Rückgeführte Licht- und Strahlungsmesstechnik für gepulst betriebene LED-Systeme: Charakterisierung der 0,25m-Ulbrichtkugel für die LED-Lichtstrommessungen

M. EL Wardani[1)2)], Ch. Schierz[1)], W. Jordan[2)], U. Binder[2)], M. Noak[2)],W. Steudtner[2)]

1) TU Ilmenau Fachgebiet Lichttechnik

2) OSRAM GmbH, CI ANM CLM, Berliner Allee 65, 86154 Augsburg

1 Zusammenfassung

Traditionelle Messungen des Lichtstromes mit Hilfe einer integrierenden Kugel mit Durchmessern ab einem Meter verwenden eine Korrekturfunktion, um die Werte des Lichtstromes anzupassen. Diese SRDF - Funktion (spatial response distribution function) beschreibt die räumliche Verteilung der Kugelantwort. Diese Korrekturfunktion wird durch die Verwendung eines Kugelscanners bestimmt.
Für die Messungen von LED- Lichtquellen wird jedoch oft eine Ulbrichtkugel mit einem typischen Durchmesser von 0,25 m verwendet. Für diese Kugelgröße konnte bislang kein solches Korrekturverfahren angewendet werden, da für diese Kugeln keine Scansysteme mit solch miniaturisierten Dimensionen zur Verfügung stehen. Bei LED-Messungen mit diesen typischen LED-Messkugeln werden, abhängig von deren Lichtverteilung, systematische Abweichungen im festgestellten Lichtstromwert von bis zu 15% beobachtet.

Um diese fehlende Information über das verwendete Messsystem zu beschaffen, werden Simulationen (Raytracing-Verfahren) angewendet und getestet, um die charakterisierende SRDF-Funktion für die kleinen LED-Ulbrichtkugeln zu erzeugen, die für die Lichtstromkorrektur benötigt wird.

In diesem Beitrag werden Schwierigkeiten bei der Simulationsanordnung vorgestellt. Die Ergebnisse dieser Simulationsversuche werden in Bezug auf die erforderten Korrekturen der Kugelantwort SRDF diskutiert und bewertet.

2 Einleitung

Die Bestimmung eines Lichtstromes von Lichtquellen wird mit Hilfe einer Ulbrichtkugel vorgenommen. Diese Kugel ist eine Hohlkugel, deren innere Fläche mit einem diffus reflektierenden Material beschichtet ist. Die Kugel bewirkt die räumliche Integration und Mischung der Lampenstrahlung, die zur Messung an einen Detektorport ausgekoppelt wird [1].
Abbildung 1 skizziert den Standardaufbau der „realen“ Ulbrichtkugel. Dieser Messaufbau wird für alle Lampentypen bei der Messung/Bestimmung des Lichtstromes verwendet, wobei der Durchmesser einen Meter oder mehr beträgt. Bei solchen „größeren“ Kugeln ist der Lampen-Prüfling im Zentrum der Kugel befestigt. Der Lichtstrom wird somit in der 4 π – (Einstrahl-)Geometrie gemessen, dabei wird – im Idealfall - die in alle Richtungen emittierende Strahlung erfasst.

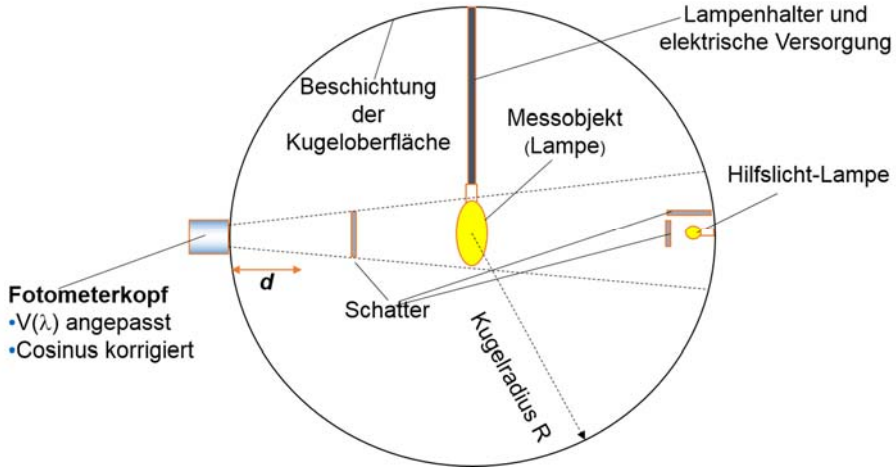


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau der „realen“ Ulbrichtkugel

In der Praxis hat sich zur Bestimmung des Lichtstromes von Einzel-LED, Hochleistungs-LED oder kleineren LED-Modulen, die typische „LED-Ulbrichtkugel“ mit einem Durchmesser von 0.25 m mit 2 π –Einstrahlgeometrie (siehe Abbildung 2) etabliert. Hier wird die LED (mit 2 π - Abstrahlcharakteristik) seitlich in die Kugelwandung eingesetzt, so dass entsprechend der Abstrahlcharakteristik nur die in den vorderen Halbraum emittierende Strahlung erfasst wird, um den Lichtstrom des LED-Objekts zu bestimmen.

