

Dissertation

Irina Santourian

LED-basierte Strahlungsquellen für die metrologische Anwendung in der Gonioreflektometrie

ISSN 2941-1297
ISBN 978-3-944659-52-7

DOI 10.7795/110.20250819

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Dissertationen

PTB-Diss-20

Braunschweig, September 2025

Irina Santourian

**LED-basierte Strahlungsquellen für
die metrologische Anwendung in
der Gonioreflektometrie**

ISSN 2941-1297

ISBN 978-3-944659-52-7

DOI 10.7795/110.20250819

Empfohlene Zitierweise/recommended citation

Santourian, I., 2025. *LED-basierte Strahlungsquellen für die metrologische Anwendung in der Gonioreflektometrie*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig. Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt. PTB-Bericht Diss-20. ISBN 978-3-944659-50-3. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.7795/110.20250819>

Impressum:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
ISNI: 0000 0001 2186 1887

Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Telefon: (05 31) 592-93 21
Telefax: (05 31) 592-92 92
www.ptb.de

LED-basierte Strahlungsquellen für die metrologische Anwendung in der Gonioreflektometrie

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades einer Doktorin

der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

genehmigte Dissertation

von Irina Santourian

aus Tbilisi

1. Referent: Prof. Dr. Stefan Kück

2. Referent: Prof. Dr. Andreas Waag

Eingereicht am: 09.05.2025

Disputation am: 16.07.2025

Druckjahr: 2025

Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig,
Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit bestätige ich, Irina Santourian, dass die vorliegende Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades Doktorin rer. nat. von mir selbstständig und unter Verwendung der angegebenen Quellen und Materialien verfasst wurde.

Irina Santourian
Braunschweig, den 25.04.2025

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde in der Zeit von März 2018 bis Oktober 2024 an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) unter Einbeziehung der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig angefertigt.

In diesem Rahmen möchte ich mich herzlich bei allen Personen in meinem wissenschaftlichen und privaten Umfeld für die Unterstützung bei der Realisierung dieser Arbeit bedanken. Mein besonderer Dank gilt dabei meinem Doktorvater und Erstgutachter Prof. Dr. Stefan Kück für die Bereitstellung des interessanten Themas und die eigenständigkeitsfördernde Betreuung. Auch möchte ich mich bei meinem Zweitgutachter Prof. Dr. Andreas Waag für die Übernahme des Zweitgutachtens und die anregenden Gespräche bedanken. Ein tief empfundener Dank gilt meinem PTB-Mentor Dr. Alfred Schirmacher, der mich als junge Wissenschaftlerin unterstützt, gefordert und gefördert hat. Ihm verdanke ich persönliches wie auch wissenschaftliches Wachstum. Außerdem möchte ich mich bei meinem disziplinarischen Vorgesetzten Dr. Stefan Winter für den gewährten Freiraum und die inspirierenden Ideen bedanken. Mein Dank gilt außerdem Dr. Tatjana Quast, die mir ein motivierendes Vorbild ist, die vorliegende Arbeit kontinuierlich unterstützt hat und immer ein offenes Ohr für mich hatte. Natürlich gilt auch ein großer Dank meinem direkten Kollegen und besten Büronachbarn Sven Teichert für die guten Ratschläge, Tipps und die Unterstützung während dieser Zeit. Bei Kai-Olaf Hauer möchte ich mich für die tatkräftige Unterstützung im Labor und die geliehene Muskelkraft bedanken, wenn sie mir mal gefehlt hat. Marcel Pastuschek danke ich für die Hilfe beim Programmieren und Einbinden zahlreicher Messgeräte in das Messprogramm sowie die netten Gespräche. Bedanken möchte ich mich zudem bei Herrn Hünerhoff für die anregenden Diskussionen, bei Nadja Jordan für die hilfsbereite Unterstützung, bei Eva Velke und Michael Esslinger für das Ausleihen und Raussuchen der passenden Geräte, Gegenstände und des optischen Zubehörs, bei Jinglin Fu für den Austausch unter Doktoranden. Auch bei den Mechanikern Jörn Hauffe, Marcel Jannik, Morten John und Henri Ganz sowie den Elektronikern Stefan Pendsa, Rouven Krake und Malte Schneeberg möchte ich mich herzlich für die fachkompetente Beratung und Umsetzung meiner Vorstellungen im Rahmen der Doktorarbeit bedanken. Außerdem danke ich allen Mitarbeitenden der Fachbereiche 4.5 und 4.1 sowie darüber hinaus für ein kollegiales und freundliches Miteinander und die angenehme Arbeitsatmosphäre. Auch danke ich der PTB herzlich für die Möglichkeit, meine Promotion in einem so spannenden und professionellen Umfeld durchführen zu können. Die Zusammenarbeit, die inspirierende fachliche Begleitung sowie das wertschätzende und offene Arbeitsklima und die hervorragenden Bedingungen haben meine Arbeit in jeder Hinsicht bereichert.

