

Erfahrungen mit goniophotometrischen Messungen an Lumineszenzdioden

Kai Broszio

Technische Universität Berlin, Institut für Energie- und Automatisierungstechnik,
Fachgebiet Lichttechnik, Einsteinufer 19, 10587 Berlin
eMail: kai.broszio@tu-berlin.de

Einführung

Die erhöhte Sensibilität in Bezug auf den Umweltschutz, der schonende Umgang mit Ressourcen und nicht zuletzt ökonomische Überlegungen führten in den vergangenen Jahren dazu, dass der Energieeffizienz enorme Aufmerksamkeit entgegengebracht wird.

Der Beleuchtung als ein Kostenfaktor in Haushalt und Industrie kommt deswegen wesentliche Bedeutung zu. Beispielsweise wenden die deutschen Haushalte bis zu 12 % ihrer Energiekosten für Beleuchtungszwecke auf [DENA, 2008].

Neben der intelligenten Regelung künstlicher Beleuchtung und der Nutzung des natürlichen Tageslichtangebots ist der Einsatz effizienter Lichtquellen ein wesentlicher Bestandteil eines jeden Beleuchtungskonzepts. Eine höchst erfolgversprechende Innovation in Richtung energieeffizienter Lichtquellen ist die Lumineszenzdiode (LED). Die Entwicklung weißer LEDs mit hoher Lichtausbeute und langer Lebensdauer bei gleichzeitig fallenden Preisen machen sie auch für die Allgemeinbeleuchtung interessant und ließen ihren Anteil in den letzten Jahren stark wachsen. Die Verkaufszahlen und damit die Bedeutung von LEDs nehmen rasant zu. So wuchs der Markt für HB-LEDs¹ zwischen 1995 und 2005 jährlich um ca. 42 % und hat im Jahr 2005 bereits ein Marktvolumen von 3,9 Mrd. US-Dollar

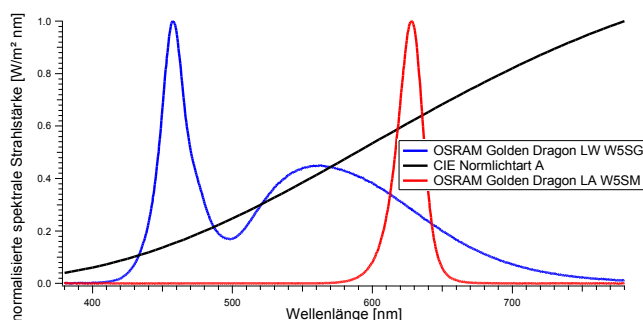


Abbildung 1: Normalisiertes Spektrum der CIE-Normlichtart A im Vergleich zu den normalisierten Spektren einer OSRAM Golden Dragon LW W5SG und einer OSRAM Golden Dragon LA W5SM (380 - 780nm)

erreicht [Steele, 2007]. Für die Allgemeinbeleuchtungszwecke machen LEDs bisher nur einem kleinen Anteil (ca. 200 Mio. US-Dollar) im weltweiten Markt für Allgemeinbeleuchtung (ca. 15 Mrd. US-Dollar) aus [Kleiner, 2007]. Dieser Anteil wird sich schnell steigern, da das grundsätzlich neue Prinzip dieser Technologie, Licht zu erzeugen, star-

1 High-brightness-LEDs

ke Effizienzsteigerungen erwarten lässt. Die Abbildung 1 zeigt die Spektren einer weißen LED (blauer Graph) und einer amberfarbenen LED (roter Graph) im Vergleich zum Spektrum einer konventionellen Glühlampe bei 2856 K (schwarzer Graph), normalisiert auf das jeweilige Maximum der spektralen Strahlstärke im sichtbaren Spektralbereich. Die Spektren in der Abbildung 1 zeigen, dass LEDs ein völlig anderes Spektrum besitzen als Temperaturstrahler. Die Abbildung 2 stellt den Aufbau einer weißes Licht erzeugender LED schematisch dar. Die meisten LEDs erzeugen weißes Licht indem ein blau emittierender LED-Chip mit seiner Strahlung einen Farbstoff anregt, der wiederum im längerwelligen Teil des sichtbaren Spektralbereichs emittiert. Daraus geht hervor, dass sich in Abhängigkeit des Betrachtungswinkel die sichtbare Chipfläche und die Wegstrecke durch den Lumineszenzstoff ändert. Die Auswirkungen auf das emittierte Spektrum darzustellen ist unter anderem Gegenstand dieses Beitrages.