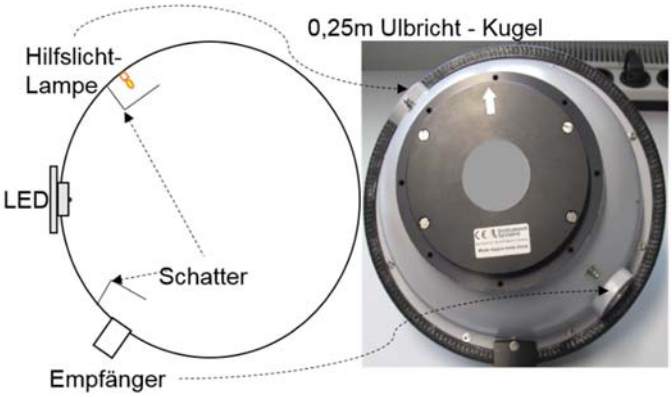


Abbildung 2: Ulbrichtkugel mit 0,25 m Durchmesser in 2 π -Einstrahlgeometrie

Eine reale Ulbrichtkugel kann nie das Verhalten einer theoretischen, idealen mathematischen Ulbrichtkugel zeigen, sondern hat, durch die mechanische Konstruktion und Ausführung, eine „reale“ Unvollkommenheit, auch bezüglich ihrer räumlichen Integrationsfähigkeit. Besonders für diese „kleine“ Ulbrichtkugel ist die Messunsicherheit der Lichtstrommessung, bedingt durch den Störkörpereinfluss und den Einfluss der unterschiedlichen Lichtverteilungen, im Vergleich zur Lichtstrommessung mit der „traditionellen“ Ulbrichtkugel, erhöht., wobei die individuelle Korrekturfunktion (SRDF) dazu verwendet werden kann, um den Lichtstrom systematisch zu korrigieren. Diese individuelle Kugelkorrektur der unvollkommenen räumlichen Integrationsfähigkeit beruht auf Kenntnis der individuellen Kugelantwort und der typischen Lichtstärkeverteilung der in die Kugel eingebrachten Lampen.

Die SRDF - Funktion stellt die räumliche Verteilung der Kugelantwort dar. Diese Korrekturfunktion wird durch die Verwendung eines Kugelscanners (siehe Abbildung 3) bestimmt. Der Kugelscanner besteht im Wesentlichen aus einer Lichtquelle mit eng gebündelter Abstrahlung, die motorisiert in alle Richtungen (θ, φ) gedreht werden kann. Dabei wird die Kugeloberfläche mit einem „Beleuchtungsfleck“ / Lichtfleck abgetastet, um so die jeweils zugeordnete, indirekte Beleuchtungsstärke mit dem Empfängersystem der Ulbrichtkugel zu registrieren. Basierend auf dieser Winkel-abhängigen Kugelantwort ($E_{ind}(\theta, \varphi)$ können Lichtstromkorrekturen in Bezug auf die unterschiedliche Lichtstärkeverteilung berechnet und angewendet werden.

Dieser Kugelkorrekturfaktor kann derzeit für die LED-Kugel nicht nach dem analogen Messverfahren bestimmt werden, da kein entsprechendes Scannersystem in diesen miniaturisierten Dimensionen vorhanden ist. Um dennoch diesen Korrekturfaktor ermitteln zu können, ist die Idee entstanden eine Raytracing-Verfahrens-Simulationen anzuwenden. Diese wird im nächsten Kapitel erklärt und verdeutlicht.

