

Radiometrische und photometrische Messsysteme für LEDs

**Dr.-Ing. Tran Quoc Khanh, Arnold & Richter AG, Abteilung R&D,
Türkenstr. 89, 80799 Munich**

**Dipl.-Ing. Z. Özver-Krochmann und Dipl.-Ing.(FH) Stefan Hiltawsky,
PRC Krochmann GmbH, Wilmersdorfer Str. 39, 10627 Berlin**

1. Einleitung

In den letzten Jahren wurde die Anwendung von LEDs im Automobilbereich und in der Allgemeinbeleuchtung immer bedeutsamer. Wie auch für jeden anderen Lampentyp sind zuverlässige Messmethoden und -systeme für die Entwicklung, Prüfung und Zertifizierung von LED Lampen und Systemen zwingend notwendig.

Die offensichtlichen Unterschiede zu konventionellen Lichtquellen erfordern die Berücksichtigung der kleinen Abmessungen, der spektralen Strahlverteilung und der räumlichen Verteilung, um reproduzierbare Messergebnisse zu erhalten. Auf der Grundlage der Erfahrungen von Lichtmesslaboren und Herstellern von LEDs gibt die CIE hilfreiche Empfehlungen zur LED Messung. Der CIE technical report 127 /1/ beschreibt die Messung von lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Größen und führt die neue Größe „Gemittelte LED Lichtstärke“ für zwei Standardbedingungen ein.

Gemäß dieses technischen Reports hat die PRC Krochmann GmbH, Berlin, ein Messsystem entwickelt, das für die Messung der Lichtstärkeverteilung, der spektralen Strahlstärkeverteilung, der Farbparameter und des Lichtstroms konzipiert wurde. Diese Veröffentlichung beschreibt die neuesten Erkenntnisse dieser Neuentwicklung.

2. Messung der Lichtstärke

Die Lichtstärke ist die wichtigste Messgröße für die Charakterisierung von Lichtquellen. Sowohl der Maximalwert im Zentrum, als auch die räumliche Verteilung der Lichtstärke sind spezifische Kenngrößen von LEDs, insbesondere von engstrahlenden LEDs. Bei konventionellen Lichtquellen werden die Lichtstärkemessungen mit Photometerköpfen im Allgemeinen unter Fernfeldbedingungen durchgeführt. Das bedeutet, dass die Entfernung zwischen Lichtquelle und Photometerkopf im Vergleich zur längsten Ausdehnung der leuchtenden Fläche sehr groß, und der Durchmesser des Empfängers im Vergleich zur Messentfernung sehr klein ist. Wenn man dagegen eine LED-Messung in der Entfernung von einigen Zentimetern mit einem Durchmesser der Empfängerfläche von z.B. 8 mm macht, kommt es zu einer Mittelwertbildung der Lichtstärkewerte, die von der geometrischen Anordnung und der Lichtstärkeverteilung der LED abhängt. Wegen der unterschiedlichen Messanordnungen in verschiedenen Laboren sind die Messergebnisse nicht vergleichbar.

Aufgrund dieses Problems hat die CIE zwei Standardbedingungen für die “Gemittelte LED Lichtstärke” definiert. Beide Anordnungen beinhalten die Benutzung eines Empfängers mit einer kreisförmigen Empfängerfläche von 100 mm² (entspricht einem

Durchmesser von 11,3 mm). Der Empfänger soll in der Ausstrahlungsrichtung der LED liegen und so ausgerichtet werden, dass die mechanische Achse der LED senkrecht zum Empfänger steht und den Mittelpunkt der Empfängerfläche schneidet. Der Abstand zwischen der Spitze der LED und der Empfängerfläche stellt den Unterschied zwischen den beiden Standardbedingungen A und B dar.

Die Abstände betragen

- bei Standardbedingung A: 316 mm (entspricht einem Öffnungswinkel von 2°)
- bei Standardbedingung B: 100 mm (entspricht einem Öffnungswinkel von $6,5^\circ$)

Diese Definitionen ermöglichen es, verschiedene LEDs zu vergleichen. Allerdings sollte bei der Anwendung dieser Messanordnung beachtet werden, dass es sich bei der gemessenen Lichtstärke nicht um das Maximum handelt. Bei engstrahlenden LEDs kann die tatsächliche Lichtstärke viel größer sein.

Die Messung der gemittelten LED Lichtstärke $I_{LED A}$ oder $I_{LED B}$ kann auf einer Photometerbank mit Haltern für die LED-Probe und für den Photometerkopf durchgeführt werden. Für die Kalibrierung kann ein LED Lichtstärkenormal mit ähnlicher maximaler Lichtstärke und ähnlicher räumlicher Verteilung benutzt werden. Die Verwendung eines kalibrierten Luxmeter mit Photometerkopf und Berechnung der Lichtstärke nach dem Photometrischen Entfernungsgesetz ist ebenfalls möglich. Fernfeldmessungen können ebenfalls auf einer Photometerbank realisiert werden. Zur Messung der Lichtstärkeverteilung ist jedoch ein vollautomatisches Goniophotometer der Stand der Technik.