Nicht zuletzt gilt ein besonderer Dank meinen Freunden und meiner Familie für ihre Unterstützung und Motivation während der gesamten Zeit. Hierzu zählen meine Schul- und Studienfreunde, Freunde, die ich in Braunschweig kennenlernen durfte, sowie meine neuen Kolleginnen und Kollegen von Q.3. Durch

eure Motivation und kreativen Ansätze hatte ich immer neue Kraft und Mut, diese Arbeit voranzutreiben. Insbesondere will ich mich bei meinen Eltern Ekaterine und Michael ganz herzlich für die bedingungslose Liebe, eure Unterstützung und die Ermöglichung meines Studiums bedanken – ich liebe euch. Zuletzt will ich meinem Bruder Aleksandr meinen Dank dafür aussprechen, dass er mich auch in schwierigen Situationen immer zum Lachen bringt und zeigt, dass so alles einfacher funktioniert. Ihr alle habt diese Arbeit und meinen Traum erst mit eurer Unterstützung möglich gemacht – Danke!

Kurzfassung

In den letzten Jahren kamen Leuchtdioden (LEDs) zunehmend in unzähligen Anwendungsgebieten zum Einsatz [1 bis 3]. Mit der kontinuierlichen Verbesserung ihrer Herstellungstechnologie, der Produktion neuer Halbleiterverbindungen, der Materialqualität, der chemischen Reinheit, der elektrischen Leitfähigkeit und der optischen Transparenz der verwendeten Optik werden die zugänglichen Spektralbereiche erweitert und die Wirkungsgrade der LEDs stetig gesteigert [4, 5]. Dadurch dringen LEDs in neue Anwendungsbereiche vor, wie z. B. die Ablösung konventioneller ultravioletter Strahlungsquellen zur Desinfektion von Wasser oder zur Aushärtung von Materialien [3, 4].

Damit steigt auch das Interesse an dem Einsatz von LEDs als moderne Strahlungsquellen für metrologische Anwendungen [5 bis 8]. Ihre Eignung als Strahlungsquelle für Reflexionsmessungen wird ausgiebig in dieser Arbeit durch den Aufbau, die Charakterisierung und die Integration eines LED-Kugelstrahlers (LED-*Sphere Radiator*, LED-SR) in das robotergestützte Gonioreflektometer der PTB untersucht [9 bis 12]. Die wesentlichen Eigenschaften des LED-SR wie seine spektrale Abdeckung, die zeitliche Stabilität und die Homogenität des Strahlungsfeldes werden vorgestellt. Zudem werden seine Einbindung in die Messapparatur und umfassende Vergleichsmessungen mit dem typischerweise verwendeten Halogen-Kugelstrahler (Halogen-*Sphere Radiator*, Halogen-SR) gezeigt.

Durch den konzipierten Spektralbereich und damit einhergehende höhere Strahlungsleistung des LED-SR an der Grenze zwischen dem sichtbaren und dem UV-A (360 nm – 430 nm) wird die Genauigkeit der Messung, genauer die Standardabweichung, in diesem Spektralbereich verbessert. Eine zugehörige detaillierte Messunsicherheitsbetrachtung für Messungen des absoluten spektralen Strahldichtefaktors nach dem „Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)“ des Bureau International des Poids et Mesures [13] wird dargestellt und exemplarisch anhand von drei Keramikproben präsentiert. Der Einfluss verschiedener systematischer und statistischer Unsicherheitsquellen und deren Beiträge werden ausführlich diskutiert. Neben der Verwendung des LED-SR zur Messung des absoluten Strahldichtefaktors werden in der vorliegenden Arbeit die Fluoreszenzeigenschaften von diffus reflektierenden Proben sowie zuverlässige polarisationsaufgelöste Messungen bei Wellenlängen unterhalb von 430 nm betrachtet. Diese konnten erstmals aufgrund des günstigen Signal-Rausch-Verhältnisses des LED-SR untersucht und erörtert werden. Es wird auf weiterführende Untersuchungen in der Verwendung des LED-SR eingegangen, wie z. B. Messungen im gepulsten Betrieb sowie die Modularität und Erweiterung des LED-SR in andere Spektralbereiche wird aufgezeigt. Zusammenfassend wird in dieser Arbeit ein detaillierter Überblick über den entwickelten LED-SR als neue Strahlungsquelle für das Gonioreflektometer gegeben und dessen Einsatz ausgiebig beschrieben, geprüft und ausgewertet.

Abstract

In recent years, light-emitting diodes (LEDs) increasingly have been used in a variety of applications [1 - 3]. With the continuous improvement of manufacturing technology, production of new semiconductor compounds, material quality, chemical purity, electrical conductivity and optical transparency, the accessible spectral ranges and their efficiencies continue to expand [4, 5]. As a result, LEDs are constantly entering new areas of application, such as the replacing of conventional ultraviolet radiation sources for the disinfection of water or the curing of materials [3, 4].