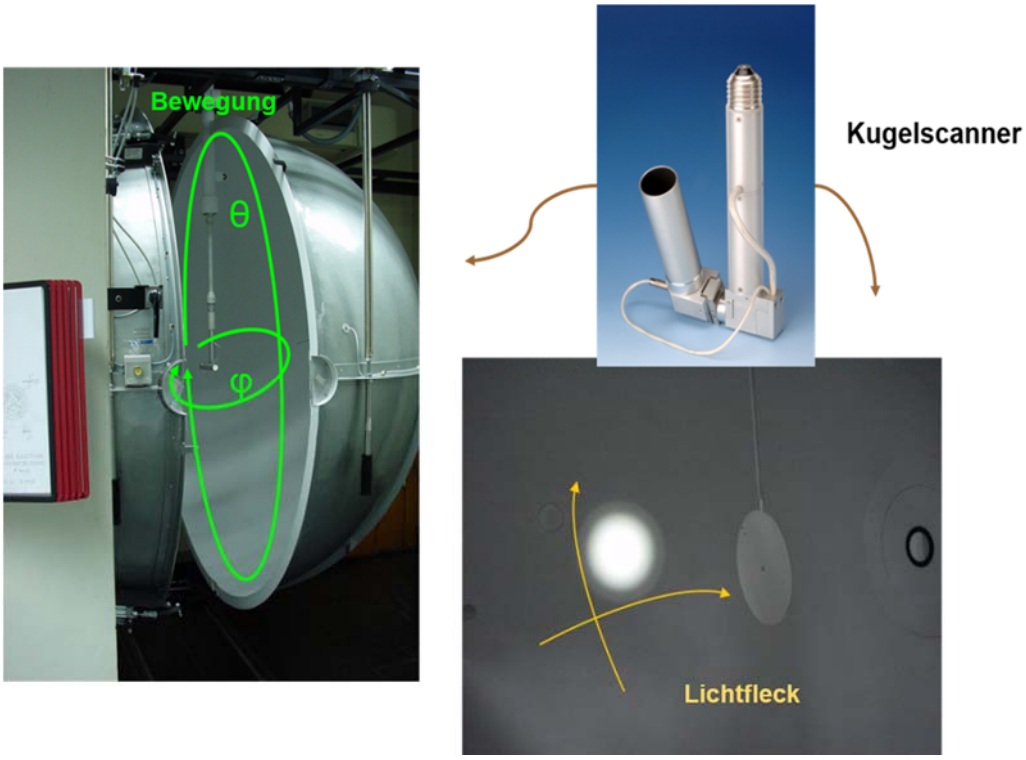


Abbildung 3: Bestimmung der Kugelantwort in Abhängigkeit von Winkel θ und φ mit Hilfe eines Kugelscanners

3 Versuchsaufbau und Methodik

Um die Bestimmung der Kugelantwort zu realisieren, war es als ersten Schritt notwendig, ein realistisches CAD-Modell der für Messungen verwendeten Ulbrichtkugel in der SolidWorks Software-Umgebung zu erstellen. Abbildung 4 zeigt das CAD-Modell der LED-Ulbrichtkugel mit allen Schattern und Öffnungen für die Empfänger, sowie eine Einstrahlöffnung für die zu testende Lampe.

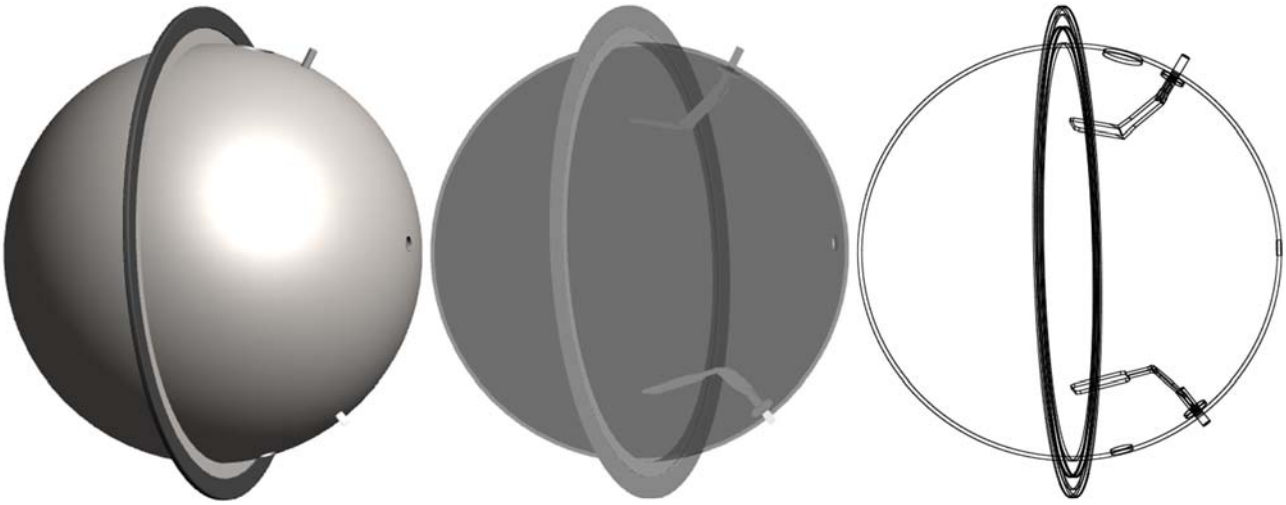


Abbildung 4: Erstelltes 3D Modell der LED-Kugel in SolidWorks

Dieses CAD-Modell wurde in die Raytracing-Simulationssoftware LightTools importiert, um eine simulierte Kugelantwort, basierend auf der Kugelgeometrie (Größe, Portöffnungen, vorhandenen Schattern und mit den Reflexionseigenschaften der Innenwandbeschichtung) zu erhalten. Das durch den simulierten Lichtfleck erzeugte Detektorsignal wird in Abhängigkeit der unterschiedlichen Lichtstärkeverteilungen auf den Lichtstrom normalisiert, um den gesuchten, notwendigen Korrekturfaktor zu erhalten.

