Raytracing Modellierung – Validierung von Simulationsergebnissen zur ortsaufgelösten Kugelantwort einer 0,25 m-Ulbricht-Kugel für LED-Lichtstrommessungen

Maissam El Wardani, Werner Jordan, Mathias Noak, Ulrich Binder, Klaus Ludwig OSRAM GmbH, Berliner Allee 65, 86153 Augsburg

Christoph Schierz TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik, Prof.-Schmidt-Str. 26, 98693 Ilmenau

Zusammenfassung

Die Messung eines LED-Lichtstroms mittels Ulbrichtkugel erfordert erhebliche metrologische Korrekturen. Die dazu auch hauptsächlich notwendige "Spatial Response Distribution Function" (SRDF) kann derzeit aber nur für Kugelradien größer 1 m experimentell bestimmt werden. Für Messungen von LEDs in den hierfür üblichen 0,25m-Ulbrichtkugeln steht diese Möglichkeit des räumlichen aufgelösten Kugelscans noch nicht zur Verfügung. Deshalb wurde die SRDF Charakterisierung einer 0,25m-Ulbrichtkugeln mit Raytracing-Verfahren simuliert. Die Validierung dieses Verfahrens erfolgt durch die entsprechende Simulation einer 3m-Ulbrichtkugel zur Erzeugung der SRDF und dem Vergleich der Simulationsergebnisse mit der hier auch experimentell durch einen räumlichen Kugelscan bestimmten Kugelantwort.

1 Einleitung

Eine absolut skalierte Bestimmung des Lichtstroms einer Lichtquelle nur mit dem Messsystem "Ulbrichtkugel" erfordert unter anderem auch den Korrekturfaktor, der die ortsaufgelöste Antwort des Messsystems berücksichtigt. Da die Ulbrichtkugel nie optimal sein wird, sondern hat eine "gewisse" Unvollkommenheit auch bezüglich ihrer räumlichen Integrationsfähigkeit hat. Die Messunsicherheit der Lichtstrommessung ist durch den Störkörpereinfluss (z.B. Beule in der Kugel, Verschmutzungen, etc.) und den Einfluss der unterschiedlichen Lichtverteilungen bedingt. Diese Korrektur der unvollkommenen räumlichen Integrationsfähigkeit beruht auf Kenntnis der Kugelantwort und der Lichtstärkeverteilung der in die Kugel eingebrachten Lichtquellen.

Diese, für Absolutbestimmungen notwendige Korrekturfunktion SRDF ("spatial response distribution function") kann für Kugelradien größer einem Meter derzeit durch die Verwendung eines Kugelscanners bereit gestellt werden (Abb. 1). Dies ist eine Lichtquelle, die motorisiert in alle Richtungen (θ , φ) gedreht werden kann. Dabei wird die Kugeloberfläche mit einem Lichtfleck dieser Lichtquelle abgetastet, um die zugeordnete indirekte Beleuchtungsstärke mit dem Empfängersystem der Ulbrichtkugel zu bestimmen. Basierend auf diesen Kenntnissen könnten Lichtstromkorrekturen in Bezug auf die unterschiedliche Lichtstärkeverteilung angewendet werden.



Abb. 1: Kugelscan: Bestimmung der ortsaufgelösten Antwort der Innenflächen der Ulbrichtkugel

Für die Messungen des Lichtstroms von LED-Lichtquellen wird jedoch häufig eine Ulbrichtkugel mit einem typischen Durchmesser von 0,25 m verwendet (Abb. 2). Für diese Kugelgröße können bislang jedoch keine SRDF-Korrekturverfahren angewendet werden, da keine Kugel-Scansysteme mit solchen mechanisch miniaturisierten Dimensionen zur Verfügung stehen.



Abb. 2: LED-Ulbrichtkugel mit 0,25 m Durchmesser

Die SRDF Korrekturfunktion dieser typischen LED-Ulbrichtkugel wurde deshalb mit Hilfe von Simulationen durch ein Raytracing-Verfahren (Softwarepaket "LightTools") ermittelt. Sie wird in Abb. 3 als 3D-Modell dargestellt.



Abb. 3: 3D-Darstellung der simulierten Kugelantwort einer 0,25 m Ulbrichtkugel von der Seite (links) und von oben (rechts)

2 Methodik und Validierung

Die Validierung des Simulationsverfahrens für die 0,25m-LED-Ulbrichtkugel erfolgt zunächst indirekt durch eine analog ablaufende Raytracing-Simulation einer 3m-Ulbrichtkugel zur Erzeugung der SRDF (Abb. 4). Dieses Simulationsergebnis kann dann mit der bereits von einem experimentellen Kugelscan bekannten SRDF verglichen werden.