Bisherige photometrische Messverfahren sind für herkömmliche Lichtquellen optimiert und sind daher für die Bestimmung wesentlicher Charakteristika und Gütekriterien von Lumineszenzdioden ungeeignet. Aufgrund der besonderen Eigenschaften von LEDs sind neue Messmethoden unerlässlich.

Dieser Beitrag zeigt die Ergebnisse von goniophotometrischen Messungen an OSRAM *Golden DRAGON*® LEDs und die Erfahrungen, die dabei gemacht wurden.

Versuchsaufbau

Das Goniophotometer (im Folgenden LED-Goniospektralradiometer genannt) besteht aus den folgenden Komponenten: das Spektrometer Instrument Systems *CAS 140B*, die Schrittmotorsteuerung ISEL² *CNC-Steuerung C10C-2*, die Stromversorgung Keithley 2400 *Sourceme*ter, das Goniometer

Instrument Systems *LED-GON-100* und ein PC mit einer speziellen PCI-Erweiterungskarte für den Anschluss des Spektrometers und installierter Instrument Systems Software *SpecWin Version 3.4*. Des

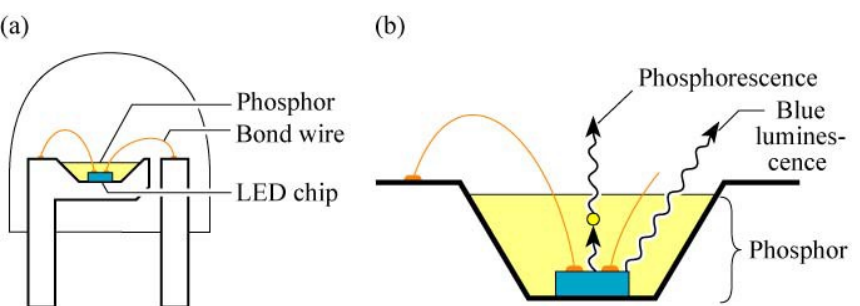


Abbildung 2: Aufbau einer weißes Licht erzeugenden LED aus einem blau emittierenden LED-Chip und Leuchtstoffverkapselung [Schubert, 2006]

² Firmenname: iselautomation GmbH & Co. KG

Weiteren ist in das Goniometer *LEDGON-100* der Messkopf *LEDGON-120* mit Diffusor³ integriert. Die einfallende Strahlung wird von dort über den optischen Wellenleiter⁴ *OFG-415* und den Fasersteckeradapter *PLG-410* in das Spektrometer *CAS 140B* geleitet.

Mittels des Spektrometers Instrument Systems *CAS 140B* kann der Wellenlängenbereich zwischen 380 und 780 nm und damit der gesamte Bereich sichtbarer elektromagnetischer Strahlung untersucht werden.

Dieses System ist auf Beleuchtungsstärke im Abstand von 20 cm zwischen Empfänger und Lichtquelle kalibriert, weshalb die Empfehlungen des Averaged LED Intensity Konzepts der CIE nicht eingehalten werden können. Dieses Konzept wurde erstmals im Jahr 1997 in der CIE-Veröffentlichung 127 vorgestellt. Dort wird in zwei Entfernungen (Kondition A 316 mm und Kondition B 100 mm Entfernung des Empfängers zur LED-Spitze) die gemittelte Lichtstärke auf einer runden Fläche von 1 cm² bestimmt [Norm CIE 127 – 2007].