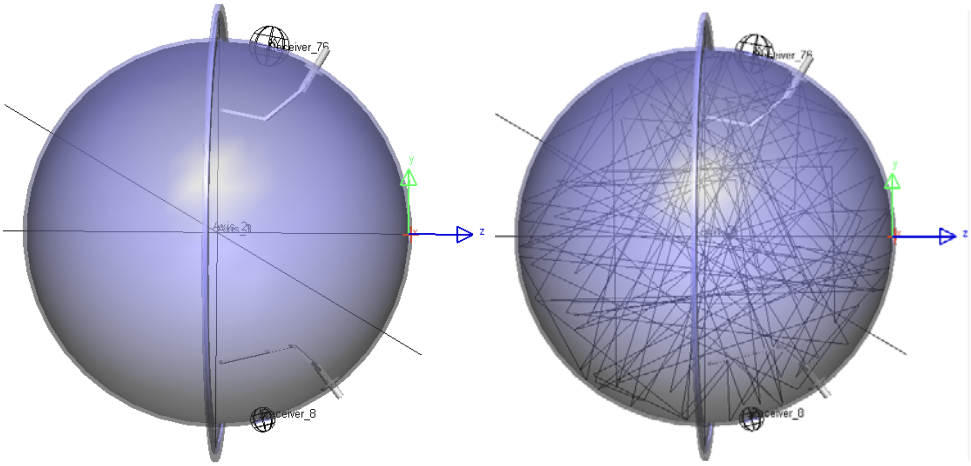


Abbildung 5: Importiertes CAD-Modell, zwei Empfänger und eine Lichtquelle (Links), Darstellung einer Simulation mit einem Strahl und seinen mehrfachen Reflektionen (Rechts)

Dazu wurde ein Makro Code in VBA (Visual Basic of Applications) erstellt. Dieses Makro wird in Modulen in Excel abgelegt und durchgeführt. Der Simulationsablauf ist dem Flussdiagramm unten zu entnehmen. Als erstes wird in dieser Routine das Makro in Excel gestartet, dann wird das vorher erstellte LightTools-Programm mit den entsprechenden Kugelparametern geöffnet. Nun wird ein einer Schleife die Richtung des Spots / Beleuchtungsflecks (Winkel θ und φ) eingestellt/geändert und jeweils dazu die Raytracing-Simulation in LightTools durchgeführt. Die pro Winkel θ und φ indirekt erzeugte Beleuchtungsstärke wird vom Empfänger abgefragt und anschließend in einer Tabelle als Funktion von (θ und φ) abgespeichert.

Abbildung 6: Flussdiagramm der Simulationsroutine

4 Ergebnisse und Diskussionen

4.1 Ergebnisse der Simulation

Die Abbildung 7 zeigt die dreidimensionale Darstellung der Kugelantwort SRDF K(θ, φ) der 0,25 m LED-Ulbrichtkugel.