With this, the interest in the utilization of LEDs as modern radiation sources for metrological applications increases [5 – 8]. Their suitability as a radiation source for reflectance measurements was examined in this work by the construction, characterization, and integration of an LED sphere radiation source (LED-SR) into the robot-based gonireflectometer at PTB [9 - 12]. The performance of the LED-SR with respect to its essential properties such as the spectral range and coverage, the temporal stability, and the homogeneity of the radiation field is presented. It is shown that the LED-SR was integrated into the apparatus and validation measurements were carried out and evaluated in comparison to measurements with the typically used halogen sphere radiator (Halogen-SR). Due to its designed spectral range (360 nm – 430 nm) at the border between the visible and the UV-A spectral range, the LED-SR is not only well suited for many applications in diffuse reflectometry, but also improves the accuracy in this spectral range through its higher radiant power. An associated detailed derivation of the uncertainty budget according to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)” provided by the Bureau International des Poids et Mesures [13] for measurements of the absolute spectral radiance is determined. This is demonstrated exemplarily based on three ceramic samples, whereby the influence of various systematic and statistical sources of uncertainty and their contributions are also discussed in detail. In addition to the use of the LED-SR for absolute radiance factor measurements, the investigations of the fluorescence properties of diffuse reflecting samples as well as reliable polarization-resolved measurements at wavelengths below 430 nm, which could be performed for the first time due to the beneficial signal-to-noise ratio of the LED-SR, are presented. Further investigations of the use of the LED-SR are discussed, such as measurements in pulsed mode, and the modularity and extension of the LED-SR into other spectral ranges is demonstrated. In summary, this thesis provides a detailed overview of the developed LED-SR as a new radiation source for the gonireflectometer and its application is extensively described, verified and evaluated.

Inhaltsverzeichnis

Eigenständigkeitserklärung	I
Danksagung	II
Kurzfassung	IV
Abstract	V
Abkürzungsverzeichnis	IX
Eigene Veröffentlichungen	XII
1 Einleitung, Motivation und Zielsetzung	1
2 Theoretische Grundlagen und Stand der Forschung	3
2.1 Strahlungsquellen	3
2.1.1 Temperaturstrahler	3
2.1.1.1 Halogenlampen	5
2.1.2 Leuchtdioden	6
2.1.2.1 Geschichte und Entwicklung der Leuchtdioden	8
2.1.2.2 LED-Alterung und Degradationsmechanismen	9
2.1.2.3 Gegenüberstellung traditionelle UV-Strahlungsquellen und UV-LEDs	13
2.2 Diffuse Reflexion und der spektrale Strahldichtefaktor (SRF) $\beta(\lambda)$	15
2.2.1 Das Gonioreflektometer der PTB	16
2.2.2 Spektraler Strahldichtefaktor und seine Messung	18
3 Ergebnisse und Diskussion	21
3.1 Konstruktion und Charakterisierung eines LED-Kugelstrahlers	21
3.1.1 Konstruktion des LED-SR	22
3.1.2 Charakterisierung des LED-SR	31
3.1.2.1 Spektrale Verteilung	31
3.1.2.2 Stabilität und Alterung	32
3.1.2.3 Reflexionseinsatz und Homogenität des Strahlungsfeldes	35
3.2 Messunsicherheitsbetrachtung	40
3.2.1 Einflussgrößen der Messunsicherheitsbetrachtung des absoluten spektralen SRF	40

3.3	Validierungsmessungen	53
3.3.1	Auswertung und Diskussion.....	55
3.3.1.1	Spektrale Wellenlängenunsicherheit	62
3.3.2	Weiterführende Untersuchungen und alternative Messaufgaben für den Einsatz des LED-SR	64
3.3.2.1	Fluoreszenzbetrachtung.....	64
3.3.2.2	Polarisationsuntersuchungen.	67
3.3.2.3	Strahlungssensitive Proben.....	70
3.3.2.4	Gepulster Betrieb des LED-SR.....	74
3.3.2.5	LED-SR in anderen Spektralbereichen.....	78
4	Zusammenfassung und Ausblick	80
<hr/>		
Anhang	XIV
I	Datenblatt der 400 W-Quarz-Halogenlampe von OSRAM GmbH.....	XIV
II	Datenblätter der verwendeten LEDs	XXII
II.i	Roithner Laser Technik GmbH und Intelligent LED Solutions und LedEngin Inc	XXII
II.ii	Nichia Corporation NVSU233-Serie (U 365, U 385, U 405)	LIII
II.iii	LEDs für andere Spektralbereiche	LXXVII
III	Verwendete industrielle Messgeräte und Messkomponenten	CXXVIII
III.i	Spektrometer	CXXVIII
III.ii	Detektortypen am Gonioreflektometer.....	CXXVIII
III.iii	Thermo-Elektrische-Kühlvorrichtung (TEC) des LED-SR.....	CXXVIII
III.iv	SBIG STF-8300.....	CXXIX
III.i	Zurich Instruments UHFLI Lock-In Verstärker mit Boxcar Option	CXXIX
III.ii	Cary 5000 UV-Vis-NIR Spektralphotometer mit diffusem Reflexionszubehör	CXXX
IV	Ergänzende und Vertiefende Messdaten und Grafiken.....	CXXXI
IV.i	Bestrahlungsstärke der verwendeten LEDs.....	CXXXI
IV.ii	Charakterisierung der verbesserten LED-SR Version.....	CXXXII
IV.iii	Messdaten des absoluten SRF mit Messunsicherheitsbetrachtung.....	CXXXIII
IV.iv	Gepulster Betrieb des LED-SR	CXXXV

