellen zur Geometriekalibrierung



Abb. 6: Projektion aller Strahlen auf eine Ebene durch die Lichtschwerpunkte

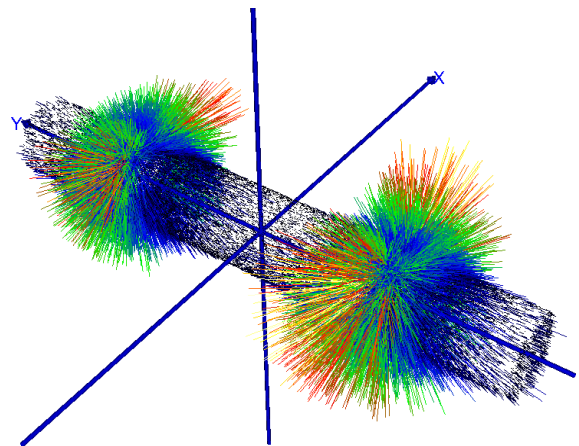


Abb. 7: Strahlenverteilung von zwei Kugellampen mit Abstand  $a$  (auf eine Hüllfläche Zylinder bezogen)

Die Abweichung des aus dem Strahlenfeld ermittelten Abstandes der beiden Lichtquellen von deren tatsächlichem Abstand wird durch die Kenngröße  $f_M$  beschrieben:

$$f_M = \frac{d_M - d_{normal}}{d_{normal}} \quad (7)$$

Zur Charakterisierung von Goniophotometern, die bevorzugt für die Vermessung von LED bzw. LED-Baugruppen eingesetzt werden, wurden Normale entwickelt, die neben Lambertcharakteristik (eine diffus strahlende hinterleuchtete Streuscheibe) Spotcharakteristik (engstrahlende LED mit definierten Abständen) enthalten. Durch getrennte Helligkeitsregelungen können unterschiedliche Lichtstärkeverteilungen realisiert werden. Da die Anordnung der Spot-LED bekannt ist, steht damit auch ein Geometrienormal zur Verfügung.

## 6 Ergebnisse beim Vergleich

Die nachfolgenden Abbildungen demonstrieren exemplarisch die Bewertung eines Nahfeldgoniophotometers durch die Berechnung der Abweichungen einer gemessenen Lichtstärkeverteilung von der Verteilung eines  $L^3$ -Normals. In der oberen Reihe sind die Rohdaten, links die Referenz-Lvk des Normals und in der Mitte die gemessene Lvk, dargestellt (Lichtstärken farbkodiert). Das rechte Bild zeigt das Ergebnis der Koordinatenanbindung der Ist-Lvk durch ein automatisches Fittingverfahren. In der unteren Reihe sind links die Absolutbeträge der Differenzen der Referenz- und der rotierten Ist-Lvk abgebildet. Die Differenzen betragen nach Gleichung ( 5 ) ca. 5% des Gesamtlichtstroms und treten vorwiegend im Bereich der Schattenkanten auf. Negative Differenzen konzentrieren sich auf den abgeschatteten Halbraum und positive Differenzen auf die ‚Lichtseite‘ der Kanten. Da in vielen Fällen eine visuelle Zuordnung lokaler Differenzen zu den korrespondierenden Richtungen der Referenz-Lvk problematisch ist, empfehlen sich für die Visualisierung Dar-

stellungen wie im mittleren und im rechten Bild, bei denen die Differenzen auf die Referenz-Lvk gemappt wurden. Welche Rückschlüsse sich aus den Positionen und Größen der Lvk-Differenzen auf die Eigenschaften und die Parametrierung von Nahfeldgoniometern ziehen lassen, wird im Rahmen eines BMWi – Verbundprojekts in Zusammenarbeit mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Berlin untersucht /8/.