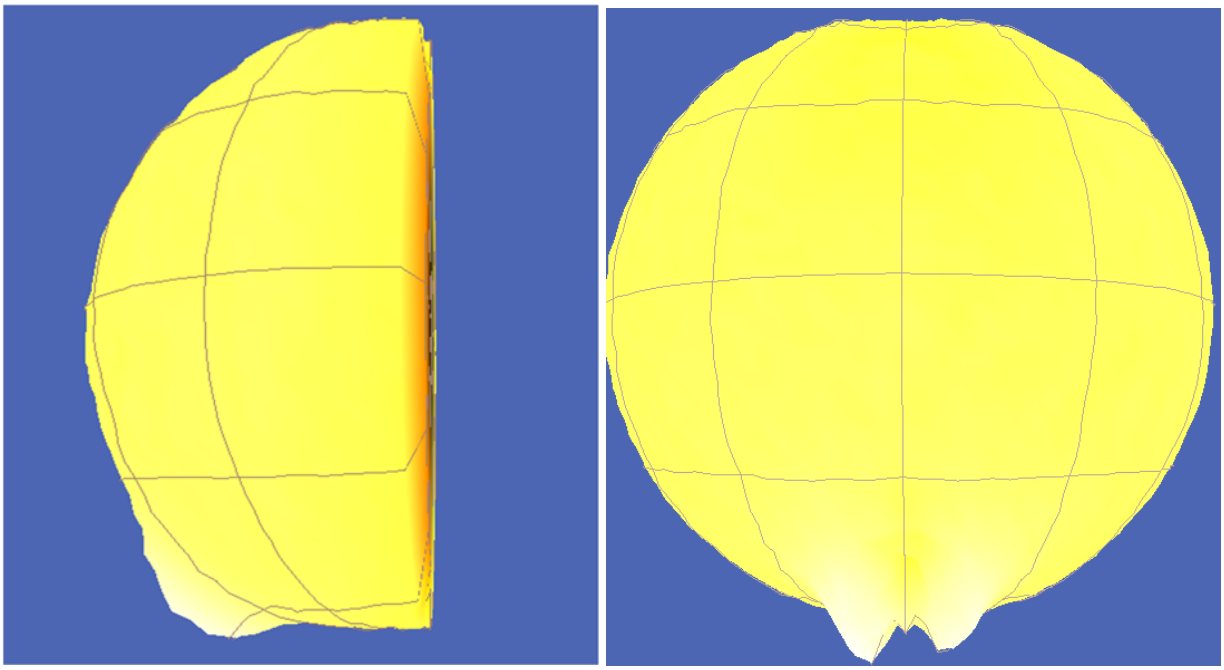


Abbildung 7: 3D Darstellung der Kugelantwort der 0,25 m Kugel

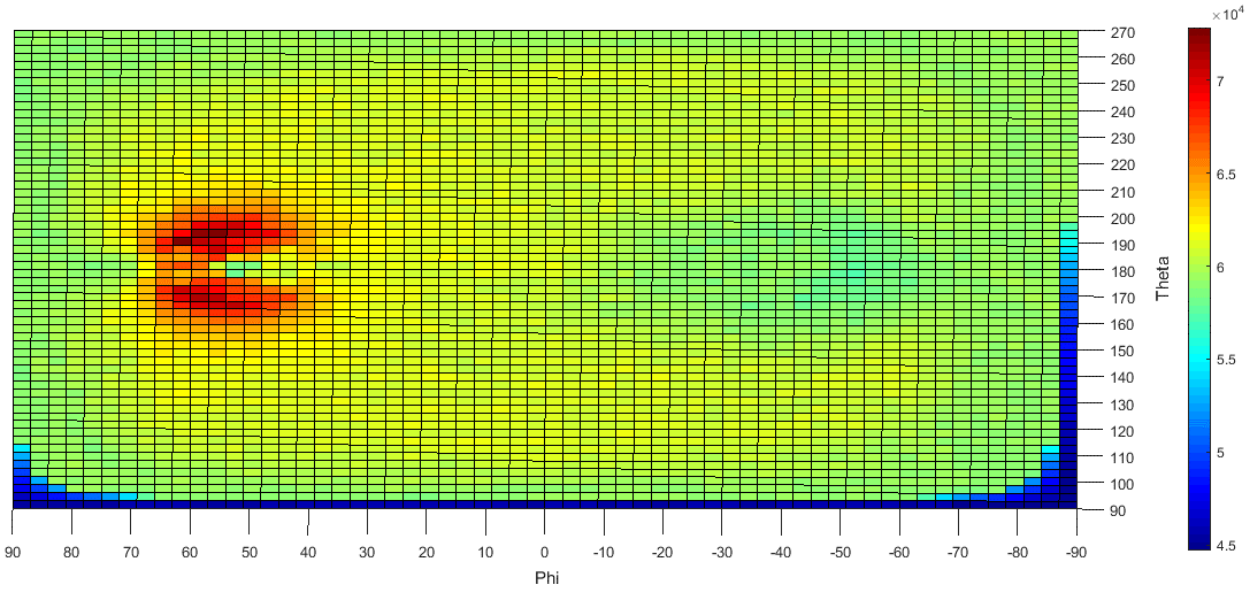


Abbildung 8: Das relative Empfängersignal für den Kugelort (θ, φ) des Lichtflecks

Die Abbildung 8 zeigt das relative Empfängersignal für die Kugelorte(θ, φ). Die Kugelantwort stellt sich als Halbkugel mit zwei Erhöhungen und einer Vertiefung dar. Die zwei Erhöhungen werden verursacht durch „Lichtstrahlen“ die direkt am Schatterrand vorbeigehen und bereits nach zwei oder drei Reflexionen auf den Empfänger treffen (Winkelbereich *φ*: 40° - 60° und *θ*: 160° - 210°).