Abbildungsverzeichnis	CXXXVIII
Tabellenverzeichnis.....	CXLIII
Literaturverzeichnis.....	CXLIV

Abkürzungsverzeichnis

a. u.	Arbitrary Unit
(Al,Ga,In)N III-Nitride	Halbleiterverbindung aus den entsprechenden Elementen der III. Hauptgruppe und Stickstoff
BaSO ₄	Bariumsulfat
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
ca.	circa
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i> Ladungsgekoppeltes Halbleiterelement
CMC	<i>Calibration and Measurement Capabilities</i> Kalibrierungs- und Messkapazitäten
d	Tag
DOP	<i>Degree of Polarisation</i> Polarisationsgrad
EU	Europäische Union
eV	Elektronen Volt
FWA	<i>Fluorescent whitening agents</i> Fluoreszierende Aufheller
GaAs	Galliumarsenid
GaAsP	Galliumarsenidphosphid
GaP	Galliumphosphid
GaN	Galliumnitrid
Ge	Germanium
GUM	<i>Guide to the expression of uncertainty in measurement</i> Leitfaden zur Angabe der Messunsicherheit
h	Stunde
Halogen-SR	Halogen-Sphärenstrahler/ Halogen-Kugelstrahler
InGaS	Indiumgalliumarsenid
IR	Infrarot
inkl.	inklusive
LED	Licht Emittierende Dioden
LED-SR	<i>LED-Sphere Radiator</i> LED-Sphärenstrahler/ LED-Kugelstrahler
MBE	Molekularstrahlepitaxie
min	Minute
MOVPE	<i>Metal organic chemical vapor phase epitaxy</i>

	Metallorganische Gasphasenepitaxie
MOCVD	<i>Metal organic chemical vapour deposition</i> Metallorganische chemische Gasphasenabscheidung
nm	Nanometer
NIR	Nahinfrarot
OBA	<i>Optical Brighteners Agent</i> Optische Aufheller
PWM	Pulsweitenmodulation
PID-Regler	<i>Proportional-integral-derivative Controller</i> Proportional-Integral-Differential-Regler
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
PTFE	Polytetrafluorethylen
PRD	<i>Perfectly reflecting diffuser</i> Perfekt reflektierender Diffusor/Vollkommen mattweißer Körper
s	Sekunde
s.	siehe
sog.	Sogenannt
SI	Internationales Einheitensystem (französisch <i>Système international d'unités</i>)
Si	Silizium
SMD	<i>Surface-mounted device</i> Oberflächenmontiertes Bauelement
SNR	<i>Signal-to-noise ratio</i> Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SRV)
SR	<i>Sphere Radiator</i> Kugelstrahler
SRF	<i>Spectral radiance factor</i> Strahldichtefaktor
SRH	Shockley-Read-Hall
SRV	<i>Signal-to-noise ratio (SNR)</i> Signal-zu-Rausch-Verhältnis
TEC	<i>Thermo-electrical cooling</i> Thermoelektrische Kühlung
u. a.	unter anderem
UV	Ultraviolett
vgl.	vergleiche
VIS	<i>visible</i> sichtbar

z. B. zum Beispiel

Weitere Abkürzungen entsprechen internationalen Festlegungen (Internationales Einheitensystem, DIN 1304, ISO/IEC 80000).

Eigene Veröffentlichungen

Teilergebnisse der vorliegenden Arbeit wurden bereits veröffentlicht in:

Wissenschaftliche Artikel:

Santourian, I., Quast, T. u. Schirmacher, A.: Uncertainty budget for PTB's gonioreflectometers and ways to improve it in the short VIS spectral range. *Metrologia* 59 (2022) 2, S. 25004

Santourian, I., Quast, T., Teichert, S., Hauer, K.-O. u. Schirmacher, A.: Novel LED-based radiation source and its application in diffuse reflectometry and polarization measurements. *NEWRAD 2021 conference Proceedings. Journal of Physics: Conference Series* 2149 (2022) 1, S. 12010

Mähringer, A., Döblinger, M., Hennemann, M., Gruber, C., Fehn, D., Scheurle, P. I., Hosseini, P., Santourian, I., Schirmacher, A., Rotter, J. M., Wittstock, G., Meyer, K., Clark, T., Bein, T. u. Medina, D. D.: An Electrically Conducting Three-Dimensional Iron-Catecholate Porous Framework. *Angewandte Chemie (International ed. in English)* 60 (2021) 33, S. 18065–18072

Santourian, I., Teichert, S., Hauer, K.-O., Quast, T. u. Schirmacher, A.: Further development of an LED-based radiation source for goniometric spectral radiance factor measurements. *Lux junior 2021: 15. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs*, 04. – 06. Juni 2021, Ilmenau: Tagungsband (2021), S. 255-263