3. Das PRC Goniophotometer/Goniospektrometer 760

Wenn Daten über die lichttechnischen Eigenschaften einer Lichtquelle benötigt werden, ist die Lichtstärkeverteilung die wichtigste Angabe oder mindestens die Maximallichtstärke. Sie gibt Informationen über die Abstrahlcharakteristik der Lichtquelle. Sie kann engstrahlend, breitstrahlend, symmetrisch oder unsymmetrisch sein. Moderne Lichtquellen wie LEDs, kompakte Leuchten mit Halogen- oder Kompaktleuchtstofflampen und Lichtleiteroptiken haben kleine Abmessungen und ein geringes Gewicht von weniger als 1 kg. Ein übliches Goniophotometer für Innenleuchten ist kostenintensiv und die große Messentfernung von mehr als 10 m ist nicht notwendig, wenn nicht sogar unbrauchbar für diese kleinen Lichtquellen. Die PRC Krochmann GmbH bietet mit dem Goniophotometer/Goniospektrometer 760 ein Messsystem an, das speziell an die Messanforderungen dieser Lichtquellen angepasst ist. Es ist sowohl für den Gebrauch in Forschungslaboren, als auch in industriellen Laboren bestimmt und hat ein sehr gutes Preis-Leistungs-Verhältnis.

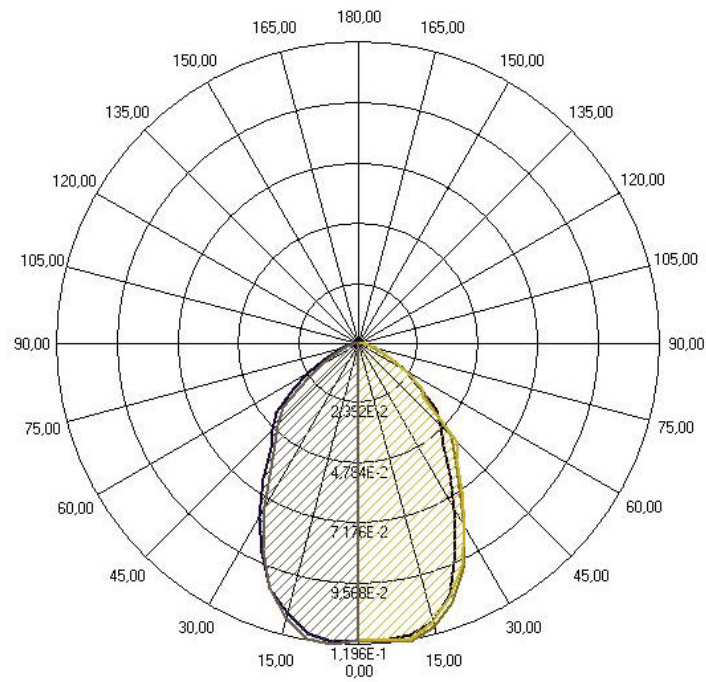


Diagramm 1: Polardiagramm einer Strahlstärkeverteilung

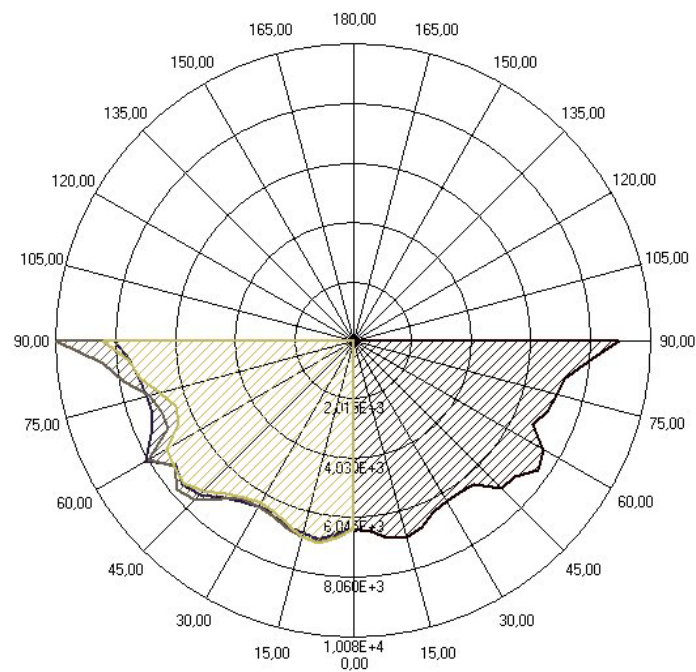


Diagramm 2: Polardiagramm einer Farbtemperaturverteilung

3.1. Aufbau des Goniophotometers

Das System besteht aus einer mechanischen Dreheinheit, einem Justagelaser, einem Empfänger, einer PCI-Karte für die Schrittmotoren und Steuer- und Auswertesoftware. Drei verschiedene Versionen sind erhältlich:

- mit Photometerkopf und Luxmeter
- mit Spektrometerkopf und PCI-Karte
- beide Empfänger

Diagramm 3 zeigt das Prinzip der goniophotometrischen Messung. In Diagramm 4 ist das Blockschaltbild des Goniophotometer/Goniospektrometer 760 Systems zu sehen. Der Aufbau ist gemäß CIE 121-1996. → /2/

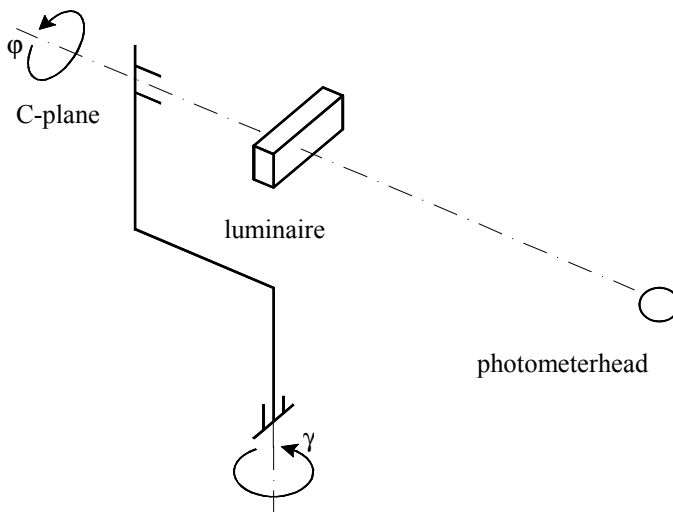


Diagramm 3: Prinzip der goniophotometrischen Messung

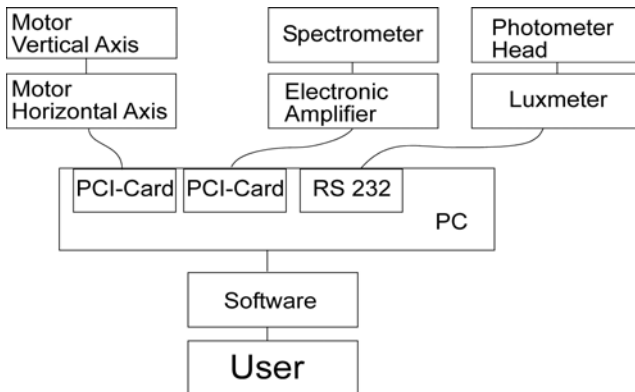


Diagramm 4: Blockschaltbild des Goniophotometer/Goniospektrometer 760 Systems.

3.1.1. Mechanischer Aufbau und Ausrichtung

Zwei Schrittmotoren treiben unten eine vertikale Achse und oben eine horizontale Achse an, bei der der obere Drehteller direkt mit der Montageplatte für die Lichtquelle verbunden ist. Der Gesamtdurchmesser des Drehbereichs beträgt nur 0,6 m, die Höhe liegt bei 0,5 m. Wenn eine platzsparende Installation in einem Labor nötig ist, kann das Goniophotometer auch in einer lichtdichten Kiste untergebracht werden, wodurch der sonstige Platz auch während der Messung genutzt werden kann. Mit den standardmäßigen Abmessungen können Lichtquellen wie z.B. LED-Flächen bis zu einer maximalen Länge von 0,3 m und einem maximalen Gewicht von 1 kg gemessen werden. Die Einstellung des Lichtschwerpunktes auf die vertikale Drehachse wird mit Hilfe des Justagelaser-

sers und der einstellbaren Schiene vorgenommen. Für LEDs wird empfohlen, die Spitze als Lichtschwerpunkt anzunehmen.

Die Wahl zwischen einem photometrischen oder radiometrischen Empfänger hängt von der zu messenden Lichtquelle und den gewünschten Messgrößen ab. Insbesondere für LED Messungen ist nicht nur die Lichtstärkeverteilung interessant, sondern auch die räumliche Verteilung des Spektrums und der Farbparameter. Es ist möglich, die Messentfernung entsprechend der CIE 127-Empfehlung oder entsprechend der Ausdehnung der leuchtenden Fläche durch Verschieben des Empfängers auf einer Art Photometerbank einzustellen.

Nach Befestigung der Lichtquelle und der mechanischen Ausrichtung läuft die Messung automatisch computergesteuert ab. Die Software steuert die Schrittmotoren über die PCI-Karte und bekommt die Messdaten des Luxmeters über die RS 232 Schnittstelle, bzw. von der PCI-Karte des Spektrometers.