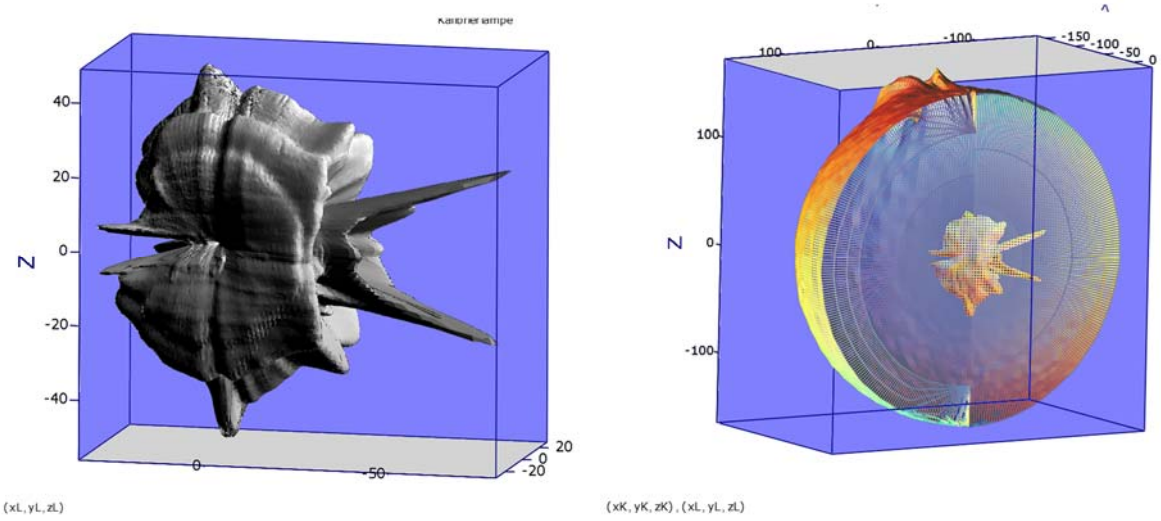


Abbildung 9: Situation bei der Kalibrierung (Normal HLX64251)

Die Abbildung 9 stellt die Lichtverteilung der HLX Normallampe dar (links), sowie die Orientierung der HLX Normallampe bezüglich der Kugelantwort bei der Kalibrierung (rechts).