Santourian, I., Teichert, S., Hauer, K.-O. u. Schirmacher, A.: Investigation of the suitability of high-power LEDs for the use as radiation source for PTB's gonioreflectometer. *Lux junior 2019: 14. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs*, 06. - 08. September 2019, Ilmenau: Tagungsband (2019), S. 43-50

Quast, T., Santourian, I., Teichert, S., Hauer, K.-O. u. Schirmacher, A.: Polarization effects in diffuse reflection measurements at the transition between the UV-A and VIS spectral range. *NEWRAD 2021 conference Abstract Booklet*

Santourian, I., Quast, T., Teichert, S., Hauer, K.-O. u. Schirmacher, A.: Development, implementation and validation of a high-power LED-based radiation source for goniometric spectral radiance factor measurements. *NEWRAD 2021 conference Abstract Booklet*

Schönherr, M. I., Scheurle, P. I., Frey, L., Martínez-Abadía, M., Döblinger, M., Mähringer, A., Fehn, D., Gerhards, L., Santourian, I., Schirmacher, A., Quast, T., Wittstock, G., Bein, T., Meyer, K., Mateo-Alonso, A. u. Medina, D. D.: An electrically conducting 3D coronene-based metal-organic framework. *Journal of materials chemistry. A* 12 (2024) 17, S. 10044–10049

Teilnahme an internationalen Konferenzen, nicht-rezensierte Veröffentlichungen und Präsentationen:

Santourian, I., Teichert, S., Hauer, K.-O. u. Schirmacher, A.: Untersuchung der Eignung von high-power-LEDs für den Einsatz als Strahlungsquellen für das Gonioreflektometer der PTB. [Poster]. Lux junior 2019 - 14. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs 2019

Santourian, I., Teichert, S., Hauer, K.-O., Quast, T. u. Schirmacher, A.: Weiterentwicklung einer LED-basierten Strahlungsquelle für goniometrische spektrale Strahldichtefaktormessungen. [Vortrag]. Lux junior 2021 - 15. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs 2021

Santourian, I., Teichert, S., Hauer, K.-O., Quast, T. u. Schirmacher, A.: Development, implementation and validation of a high-power LED-based radiation source for goniometric spectral radiance factor measurements. [Poster]. NEWRAD 2021

Santourian, I., Teichert, S., Schirmacher, A., Quast, T. u. Hauer, K.-O.: Construction and characterization of a high-power UV-LED module as radiation source for goniometric spectral radiance factor measurements. [Vortrag]. ICULTA - The International Conference on UV LED Technologies & Applications 2021

Santourian, I., Teichert, S., Hauer, K.-O. u. Schirmacher, A.: Suitability of high-power LEDs as a radiation source for gonioreflectometer measurements. [Poster]. International Summer School on Metrology 2019

Quast, T., Santourian, I., Hauer, K.-O. u. Schirmacher, A.: Polarization effects in diffuse reflection measurements at the transition between the UV-A and VIS spectral range. [Poster]. NEWRAD 2021.

Santourian, I., Teichert, S., Hauer, K.-O., Quast, T. u. Schirmacher, A.: High-power LED-based radiation source for goniometric spectral radiance factor measurements. [Poster]. Metrological Summer School 2020 - Precision Experiments in Theory and Application 2020

Santourian, I.: Development of a high-power LED-based radiation source for SRF measurements. PhD Candidate Winter Semester Talks 2019/2020. Braunschweig International Graduate School of Metrology B-IGSM

Santourian, I.: High-power LED-based radiation source for SRF measurements. PhD Candidate Winter Semester Talks 2020/2021. Braunschweig International Graduate School of Metrology B-IGSM

Santourian, I. u. Schirmacher, A.: Information on fluorescence measurements in goniometric geometry 45°:0°. CCPRK5-2017-Key Comparison. 2021

TU Braunschweig | Magazin: Forschung: Standardweiß von ultraviolett bis infrarot. Irina Santourian aus der Graduiertenschule B-IGSM im Porträt, 2020

1 Einleitung, Motivation und Zielsetzung

Das Anwendungsgebiet lichtemittierender Dioden (LED) ist in den vergangenen Jahren erheblich gestiegen [1, 2]. Sie finden nicht nur Verwendung in der Allgemeinbeleuchtung, sondern werden auch zunehmend in der Messtechnik eingesetzt [3]. Industriell gibt es eine Vielzahl an Messgeräten, bei welchen anstelle von herkömmlichen Strahlungsquellen wie Temperaturstrahlern und Entladungslampen zunehmend LEDs als Strahlungsquellen Verwendung finden. Beispiele dafür sind das maschinelle Sehen [14], Messgeräte in der Medizintechnik wie z. B. das zur Bestimmung der Sauerstoffsättigung des Blutes verwendete Pulsoximeter [15] und industriell genutzte Messgeräte wie Polarimeter [16]. Vorzüge von LEDs sind unter anderem ihre lange Lebensdauer und geringe Kosten, ihre Effizienz und ihre hohe Strahlungsleistung [1 bis 3]. Durch den Einsatz und die Herstellung neuer Halbleiterverbindungen in der LED-Technologie können zudem weitere Spektralbereiche erschlossen werden. Dies ist vermehrt im UV-Bereich durch die Herstellung von UV-Emittern auf der Basis von Gruppe III-Nitriden (Al,Ga,In)N zu beobachten [17, 18]. Aufgrund der genannten Vorzüge setzen sie sich als alternative Strahlungsquellen mehr und mehr gegenüber konventionellen UV-Strahlern durch. So werden zunehmend LEDs für die Aushärtung von Klebstoffen und für die Oberflächen-, Luft- und Wasserdesinfektion eingesetzt [18 bis 21].