Abb. 4: 3m-Ulbrichtkugel (oben) und das in SolidWorks erstellte 3D-Modell (unten links) sowie Darstellung einer Simulation mit einem Strahl und seinen mehrfachen Reflexionen (unten rechts)

In Abb. 5 ist das Ergebnis einer dieser Simulationen für eine 3m-Ulbrichtkugel im Vergleich mit ihrer experimentell bestimmten Kugelantwort dargestellt. Die durch Simulation bestimmte SRDF-Kugelantwort stimmt mit der experimentell bestimmten annähernd überein. Auf der linken Seite des Simulationsbildes erkennt man auch den Einfluss des Schatters, oben und unten die Veränderung der Kugelantwort durch die Halterungen und auf der rechten Seite auch eine etwas stärkere Abweichung von der idealen Kugelantwort.



Abb. 5: Polardiagramme der mit Kugelscanner gemessenen (links) und der simulierten (rechts) Kugelantwort der 3m-Ulbrichtkugel

Die Begründung wieso die Ergebnisse auf kleine Kugeln übertragen werden können, wird im Nachfolgenden erklärt.

3 Ergebnisse und Diskussionen

3.1 Theoretische Berechnung des Korrekturfaktors SRF

Der Korrekturfaktor *SRF* (f_s) ("sphere response factor") ist der Umkehrwert des c_{ks} ("correctionfactor" durch Kugelscan), der wie folgt definiert ist [1]:

$$\boldsymbol{c_{ks}} = \frac{\int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} I(\theta,\varphi) \cdot K_{ideal}(\theta,\varphi) \sin\theta d\theta d\varphi}{\int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} I(\theta,\varphi) \cdot K_{real}(\theta,\varphi) \sin\theta d\theta d\varphi} \cdot \frac{\int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} I_{isotrop}(\theta,\varphi) \cdot K_{real}(\theta,\varphi) \sin\theta d\theta d\varphi}{\int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} I_{isotrop}(\theta,\varphi) \cdot K_{ideal}(\theta,\varphi) \sin\theta d\theta d\varphi}$$
(GI. a)

mit:

 $I(\theta, \varphi)$ relative Lichtverteilung der Lichtquelle

 $I_{isotrop}(\theta, \varphi)$ isotrop strahlende Punktlichtquelle ($I_{isotrop}(\theta, \varphi) = const = 1$)

 $K_{real}(\theta, \varphi)$ relative Antwort der Kugelempfindlichkeit

 $K_{ideal}(\theta, \varphi)$ relative Antwort der idealen Kugelempfindlichkeit ($K_{ideal}(\theta, \varphi) = const = 1$)

Die räumliche Kugelantwort wird mit einer realen, relativen Lichtstärkeverteilung und einer isotrop-strahlenden Punktlichtquelle verknüpft. Die Auswertung dieser geometrischen Flussintegrale und deren Verhältnisse ergeben dann für eine Lampe (relative Lichtstärkeverteilung) einen für die betrachtete Kugel zu verwendenden Korrekturfaktor $c_{ks \ Lichtquelle}$.

Durch Einsetzten der angegebenen Bedingungen kann die Gleichung (Gl. a) weiter vereinfacht werden:

$$\boldsymbol{c_{ks}} = \frac{\Phi_{Lichtquelle}}{\int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} I(\theta,\varphi) \cdot K_{real}(\theta,\varphi) \sin\theta d\theta d\varphi} \cdot \frac{\Phi_{Kugelantwort}}{4\pi}$$
(Gl. b)

mit:

$\Phi_{\it Lichtquelle}$	relativer Lichtstrom der Lichtquelle in der Kugel
$\Phi_{Kugelantwort}$	relativer geometrischer "Lichtstrom" der Ulbrichtkugel
	mit idealem Kugelstrahler
"4π"	relativer Lichtstrom des idealen Kugelstrahlers

Gleichung (Gl. b) zeigt, dass für die Bestimmung des Lichtstrom-Korrekturfaktors c_{ks} für eine bestimmte Lichtquelle und eine bestimmte Ulbrichtkugel, die Kenntnis der relativen Lichtstärkeverteilung $I(\theta, \varphi)$ und die der relativen Kugelantwort $K(\theta, \varphi)$ notwendig ist.

3.2 Ergebnisse der Berechnung des SRF für die 3m-Ulbrichtkugel

Die Auswertung des Korrekturfaktors SRF für die 3m-Ulbrichtkugel mit verschiedenen Lichtquellen (Kugelantwort ermittelt mit dem Kugelscanner sowie der simulierten Kugelantwort) nach Gleichungen (Gl. a) und (Gl. b), sind zusammengefasst in Tab. 1 dargestellt.

Die Äquivalenzfeststellung, die der Beurteilung der Vergleichbarkeit dieser zweier Korrekturfaktoren (SRF für die Kugelantwort des realen Kugelscanners sowie der simulierten Kugelantwort) dient, betrachtet sowohl die Differenz der beiden Korrekturfaktoren als auch die Messunsicherheiten dieser beiden Korrekturfaktoren. Dies ist ein aussagekräftiger Vergleich der beiden Korrekturfaktoren, sie erfolgt durch das E_N-Kriterium und wird mit folgender Gleichung berechnet [2]:

$$E_N = \left| \frac{SRF_{simu} - SRF_{scanner}}{\sqrt{U^2(SRF_{simu}) + U^2(SRF_{scanner})}} \right|$$
(Gl. c)

Die Messunsicherheiten $U_{scanner}$ und U_{simu} -Werte sind nach Monte-Carlo-Methode ermittelt.