3.1.2. Drehbewegungen des Goniophotometer 760

Das Goniophotometer 760 misst die Lichtstärkeverteilung im meist üblichen C-Ebenen-System. Der γ -Winkel ist einstellbar von 0° bis 180° und die Schrittwinkel der γ -Winkel und C-Ebenen sind von 0.1° bis 90° einstellbar.

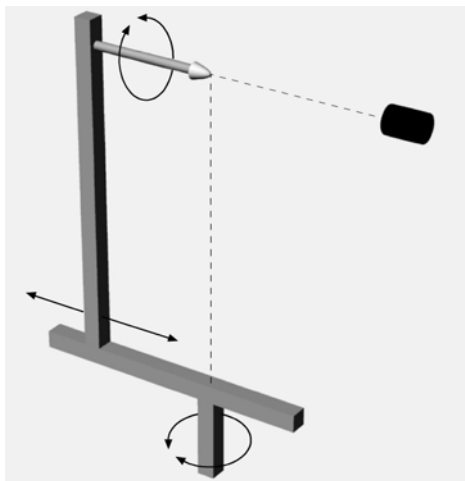


Diagramm 5: Mechanische Bewegungen

3.1.3. Photometerkopf

Ein Qualitätsphotometerkopf mit sehr guter $V(\lambda)$ -Anpassung von $f_1' < 1.5\%$ stellt eine präzise Messung der meisten Lichtquellen sicher. Die Luxmeter/Photometerkopf Einheit erfüllt die Anforderungen der CIE 121, 1996 in Bezug auf $V(\lambda)$ -Anpassung, Linearität usw. Die Messungen werden in einem relativ kurzen Messabstand durchgeführt. Der oben beschriebene Effekt der Mittelung der Messwerte muss bei der Auswahl des Photometerkopfs berücksichtigt werden. Ein kleiner Durchmesser von 4 mm oder 8 mm ergibt eine gemessene Lichtstärkeverteilung, die nah an der „echten“ Lichtverteilung der Probe liegt. Engstrahlende Quellen haben eine hohe maximale Lichtstärke. Wenn der Durchmesser der Empfängerfläche größer wird, wird der Effekt der Mittelung größer und die gemessene maximale Lichtstärke wird kleiner als mit der kleinen Empfängerfläche. PRC Krochmann bietet Photometerköpfe mit den Durchmessern 4 mm, 8 mm und 11,3 mm an. Das Luxmeter erfasst die Messwerte in Lux und die

Software berechnet die Lichtstärken mit Hilfe des photometrischen Entfernungsgesetzes.

3.2. Spektrometer

Um die Lichtstärkeverteilung zu messen, ist es auch möglich, die spektrale Strahlstärke in Abhängigkeit des Abstrahlwinkels mit einem Spektrometer zu messen und die Lichtstärken mit der Software zu berechnen. Diese Berechnung hat keinen Fehler aufgrund der $V(\lambda)$ -Anpassung, da mit den definierten Werten gerechnet wird. Ein kleiner Nachteil der Spektrometermessung ist die schlechtere Stabilität im Vergleich zum Photometerkopf.

Weil für jeden Messwinkel eine spektrale Messung gemacht werden muss, kommen für die Messung nur Spektroradiometer mit schneller Messzeit in Frage. Spektroradiometer mit Dioden-Array sind hierfür am besten geeignet (siehe Diagramm 6).

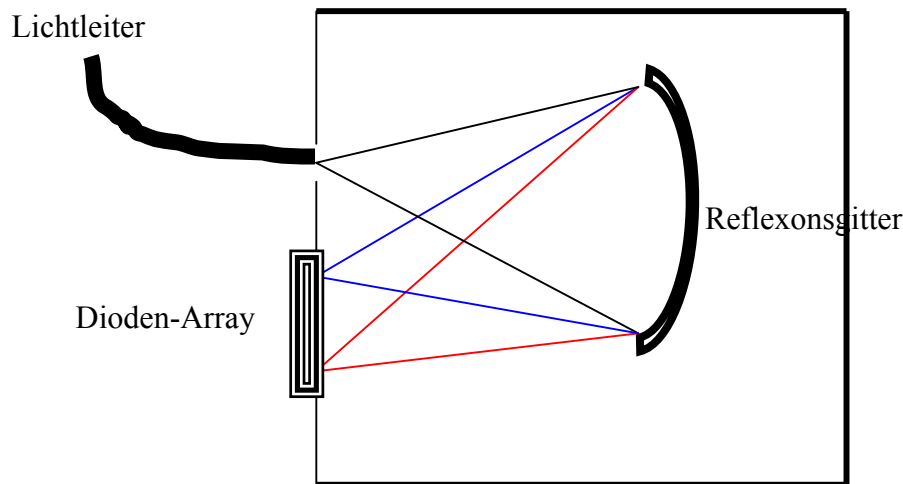


Diagramm 6: Prinzipielle Anordnung des Spektrometers für Goniospektrometer 760

Die Messzeit für eine spektrale Messung beträgt je nach Lichtquelle 1-5 s. Für LED-Messungen wird eine spektrale Bandbreite von 4-5 nm mit einer Genauigkeit von ca. 0,5nm benutzt. Das Spektroradiometer wird mit einer Glühlampe (FEL, 1000 W, kalibriert von der PTB) mit einer angenommenen Genauigkeit von $\pm 4-5 \%$ im Spektralbereich von 380 nm - 780 nm kalibriert.