Durch diesen großen und stetig steigenden Bedarf an LEDs und ihrer Anwendung in nahezu allen Lebensbereichen wächst auch seitens der Metrologie die Bestrebung dieser neuen Anforderung gerecht zu werden. Ansätze zur LED-Charakterisierung, -Kalibrierung und -Rückführung auf Basiseinheiten werden entwickelt [5]. Damit einhergehend steigt auch das Interesse daran, LEDs als moderne Strahlungsquellen für metrologische Anwendungen zu verwenden [5 bis 8]. Auch neu eingeführte staatliche Richtlinien, wie z. B. von der EU für energiesparende Strahlungsquellen in der Allgemeinbeleuchtung [22 bis 24] führen dazu, dass viele derzeit in der Messtechnik eingesetzte Strahlungsquellen nur noch als Sonderbeleuchtung erhältlich sind. Wie lange der Markt für die Herstellung solcher Beleuchtungsmittel profitabel bleibt und weiterhin bedient werden wird, ist unklar. Auch aus diesem Grund ist es zeitgemäß und notwendig zu prüfen, ob LEDs als Strahlungsquellen für metrologische Anwendungen die notwendigen Anforderungen erfüllen.

Im Zentrum dieser Arbeit steht die Untersuchung der Eignung einer LED-basierten Strahlungsquelle für die metrologische Anwendung in der Gonioreflektometrie. Hierzu sollte ein LED-Kugelstrahler (*LED-Sphere Radiator*, abgekürzt LED-SR) entwickelt, charakterisiert und anhand exemplarischer Messungen validiert werden. Durch den Einsatz von LEDs mit Emissionsmaxima im Nah-UV-Spektralbereich (< 420 nm) wurde beabsichtigt, ein im Vergleich zum derzeit eingesetzten Halogenstrahler höheres und stabileres Signal im Übergangsbereich vom sichtbaren zum UV-Strahlungsbereich zu erzielen. Die Messgenauigkeit für das robotergestützte Gonioreflektometer der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) sollte dadurch verbessert und eine damit einhergehende detaillierte Messunsicherheitsbetrachtung vorgenommen werden. Der Auswertungsalgorithmus sollte

angepasst werden, um eine Analyse von Messdaten bei Verwendung unterschiedlicher Strahlungsquellen flexibel zu ermöglichen. Dies beinhaltet auch die Berücksichtigung der spezifischen Besonderheiten der Strahlungsquellen selbst sowie ggf. ihren Einfluss auf die Messung und die zu untersuchende Probe zu analysieren und geeignet in der Auswertung zu berücksichtigen.

Diese Untersuchungen sollen einen Grundstein für den weiteren Ausbau des Einsatzes von LEDs in der Gonioreflektometrie und generell in metrologischen Anwendungen im Bereich der Reflexions- und Transmissionsmessung legen. Perspektivisch kann der konstruierte LED-SR mit LED-Platinen weiterer Spektralbereiche erweitert und eingesetzt werden. Dies soll anhand eines kleinen Exkurses aufgezeigt werden. Es ist davon auszugehen, dass in Zukunft LEDs mit deutlich höheren Strahlungsleistungen und in weiteren Spektralbereichen zur Verfügung stehen werden [25 bis 28]. Diese können dann auf Grundlage dieser Arbeit und basierend auf dem Prinzip des LED-SR eingesetzt werden.

Die Arbeit gliedert sich in drei Teile. Zunächst wird in Kapitel 2 der theoretische Rahmen der Arbeit dargelegt und betrachtet. Relevante Aspekte und Voraussetzungen für das Vorgehen werden erläutert und ein kurzer Überblick über den Stand der Forschung bezüglich der LEDs gegeben. Kapitel 3 umfasst die Ergebnisse und Diskussion. Es behandelt die Konstruktion und Charakterisierung des LED-SR sowie die durchgeführten Messungen und Auswertungen. Im letzten Kapitel 4 der Zusammenfassung und dem Ausblick wird die Eignung von LEDs in goniometrischen Messungen und generell die Relevanz von LEDs in der Metrologie dargestellt.

2 Theoretische Grundlagen und Stand der Forschung

In dieser Arbeit wird die Eignung LED-basierter Strahlungsquellen für die metrologische Anwendung in der Gonioreflektometrie untersucht. Dabei stehen LEDs als moderne Strahlungsquellen sowie die diffuse Reflexionsmessung am Gonioreflektometer der PTB im Zentrum der Betrachtung. In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen sowie der Stand der Forschung dargestellt, die für das Verständnis der durchgeführten Experimente, Messungen und Untersuchungen relevant sind.