Tab. 1: Berechnete Ergebnisse der SRF mit Messunsicherheiten U und Kriterium E_N für die Kugelantwort des realen Kugelscanners sowie der simulierten Kugelantwort

Lichtverteilungen	SRF (1/c _{ks}) (Kugelantwort des Kugelscanners)	Uscanner	SRF (1/ <i>c_{ks})</i> (simulierte Kugelantwort)	<i>U</i> simu	E _N
Wi5_4407PTB02	0,9989	0,0016	0,9998	0,0018	0,3737
Wi40	0,9993	0,0022	0,9985	0,0020	0,2690
FEL_4516PTB05	1,0012	0,0022	0,9997	0,0220	0,0678
HLX_64341_hängend	0,9960	0,0020	0,9964	0,0020	0,1414
OSLON SSL	1,0065	0,0068	1,0107	0,0052	0,4906
LCWCQDP					
OSLON SX	1,0105	0,0066	1,0042	0,0076	0,6258
LUWCN5M					
Duris P8	1,0072	0,0060	1,0084	0,0062	0,1390
Duris S8	1,0081	0,0058	1,0096	0,006	0,1797
Soleriq S19	1,0077	0,0060	1,0092	0,006	0,1767

Die Ergebnisse der Berechnung des SRF aus der c_{ks} -Berechnung mit der simulierten und der tatsächlichen Kugelantwort zeigen eine gute Übereistimmung. Da alle $E_N < 1$ ist, kann somit Äquivalenz festgestellt werden.

3.3 Ergebnisse der Berechnung der SRF für die LED- Kugel

In diesem Abschnitt sind die Ergebnisse der unkorrigierten Lichtströme sowie die mit c_{ks} korrigierten Lichtströme für zwei LED Typen OSLON SSL (LCWCQDP) und OSLON SX (LUWCN5M) dargestellt.

Der korrigierte Lichtstrom wird nach folgender Gleichung gerechnet:

 $\Phi_{korrigiert} = \Phi_{LED\ mess-unkorrigiert} \cdot C_{SRF} \cdot C_{HLL}$

(Gl. d)

Mit
$$C_{SRF} = \frac{c_{ks \ Kal}}{c_{ks \ LED}}$$
Korrekturfaktor für die räumliche Kugelantwort $c_{ks \ Kal} = \frac{\Phi_{Kalib \ absolut}}{\Phi_{Kalib \ gemessen}}$ Korrekturfaktor aus absolutem Lichtstrom zur in der Anlage gemessen C_{HLL} Korrekturfaktor für die Selbstabsorption (Hilfslichtlampen-Verfahren)

Tab. 2: Korrigierte Lichtströme für zwei LED-Typen

LED	Φ absolut	Φ LED unkorrigiert	C ks Kal	Cks LED	CHLL	$\Phi_{\it LED\ korrigiert}$	Φ $_{absolut}$ / Φ $_{LED}$ korrigiert
	in Im	in Im				in Im	in %
LCWCQDP (1)	152,86	158,9	0,9972	0,9842	0,9866	153,87	99,3%
LCWCQDP (2)	157,18	164,1		0,9833		158,76	99,0%
LCWCQDP (3)	151,95	161,1		0,9850		156,12	97,3%
LUWCN5M (1)	50,22	52,48		0,9881	0,9860	50,98	98,5%
LUWCN5M (2)	50,62	52,65		0,9881		51,15	99,0%
LUWCN5M (3)	48,53	50,56		0,9874		49,09	98,9%

Die korrigierten in der kleinen LED-Kugel ermittelten Lichtströme stimmen mit den absoluten Lichtströmen, die mit dem Hemisphärengoniometer bestimmt wurden, im Rahmen der Messunsicherheit von ca. 3% überein.

4 Fazit und zukünftige Untersuchungen

Der Simulationsansatz zur Bestimmung des SRF für die 0,25m-LED-Ulbrichtkugel ist durch die Ergebnisse und den Vergleich mit der 3m-Ulbrichtkugel als validiert anzunehmen. Damit können nun für beliebige LED-Lichtverteilungen die notwendigen Korrekturfaktoren auch für die 0,25m-LED-Ulbrichtkugel bestimmt werden.

Die noch vorhandenen systematischen Abweichungen aus diesem Verfahren (von ungefähr \pm 1,5%) sollen durch ein weiteres, abgestimmtes Kalibrierverfahren für die LED-Kugel minimiert werden (relativer spektraler Verlauf durch einen Halogenglühlampe; Absolutwert durch eine weiße Kalibrier-LED).

5 Literaturverzeichnis

- [1] Y. Ohno, R. O. Daubach: "Integrating Sphere Simulation on Spatial Nonuniformity Errors in Luminous Flux Measurement", Preprint: J. IES, 30-1, 105-115 (2001)
- [2] W. Wöger: "Remarks on the En-Criterion Used in Measurement Comparisions", PTB-Mitteilungen, Heft 1/99