3.3. Software

Abgesehen von der mechanischen Justierung, sind sämtliche Teile des Goniophotometers computergesteuert. Der Computer steuert und versorgt die Schrittmotoren und das Spektrometer und liest die Messwerte des Luxmeters ein. Die Verbindung und die Spannungsversorgung der Geräte ist sehr einfach. Die Software besteht aus einer Datenbank, in der jede Messung gespeichert ist, einem Mess- und Steuermodul, der Messdatenauswertung und einem Druckmodul.

Bevor die Messung durchgeführt werden kann, müssen die mechanischen Daten wie Messentfernung zwischen Lichtquelle und Empfänger, Abmessungen der Lichtquelle, Messwinkelbereich und Schrittwinkel eingegeben werden. Danach muss, falls es nicht

schon vorher gemacht wurde, das System ausgerichtet werden und die LED-Spitze in den Schnittpunkt der Drehachsen mit Hilfe des Justagelasers und der Software positioniert werden. Nach der Einbrennphase der Lichtquelle, die mit der Software beobachtet werden kann, ist der Messvorgang startbereit. Die Messung läuft vollkommen automatisch ab.

Die Messdaten der Lichtstärkeverteilung können wahlweise im europäischen EULUM-DAT-Format oder im amerikanischen IES-Format abgespeichert werden. Auf dieser Datenbasis berechnet die Software je nach Anwendung den Leuchtenbetriebswirkungsgrad oder den Gesamtlichtstrom. Mit dem Spektrometer hat der Anwender zahlreiche Möglichkeiten, das gemessene Spektrum mit der Software auszuwerten: Sie berechnet die Lichtstärke- und Strahlstärkeverteilung (mit wählbarem Wellenlängenbereich), Lichtstrom und Strahlungsleistung, Farbwiedergabeindizes, CIE und CIELUV Farbkordinaten und ähnlichste Farbtemperatur jeweils für alle Messwinkel.

Diagramm 7 zeigt einen Screenshot der Software mit einem Ergebnis einer spektralen Messung in einer Winkelposition C- γ .