2.1 Strahlungsquellen

Eine Vielzahl an verschiedenen Strahlungsquellen fanden und finden Einsatz in der Messtechnik. Sie unterscheiden sich in ihrer Strahlungserzeugung, den dafür notwendigen Materialien, ihrer Leistung, ihren Abmessungen und den strahlungsphysikalisch relevanten Merkmalen. Eine Auswahl der in der Messtechnik gebräuchlichen Strahlungsquellen nach ihren Strahlungseigenschaften ist in [29] und darauf aufbauend in [30] zusammengestellt. Je nach Einsatzbereich und messtechnischer Anforderung ergeben sich unterschiedliche Ansprüche an die Strahlungsquelle. Entscheidend sind vorwiegend die strahlungsphysikalischen Eigenschaften. Dazu zählen die Strahlungsverteilung, der nutzbare Spektralbereich, zeitliche und räumliche Konstanz der Strahlung, ihre Kohärenzeigenschaften, der Polarisationszustand und die Strahlungsleistung. Anhand dieser Parameter können die gebräuchlichen Strahler in Entladungslampen, Temperaturstrahler sowie in Laser und Elektro-Lumineszenzdioden unterteilt werden [30]. Zudem entscheiden oft auch weitere Einflüsse und Faktoren wie die Abmessungen der Strahlungsquelle, das Temperaturverhalten, die elektrische Versorgung, die zeitliche Stabilität der Eigenschaften und die Lebensdauer, ob eine Strahlungsquelle messtechnische Verwendung findet.

Nach diesem allgemeinen kurzen Überblick über Strahlungsquellen und wichtige Klassifizierungsmerkmale wird ein Fokus auf die in dieser Arbeit verwendete und im Vergleich stehende Halogenlampe und die LEDs gelegt.

2.1.1 Temperaturstrahler

Der Schwarze Strahler ist der ideale thermische Strahler. Seine absolute spektrale Strahlungsverteilung wird allein durch seine Temperatur bestimmt. Die austretende Strahlung wird als Schwarzkörper-Strahlung bezeichnet. Der Zusammenhang der spektralen Verteilung und der Temperatur wird durch das Planck'sche Strahlungsgesetz (siehe z. B. [31, 32]) beschrieben. Die Position des Maximums der spektralen Verteilung ist abhängig von der absoluten Temperatur. Bei höheren Temperaturen verschiebt sich das Emissionsmaximum zu kürzeren Wellenlängen (Abbildung 1).

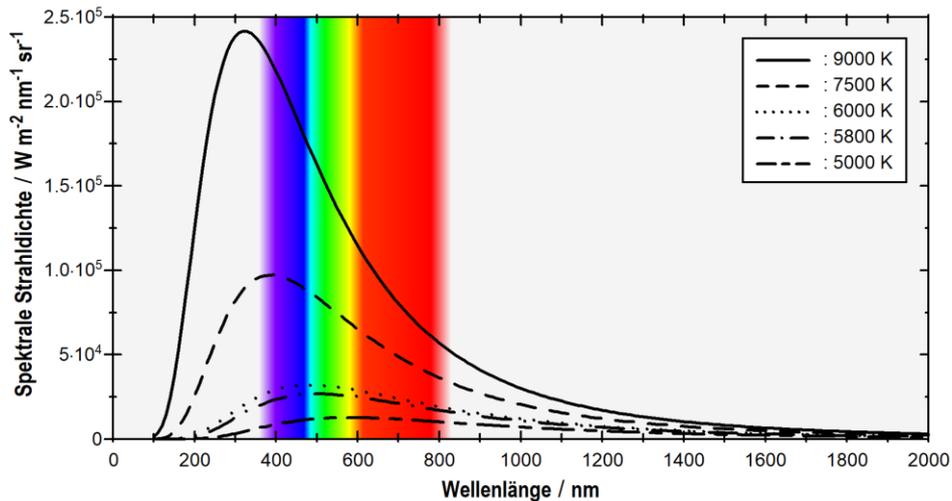


Abbildung 1: Spektrale Strahllichte eines Schwarzen Strahlers bei verschiedenen Temperaturen, berechnet nach dem Planck'schen Strahlungsgesetz mit Darstellung der Spektralfarben im Hintergrund.