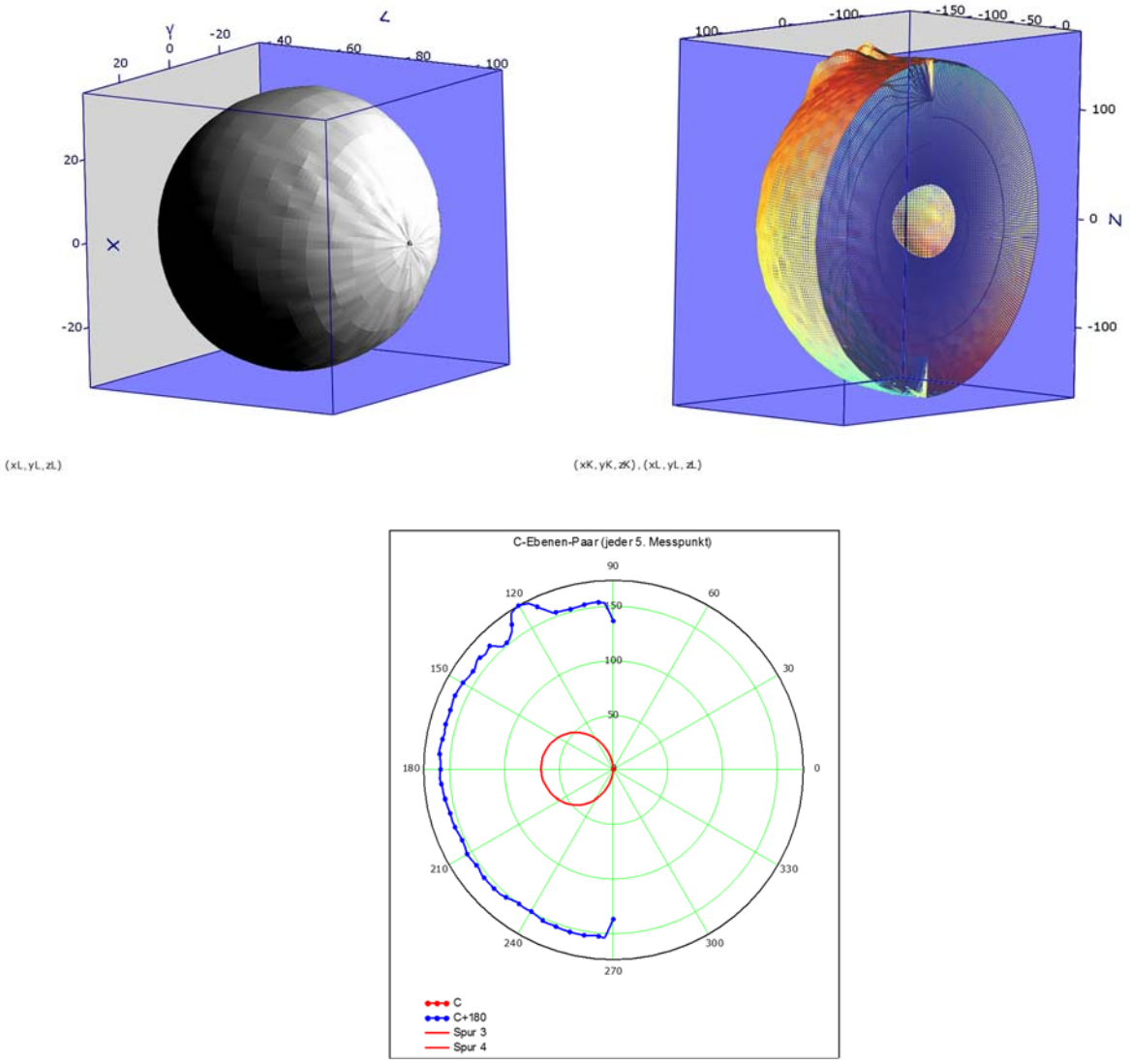


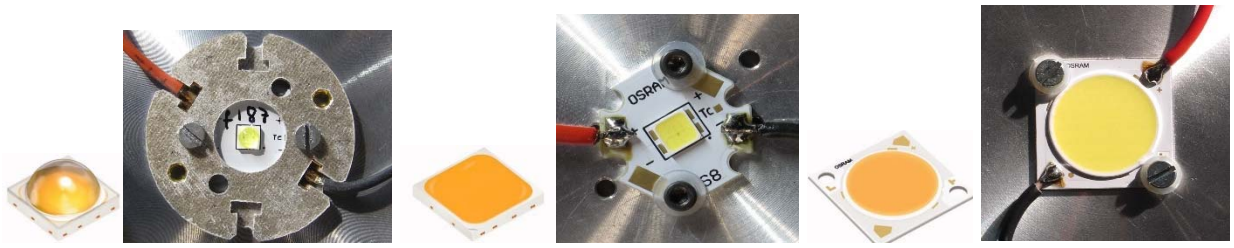
Abbildung 10: Situation einer LED bei der Messung in verschieden Darstellungen sowie im Polardiagram

Die Abbildung 10 zeigt die Lichtverteilung einer LED (Links) und wie diese bezüglich der Kugelantwort bei der Messung orientiert ist. Die Lichtverteilung der LED ist relativ homogen (Lambertstrahler) im Vergleich zu der Lichtverteilung des Kalibriernormals.

4.2 Ergebnisse der Messungen

Für diese Messungen wurden drei weiße LED-Typen verwendet: Die LED-Typen Duris P8, Duris S8 und Soleriq S19 (Abbildung 11). wurden vergleichend bezüglich Ihrer lichttechnischen Grössen untersucht. Diese LEDs wurden in der 3m-Ulbrichtkugel, sowie in der 0,25m Ulbrichtkugel mit zwei verschieden Stromversorgungsarten, zum einen mit Gleichstrom

(DC= Direct Current), und zum zweiten „gepulst“ mit einem duty cycle von 20% charakterisiert. Als Referenzanlage dient für diesen Vergleich die 3m-Ulbirchtkugel.



Duris P8 Duris S8 Soleriq S19

Abbildung 11: Untersuchte LEDs: Duris P8, Duris S8 und Soleriq S19

Die Tabelle 1 zeigt die lichttechnischen Ergebnisse für die untersuchten LEDs. Der Unterschied im Lichtstromwert zwischen der 3m-Ulbrichtkugel und der 0,25 m-Ulbrichtkugel liegt zwischen null und sieben Prozent. Bei der Peakwellenlänge, der dominanten Wellenlänge, sowie bei der Farbtemperatur und bei dem Farbort sind nur geringe Abweichungen festzustellen.