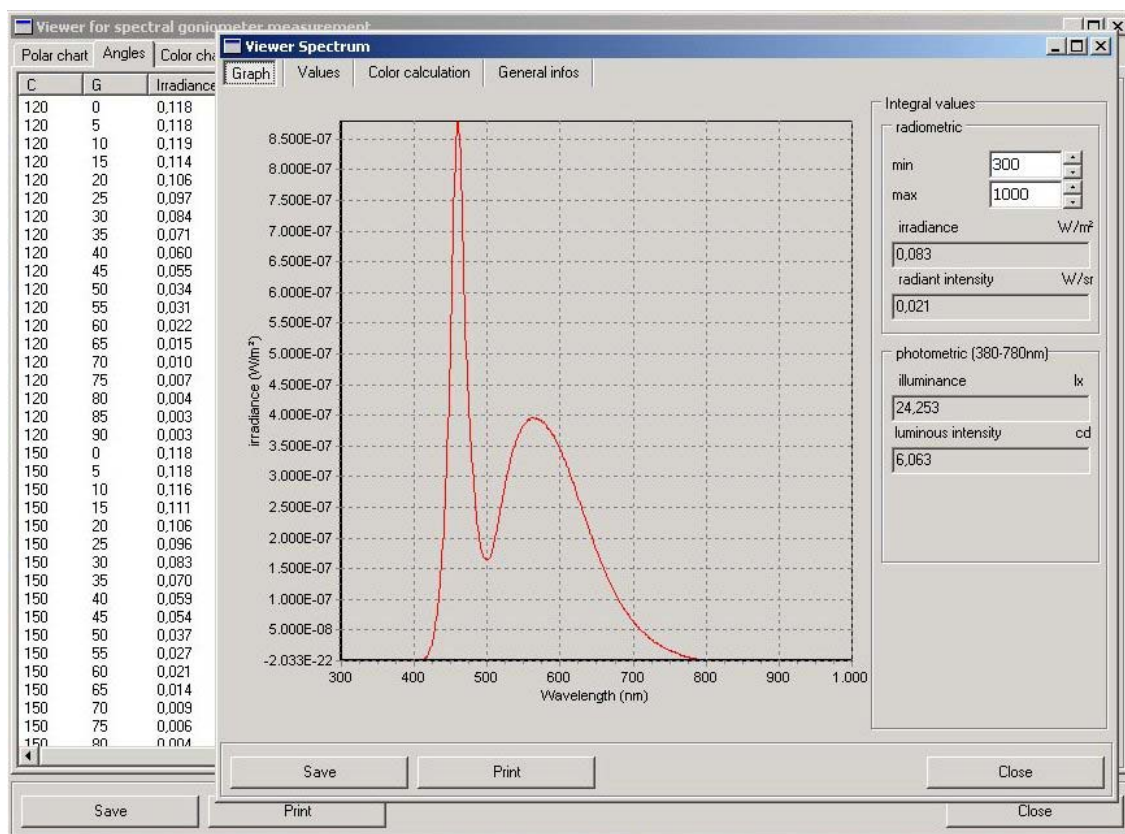


Diagramm 7: Ergebnis einer spektralen Messung in einer Winkelposition C- γ

3.4. Spektraler Korrekturfaktor

Wenn LEDs mit Emissionsspektren, die hauptsächlich im Bereich von unter 470 nm (blaue LEDs) oder über 680 nm (rote LEDs) liegen, mit einem $V(\lambda)$ -angepassten Pho-

tometerkopf gemessen werden, kommt es selbst mit sehr guten Photometerköpfen mit $f_1' < 1,5 \%$ zu ziemlich großen Messfehlern, da die $V(\lambda)$ -Anpassung in diesen Bereichen einen recht großen relativen Fehler hat.

Eine besondere Ausstattung der PRC 760 Version mit Photometer und Spektrometer verbindet die Vorteile von beiden Empfängern, um ein möglichst genaues Messergebnis zu erzielen. Nach der Messung der photometrischen und spektralen Daten berechnet die Software die Aktinität als spektralen Korrekturfaktor für jeden Messwinkel. Er errechnet sich aus der relativen spektralen Empfindlichkeit des Photometerkopfs, der relativen spektralen Verteilung der Probe (gemessen mit dem Spektrometer) und der relativen spektralen Verteilung der Kalibrierlichtquelle des Photometerkopfs. Die mit dem Photometer gemessenen Lichtstärkewerte werden mit diesen berechneten Faktoren multipliziert, um die korrigierten aktinischen Werte zu bekommen. Die Aktinität ist wie folgt definiert: $\rightarrow /3/$

$$F = \frac{\int_0^{\infty} S_{\lambda,c} \cdot s(\lambda)_{eff,rel} \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} S_{\lambda,c} \cdot s(\lambda)_{rel} \cdot d\lambda} \cdot \frac{\int_0^{\infty} S_{\lambda,Z} \cdot s(\lambda)_{rel} \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} S_{\lambda,Z} \cdot s(\lambda)_{eff,rel} \cdot d\lambda} \quad (1)$$

mit:

$S_{\lambda,c}$ - spektrale Verteilung der Kalibrierlichtquelle, die für die Kalibrierung des Photometerkopfs benutzt wurde. In den meisten Fällen, wie auch im PRC Krochmann Labor, ist es CIE Normlichtart

$S_{\lambda,z}$ - spektrale Verteilung der gemessenen LED-Strahlung

$s(\lambda)_{eff,rel}$ - relative spektrale Bewertungsfunktion = $V(\lambda)$ -Funktion

$s(\lambda)_{rel}$ - relative spektrale Empfindlichkeit des Photometerkopfs

Für einen perfekt angepassten Photometerkopf ist der Korrekturfaktor F gleich 1. Die relative Messunsicherheit aufgrund der spektralen Fehlanpassung gibt folgende Gleichung an:

$$E = |1-F| \cdot 100 \% \quad (2)$$

Sie ist gleich 0 für einen perfekt angepassten Photometerkopf. Für einen Photometerkopf mit $f_1' < 1.35 \%$, mit dem das Goniophotometer 760 meistens ausgerüstet wird, und die LED-Spektren aus Diagramm 8 zeigt Tabelle 1 die Messunsicherheit E :