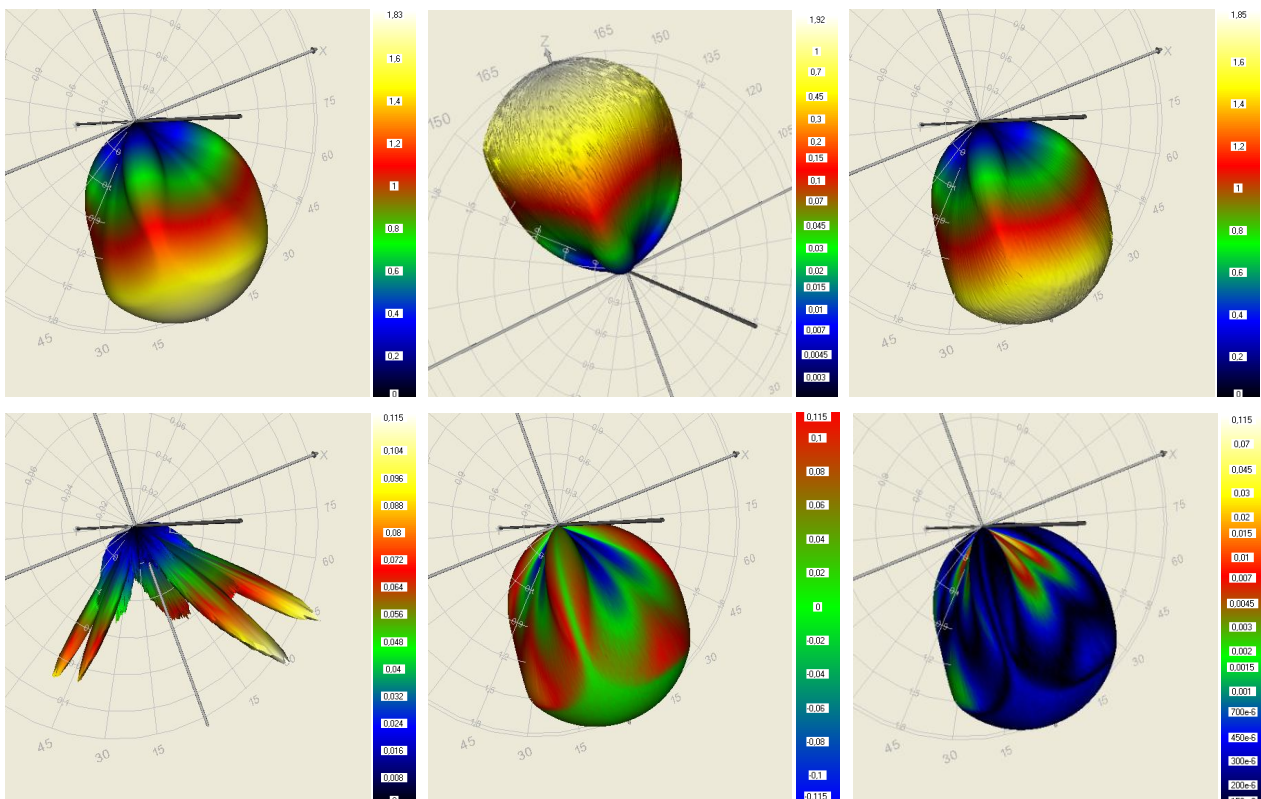


Abb. 8: Reihe oben: links: Referenz-Lvk, Mitte: Ist-Lvk, rechts: Ist-Lvk nach Fitting  
Reihe unten: links: Differenz-Lvk (Absolutwerte), Mitte: Differenzen, gemappt auf Referenz-Lvk (blau: positive Differenzen, rot: negative Differenzen), rechts: Differenzen (Absolutwerte, logarithmische Darstellung)

## 7 Literatur

- /1/ Adelson, E. H.; Bergen, J. R.: The plenoptic function and the elements of early vision. In: Computational Models of Visual Processing, Landy, M.; Movshon, J. A., MIT Press, MA (1991), 3–20.
- /2/ Bredemeier, K.; Poschmann, R.; Schmidt, F.: Nahfeldgoniophotometer – Systeme zur Messung der Lichtverteilungen an Leuchten, Lampen und LED. Licht 2006, 11.09.2006, Bern.
- /3/ Bredemeier, K.; Poschmann, R.; Schmidt, F.: Development of luminous objects with measured ray data. Laser+Photonik, May 2007.
- /4/ Hentschel, H.-J.: Licht und Beleuchtung: Grundlagen und Anwendung- 5. Aufl. - Heidelberg : Hüthig, 2002. Kap. 4.4.2 Messung der Lichtstärke.
- /5/ Levoy; M.; Hanrahan, P.: Light Field Rendering. Proc. ACM Siggraph, ACM Press, 1996, pp. 31-42.
- /6/ Moon, P.; Spencer, D.E.: The Photic Field, MIT Press, 1981.
- /7/ Poschmann, R.; Riemann, M.; Schmidt, F.: Verfahren und Anordnung zur Messung der Lichtstärkeverteilung von Leuchten und Lampen; Patent DE 41 10 574 v. 30.03.1991.
- /8/ <http://www.ptb.de/cms/en/fachabteilungen/abt8/fb-84/ag-842/goniophotometer-840.html>. Webseite zum BMWi - Verbundprojekt , Kamerabasiertes Nahfeld-Goniophotometer'.
- /9/ Zhang, Cha: On sampling of image-based rendering data. Dept. of Electrical and Computer Engineering, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA 15213, 2004.