Ergebnisse

Die Tabellen 1, 2 und 3 zeigen die Resultate der Lichtstrommessungen bei Strömen zwischen 100 und 500 mA an den *OSRAM Golden DRAGON®* LW W5SG, LA W5SM und LB W5SG LEDs. Die Abbildung 3 zeigt die Abhängigkeit des Lichtstroms von der Stromstärke

für alle drei LEDs graphisch. Es zeigt sich ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen Stromstärke und Lichtstrom. Wie in den nebenstehenden Tabellen 1, 2 und 3 zu erkennen ist, sinkt die Lichtausbeute mit zunehmendem Betriebsstrom (siehe Abbildung 4). Daneben zeigte sich, dass sich die Peakwellenlänge mit dem Strom änderte. Die Messwerte zeigt die Tabelle 4. Die Peakwellenlängen der blauen und weißen LED (LW W5SG und LB W5SG) verschiebt

Strom in mA	Spannung in V	elektrische Leistung in W	Lichtstrom in lm	Lichtausbeute in lm/W	Filter
100,20	3,00	0,30	8,35	27,79	-
200,18	3,20	0,64	15,36	23,97	-
300,19	3,38	1,02	21,82	21,48	OD1
400,23	3,56	1,42	27,32	19,19	OD1
500,23	3,73	1,86	32,29	17,33	OD1

Tabelle 1: Lichtströme der weißen LED LW W5SG bei unterschiedlichen Betriebsströmen (OD1 – Optische Dichte 1)

Strom in mA	Spannung in V	elektrische Leistung in W	Lichtstrom in lm	Lichtausbeute in lm/W
100,21	1,99	0,20	12,16	60,86
200,19	2,18	0,44	22,82	52,41
300,20	2,35	0,70	32,73	46,49
400,24	2,51	1,00	41,74	41,56
500,23	2,67	1,34	49,80	37,27

Tabelle 2: Lichtströme bei verschiedenen Betriebsströmen der LED LA W5SM

Strom in mA	Spannung in V	elektrische Leistung in W	Lichtstrom in lm	Lichtausbeute in lm/W
100,19	2,99	0,30	4,78	15,99
200,17	3,20	0,64	6,94	10,84
300,18	3,39	1,02	8,80	8,64
400,22	3,58	1,43	10,46	7,3
500,21	3,76	1,88	11,97	6,36

Tabelle 3: Lichtströme der LED LB W5SG bei unterschiedlichen Betriebsströmen

³ Eine Streuscheibe mit einem Quadratzentimeter Fläche ($A = 1 \text{ cm}^2$)

⁴ Faserbündel

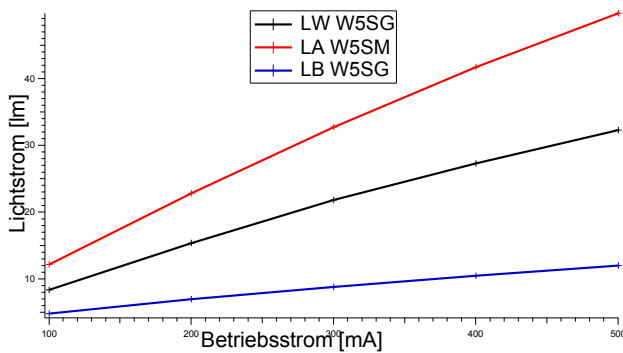


Abbildung 3: Lichtströme der LEDs in Abhängigkeit vom Betriebsstrom

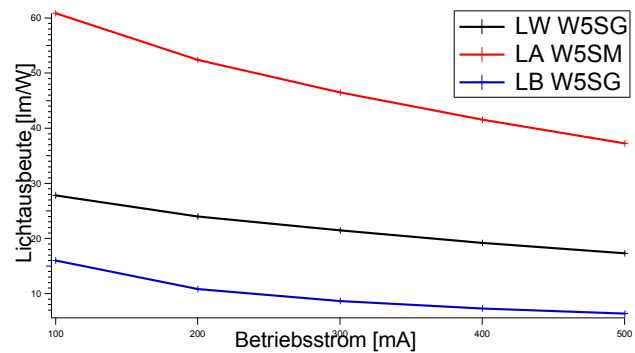


Abbildung 4: Lichtausbeuten der LEDs in Abhängigkeit vom Betriebsstrom

sich mit zunehmendem Strom zu kürzeren Wellenlängen. Die rötliche LED (LA W5SM) zeigt ein gegensätzliches Verhalten, ihre Peakwellenlänge verschiebt sich zu längeren Wellenlängen. Gemeinsam ist den beiden monochromatischen LEDs, dass sich deren