Tabelle 1: Messvergleich der 3 LED zwischen 3m-Ulbrichtkugel und 0,25m-Ulbrichtkugel (DC Betrieb und „gepulst“)

		Phi in Lumen	CCT in K	x	y	Peak-Wellenlänge nm	Dominante Wellenlänge nm	Unterschied Lichtstrom
Duris P8	3m Photometrie Kugel	492	9669	0,2861	0,2836	444,1	476,0	
	LED Kugel DC	459	9783	0,2857	0,2821	443,9	475,5	107%
	LED Kugel gepulst	490	9741	0,2860	0,2824	441,3	475,5	100%
Duris S8	3m Photometrie Kugel	410	6773	0,3094	0,3203	447,1	484,4	
	LED Kugel DC	394	6646	0,3119	0,3219	446,9	484,7	104%
	LED Kugel gepulst	389	6598	0,3118	0,32342	446,1	485,6	105%
Soleriq S19	3m Photometrie Kugel	3257	6664	0,3108	0,3227	445,1	485,44	
	LED Kugel DC	3168	6548	0,3126	0,3248	445,2	486,2	103%
	LED Kugel gepulst	3306	6348	0,3155	0,3300	444,5	489,3	99%

Es wurden die Lichtströme jeweils mit dem (SRDF) Kugelkorrekturfaktor korrigiert. Jedoch erklärt diese Korrektur (Korrekturwerte von etwa 1 %) nicht die gefundenen, deutlich größeren Abweichungen.

5 Zusammenfassung und zukünftige Untersuchungen

Aus der obigen Untersuchungen kann noch nicht geschlossen werden, dass die SRDF Kugelkorrektur schon ausreichend bestimmt ist, oder ob noch andere Einflüsse die beobachteten systematischen Abweichungen verursachen können.

Die Unzulänglichkeiten beim mechanischen Einbringen/ Haltern der LED in die Kugelwand haben auch einen deutlichen Einfluss auf die Messergebnisse. Der mechanische Aufbau verursacht generell das geometrische Problem, da die Befestigung sowie die Versorgung der LED, das Einbringen und die optimale Orientierung des Messobjekts als Teil der Kugelwand in dem derzeitig genutzten Aufbau nicht hinreichend realisiert werden kann (Abbildung 12).

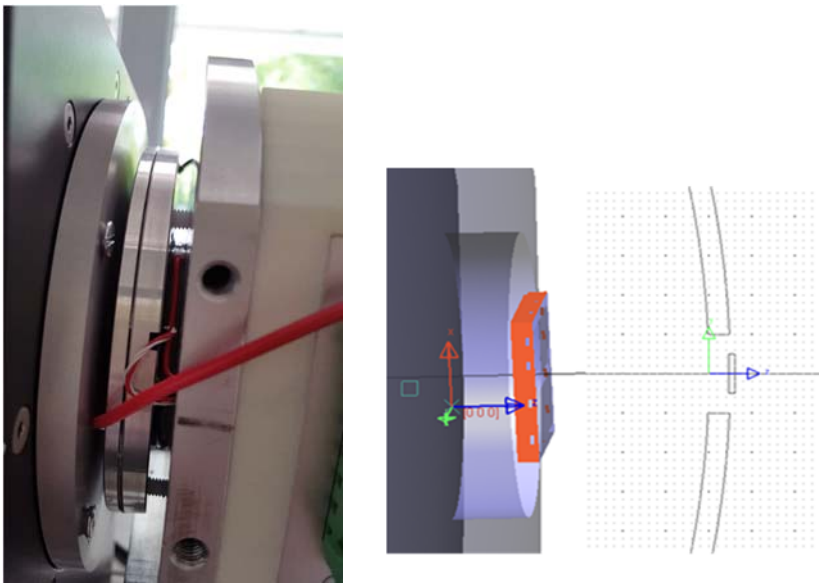


Abbildung 12: Das geometrische Problem beim Eibringen der LED in die Kugelwand

Diese messtechnischen Probleme treten bei dem bisher praktiziertem Verfahren (Typ abhängige Kalibrierung der LED-Kugel durch eine unabhängige Goniophotometermessung

des gleichen LED-Typs) und das somit angewendete Substitutionsverfahren nicht auf, da auf diese Weise alle Einflussparameter kompensiert werden.

Für die absolute Messung des Lichtstroms mit der LED-Kugel, ohne das zeitaufwändige Substitutionsverfahren zu verwenden, muss das Messsystem weiter charakterisiert werden, um so eine ausreichende Korrektur ableiten zu können.

Weitere Schritte werden sein:

Die verwendeten LEDs für Simulationsrechnungen zu modellieren

Optimierung der LED-Halterung und des Kugelports, um die optisch aktive LED-Struktur in die Kugelwand so zu integrieren, dass der derzeitige Ansatz der Modellierung besser erfüllt wird

Kalibrierung der LED-Kugel mit weiteren, andersartigen LED-Normalen, um so weitere absolute Vergleichswerte zu erhalten.

Modellierung einer großen (3m-Ulbrichtkugel) und Einstrahlung von Außen (Kugelwandaufbau), um so die Modellbildung zu überprüfen.

6 Literaturverzeichnis

[1] Instrument Systems, „*Ulbricht-Kugeln - Lichtstrom-Messung von LEDs und Lampen*“