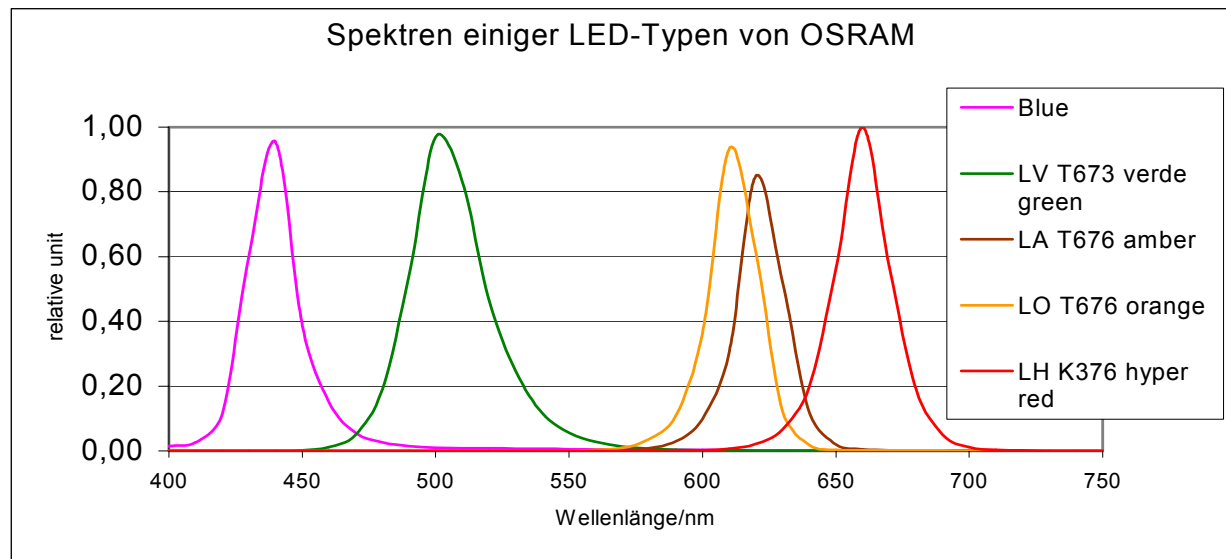


Diagramm 8: Beispiele von Spektren von Osram-LEDs

Tabelle 1:

LED-type	E
Blue	25.4 %
Verde green	0.44 %
Amber	2.39 %
Orange	0.99 %
Hyper Red	0.49 %

Mit Ausnahme der blauen LEDs ist der Messfehler für farbige LEDs sehr klein. Mit einem Photometerkopf, der speziell für den blauen Bereich zwischen 390 nm und 480 nm angepasst wurde, kann der Messfehler auf 5 - 8 % statt 25 % reduziert werden.

3.5. Lichtstromberechnung

Die Gesamtlichtemission einer Lichtquelle wird durch den Lichtstrom angegeben. Für Leuchten ist der Leuchtenbetriebswirkungsgrad (Quotient aus Leuchtenlichtstrom und Gesamtlampenlichtstrom) entscheidend. Mit der Software für das PRC Goniophotometer 760 wird der Lichtstrom mit dem Zonenlichtstromverfahren aus der Lichtstärkeverteilung, gemessen mit dem Photometer oder Spektrometer, berechnet. Diese Methode ist genauer als die Messung mit einer Ulbrichtkugel.

3.6. Farbparameter

Im Bereich der LEDs spielen Farbparameter eine wichtige Rolle. Nicht nur die Gesamtwerte, sondern auch die Verteilung in Funktion der Abstrahlwinkel sind von Bedeutung. Das menschliche Auge ist sehr empfindlich in Bezug auf Farbdifferenzen. Deshalb muss ein Produzent von LEDs und LED-Feldern die Farbparameter der LEDs genau kennen. Eine Vielzahl von Parametern kann basierend auf den Spektralmessun-

gen berechnet werden. Die Farbkoordinaten werden in CIE_{xy} und CIE_{uv}-Koordinaten angegeben. Um die Daten anschaulich darzustellen, werden sie im CIE Farbdreieck markiert (siehe Diagramm 9). Die Messabweichung der Farbkoordinaten wird mit $\Delta x = \pm 0.002$ und $\Delta y = \pm 0.0015$ abgeschätzt.