Halbwertsbreiten mit steigendem Strom vergrößern. Größere Stromdichten

Strom in mA	LW W5SG		LA W5SM		LB W5SG	
	Peakwellenlänge in nm	Halbwertsbreite in nm	Peakwellenlänge in nm	Halbwertsbreite in nm	Peakwellenlänge in nm	Halbwertsbreite in nm
100	460,4	23,88	626,9	19,6	462,6	25,15
200	459,3	23,6	626,6	20,23	461,3	25,8
300	458,7	23,5	627,7	20,57	460,7	26,47
400	458	23,81	627,5	21,04	460	27,06
500	458	23,52	627,9	21,42	461,1	27,67

Tabelle 4: Vergleich der Peakwellenlänge und Halbwertsbreite in Abhängigkeit vom Betriebsstrom

führen zu höheren Temperaturen des LED-Chips und damit zu einer Verbreiterung der Emission. Ein Trend für das Verhalten der Halbwertsbreite der weißen LED (LW W5SG) lässt sich nicht ausmachen.

Die dazugehörigen Spektren dieser LEDs zeigt die Abbildung 6. Die normalisierten Spektren, in denen die Verschiebung der Peakwellenlänge besser sichtbar wird, sind in Abbildung 5 dargestellt.

Die Abstrahlcharakteristiken der LEDs wurden ebenfalls untersucht. Diese entsprechen für alle untersuchten LEDs nahezu dem Lambert-Strahler. Als Beispiel dient hier die Abbildung 7 für die weiße LW W5SG bei 500 mA.

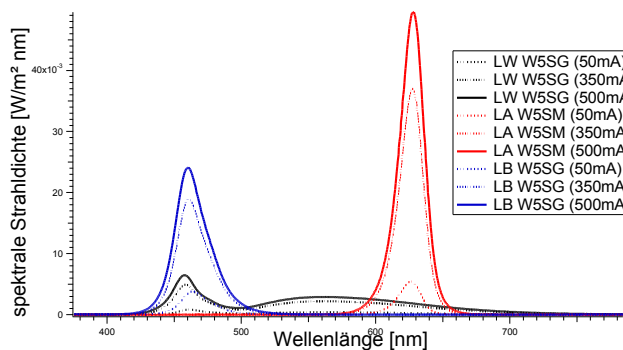


Abbildung 5: Spektren der LEDs bei verschiedenen Betriebsströmen

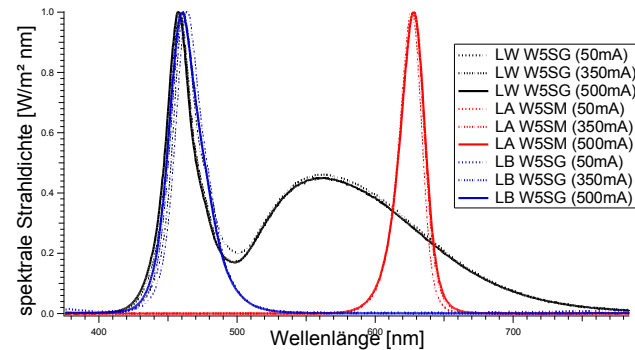


Abbildung 6: Normalisierte Spektren der LEDs bei verschiedenen Betriebsströmen

In der Abbildung 8 befinden sich die LED Spektren in Abhängigkeit des Beobachtungswinkels. Mit zunehmendem Theta-Winkel verändert sich die spektrale Zusammensetzung der emittierten Strahlung. Die spektrale Strahldichte der Peakwellenlänge nimmt deutlich stärker ab als die spektrale Strahldichte der Emission des Lumineszenzfarbstoffs. Die normalisierte

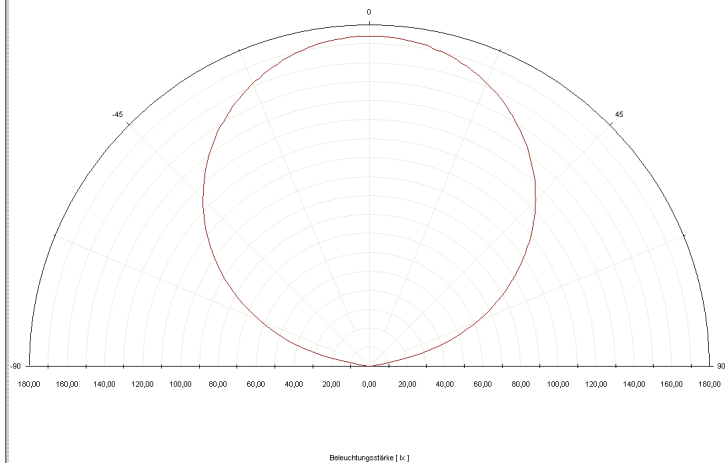


Abbildung 7: Radiale Darstellung der Abstrahlung (I=500 mA) (LED LW W5SG)

Abbildung 10 zeigt dies besonders deutlich. Die Spektren der blauen LED LB W5SG (Abbildung 9) und der rötlichen LED LA W5SM (Abbildung 11) zeigen, wie bereits bei der weißen LED LW W5SG, dass sich weder die Peakwellenlänge noch die Halbwertsbreite stark ändern.

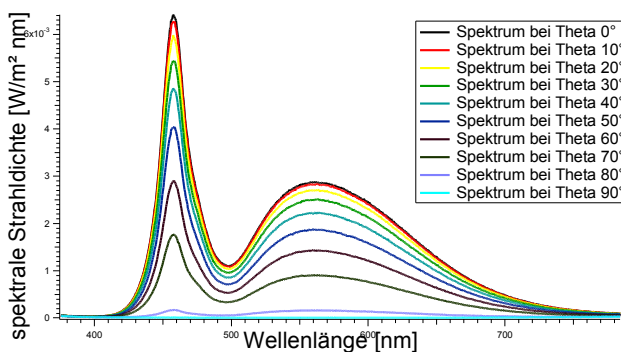


Abbildung 8: Spektren der LED LW W5SG in Abhängigkeit des Winkels Theta

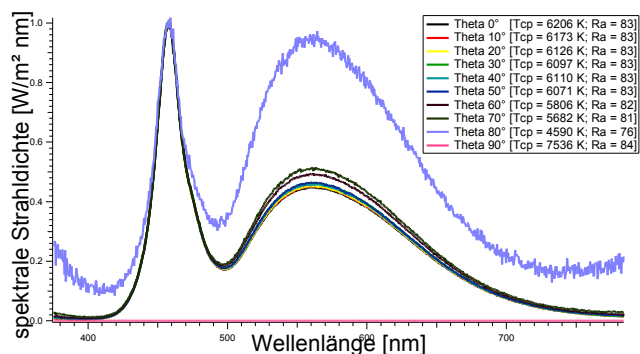


Abbildung 10: Normalisierte Spektren der LED LW W5SG in Abhängigkeit des Winkels Theta

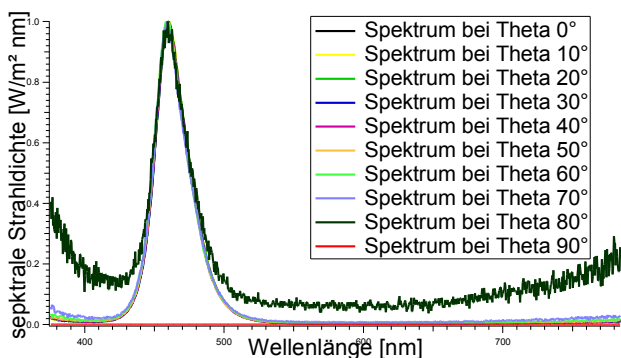


Abbildung 9: Normalisierte Spektren der LED LB W5SG in Abhängigkeit vom Winkel Theta