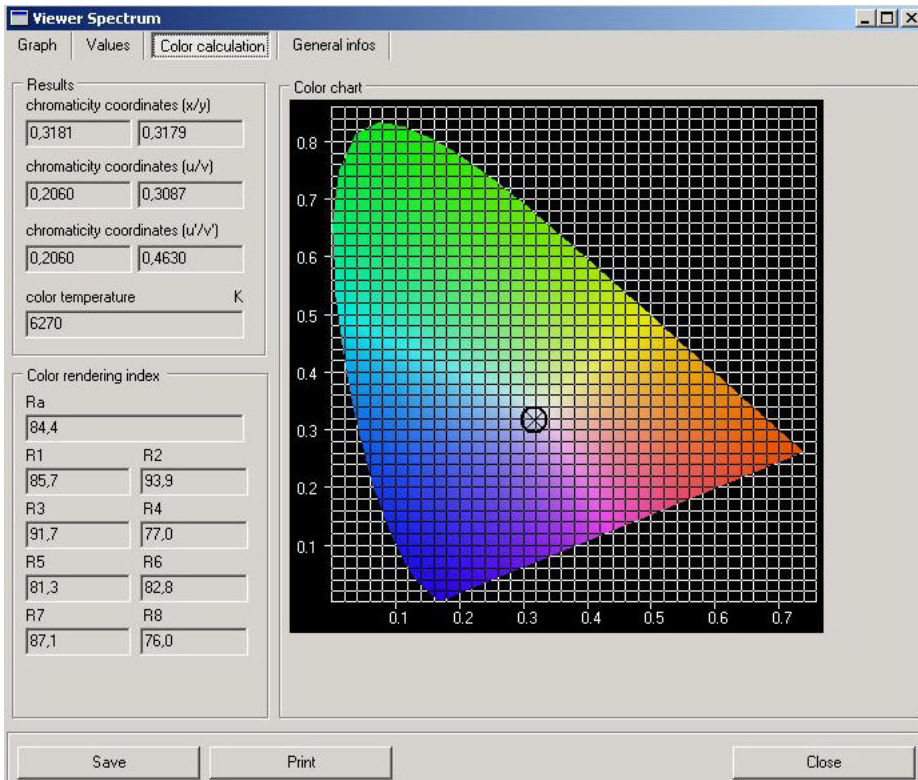


Diagramm 9: CIE Farbdreieck

Zur Charakterisierung von weißen LEDs spielen die ähnlichste Farbtemperatur und der Farbwiedergabeindex eine wichtige Rolle. Die ähnlichste Farbtemperatur gibt eine Information über den optischen Eindruck der LED und ihren „Weißton“. Dieser Wert kann ebenso wie alle anderen Parameter mit dem Abstrahlwinkel variieren (siehe Diagramm 10). Um die Normen für Innenraumbeleuchtung zu erfüllen, muss ein Minimum entsprechend der Sehaufgabe für den Farbwiedergabeindex erfüllt werden. Um diesen Standard zu erreichen, muss der LED-Produzent die Lichtqualität verbessern. Statt weißer LED können auch LED-Felder mit verschieden-farbigen LEDs eingesetzt werden, um weißes Licht mit guter Farbwiedergabe zu erzeugen. Für zuverlässige Tests in der

Forschung und im Qualitätsmanagement ist das System ein leistungsstarkes Werkzeug mit einer Vielzahl von Anwendungen.

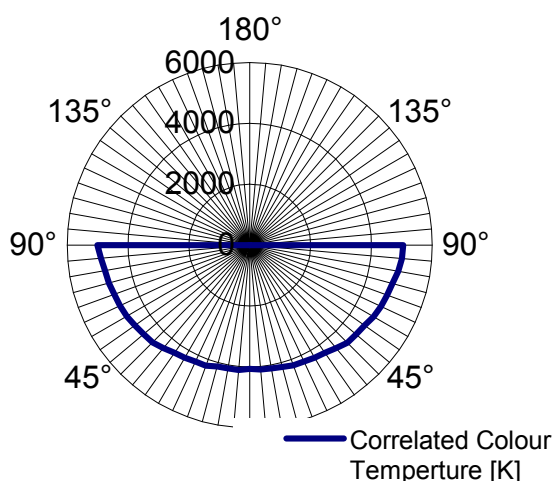


Diagramm 10: Winkelabhängige Verteilung der ähnlichsten Farbtemperatur einer Lichtquelle, gemessen mit dem Goniospektrometer 760

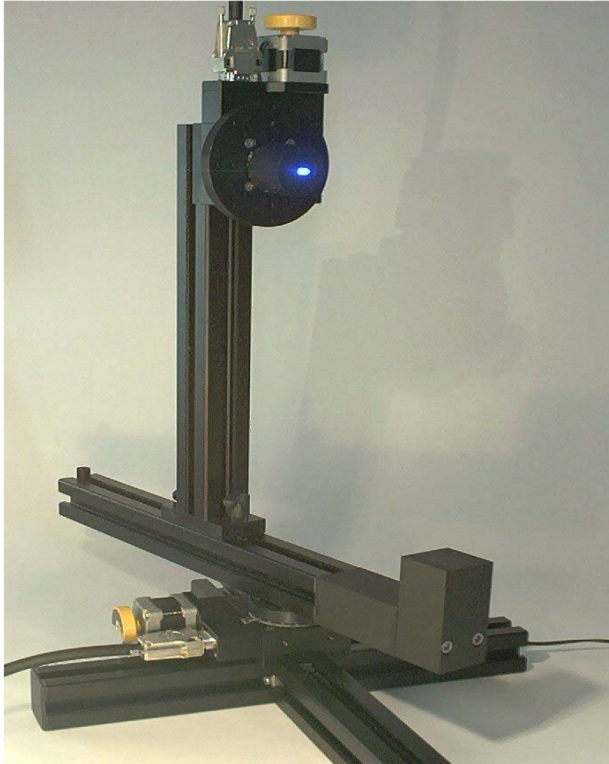


Diagramm 11: Goniophotometer/spektrometer 760 für LED Messungen

Literatur:

- /1/ CIE technical committee report 127, 1997: measurements of LEDs
- /2/ CIE Technical report 121, 1996: The photometry and goniophotometry of luminaires
- /3/ Khanh T.Q. et al: Photobiologisch wirksame Strahlung - Einführung, Stand der Meßtechnik, in Licht Heft 4/97 S.334-338 und Heft 5/97 S.421-424