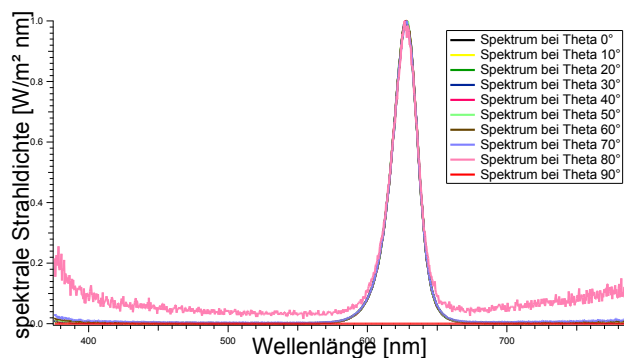


Abbildung 11: Normalisierte Spektren der LED LA W5SM in Abhängigkeit vom Winkel Theta

Fazit und Ausblick

An weiße LEDs für die Allgemeinbeleuchtung müssen hohe Anforderungen im Hinblick auf die spektrale Zusammensetzung gestellt werden, damit qualitativ hochwertiges Licht für Beleuchtungsanwendungen entstehen kann. Wie dieser Beitrag zeigt, hängt die spektrale Zusammensetzung des emittierten Lichts weißer LEDs (in diesem Fall die *OSRAM Golden DRAGON® LW W5SG*) bzw. LEDs, die auf dem Prinzip der Anregung eines Lumineszenzfarbstoffes beruhen, vom Betrachtungswinkel ab. Um unerwünschte Effekte, wie die Änderung der Farbtemperatur in Abhängigkeit des Betrachtungswinkels, möglichst gering zu halten, bedarf es der genauen Untersuchung der Abstrahlcharakteristiken von LEDs. Mit dieser Kenntnis kann schon bei der Planung von Beleuchtungen darauf geachtet werden, diese Effekte so gering wie möglich zu halten. Auf der anderen Seite können mit diesem Wissen möglicherweise in Zukunft LEDs entwickelt werden, die diese Effekte verringern oder gar vermeiden. Die Änderung der spektralen Zusammensetzung der emittierten Strahlung ist bei monochromatischen LEDs, aufgrund ihres anderen Aufbaus, nicht zu beobachten.

Wie gezeigt, ist die Nutzung eines Spektrometers zur Untersuchung und zur Bestimmung wesentlicher photometrischer Daten von LEDs unerlässlich. Der Einsatz eines Spektrometers in Verbindung mit einem Goniometer ergibt ein machtvoll Instrument, um eine Vielzahl von möglichen photometrischen Messungen an LEDs vorzunehmen.

Der erste Teil dieses Beitrags zeigt, dass die Spektren der hier untersuchten LEDs eine Abhängigkeit von der Stromstärke besitzen. Die Auswirkungen verschiedener Stromstärken auf die Abhängigkeit vom Betrachtungswinkel mittels des Goniospektralradiometer zu untersuchen, könnte Gegenstand zukünftiger Versuche sein.

Danksagung

Ich möchte mich bei allen bedanken, die mich in meiner Studienarbeit, aus der dieser Beitrag hervorgegangen ist, wissenschaftlich begleitet und unterstützt haben. Insbesondere möchte ich mich für die Betreuung der Studienarbeit bei Prof. Kaase, Prof. Völker und Dipl.-Ing. Druwe bedanken.

Literaturverzeichnis

DENA, 2008: *Initiative Energieeffizienz Private Haushalte: Einfach Strom sparen: Ich will mehr Licht für mein Geld*. URL

http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Download/Dokumente/Publikationen/Strom/IEE/IEE_BR_Beleuchtung08_32.pdf

Norm CIE 127 - 2007: *Measurement of LEDs (2nd ed)*

Kleiner, K., 2007: *Shades of success*. In: *nature*, Nr. 447, S. 766–767.

URL doi:10.1038/447766a

Schubert, E. F., 2006: *Light-Emitting-Diodes-dot-org*. URL <http://www.lightemittingdiodes.org>

Steele, R. V., 2007: *The story of a new light source*. In: *nature photonics* 1, Nr. 1, S. 25–26.

URL doi:10.1038/nphoton.2006.44