Der Schwarze Strahler ist eine Idealisierung und kommt in der Natur nicht vor. Keine bekannte Substanz zeigt über alle Frequenzen hinweg einen idealen Emissionsgrad [33]. Jedoch kann die Sonne näherungsweise als ein Schwarzkörperstrahler betrachtet werden, ebenso wie Plasma im vollständigen thermischen Gleichgewicht. Eine oft gewählte Realisierung, die dem Prinzip eines Schwarzen Strahlers entspricht, erfolgt durch einen Hohlraum; ein Schwarzer Strahler wird deshalb oft auch als Hohlraumstrahler bezeichnet [34]. Der zugrundeliegende Gedanke ist, dass ein geschlossener Hohlraum mit Wänden aus beliebigem nichttransparentem Material, der sich auf einer konstanten Temperatur T befindet, von Schwarzkörper-Strahlung erfüllt ist. Die aus einer kleinen Öffnung des Hohlraums austretende Hohlraumstrahlung entspricht näherungsweise der Strahlung eines Schwarzen Körpers gleicher Temperatur. Angenommen wird dabei u.a., dass die Öffnung hinreichend klein ist und sich das System im thermischen Gleichgewicht befindet. Zudem ist die Übereinstimmung begrenzt durch nicht perfekt intransparentes Material und das Eindringen von Fremdstrahlung. Die so realisierten Hohlraumstrahler [35] dienen als Strahlungsnormale für den sichtbaren und infraroten Spektralbereich [30]. Die technisch und materialbedingt erreichbaren Temperaturen von Hochleistungs-Hohlraumstrahlern wie dem BB3200pg betragen um die 3300 K. Diese realen Strahler zeigen einen spektralen Emissionsgrad, welcher von der Wellenlänge und der Temperatur abhängt. Der Emissionsgrad ε eines beliebigen Strahlers ist eine dimensionslose physikalische Größe zwischen 0 und 1 und wird durch das Verhältnis der von ihm emittierten Strahlung ϕ_R zur Strahlung des Schwarzen Strahlers ϕ_S gleicher Temperatur beschrieben. Somit ist der Emissionsgrad aller technischen Temperaturstrahler kleiner als der des Schwarzen Strahlers.

Als Temperaturstrahler werden alle Strahlungsquellen bezeichnet, die durch Erhitzung Strahlung emittieren, hierzu zählen unter anderem Glüh- und Halogenlampen. Verwendung finden Temperaturstrahler hauptsächlich im sichtbaren und infraroten Bereich, da der Großteil der emittierten Strahlung in diesem Spektralbereich liegt. Dies spiegelt auch einen großen Nachteil der

Temperaturstrahler wider, denn sie erzeugen die Strahlung durch Wärmeenergie und besitzen dadurch einen niedrigen Wirkungsgrad (unter 10 %). Diese Ineffizienz ist einer der Ursachen für die in der Einleitung (Abschnitt 1) erwähnten neu eingeführten Richtlinien in der EU [23, 24] für Strahlungsquellen, welche sich vor allem auf Temperaturstrahler, Glüh- und Halogenlampen beziehen.

Aufgrund seiner Dimensionen und technischen Anforderungen ist ein Hohlraumstrahler als Strahlungsquelle für das Gonioreflektometer ungeeignet. Eine Halogenlampe besitzt als Temperaturstrahler ein ähnliches Spektrum und stellt eine technisch-praktikable Umsetzung dar, weshalb diese auch im Halogen-Kugelstrahler des Gonioreflektometers eingesetzt wird.

2.1.1.1 Halogenlampen

Glühlampen lassen sich in zwei Unterkategorien mit einer Vielzahl an verschiedenen Ausführungen unterteilen, in Glühfadenlampen und Halogenlampen. Sie alle beruhen auf dem Prinzip, dass die Strahlung durch einen stark erhitzten und dadurch glühenden Draht, zunächst aus Wolfram, entsteht.

Der glühende Metalldraht ist von einem mit Gas gefüllten oder luftleeren Glaskolben umgeben. Die Drahtwendel, welche zumeist aus Wolfram besteht (Schmelztemperatur 3653 K), wird durch einen elektrischen Strom erhitzt und zum Glühen gebracht. Während des Betriebs der Glühlampe verdampft das Wolfram der Glühwendel und resublimiert wieder am kühlen Glaskolben. Der Lampenkolben schwärzt sich dadurch mit zunehmender Betriebsdauer. Dieser Prozess führt schließlich zum Bruch der Glühwendel und somit zum Ausfall der Lampe [30].

Die Halogenlampe ist eine spezielle Form der Glühlampe, deren Glaskolben mit einem Halogengas (Brom oder Iod) oder Edelgasen (Argon, Krypton, Xenon) gefüllt ist. Dadurch wird die Lebensdauer des Wolframdrahtes bei gleichzeitiger Energieeinsparung verlängert. Diese Verlängerung der Lebensdauer basiert auf dem Wolfram-Halogen-Kreisprozesses. Die Glühwendel wird bis nahe an den Schmelzpunkt des Wolframs betreiben. Das durch das Erhitzen der Drahtwendel sublimierte Wolfram bildet mit dem Halogen eine gasförmige Verbindung, die im Kolben zirkuliert, solange die Kolbeninnentemperatur über 250 °C liegt. Bei Annäherung des Wolframgases zum Glühdraht zerfällt die Verbindung aufgrund der Temperatur wieder und das metallische Wolfram scheidet sich wieder am Glühdraht ab. Der Glaskolben von Halogenlampen besteht zumeist aus temperaturbeständigem Glas, z. B. Quarzglas und besitzt kleine Abmaße, damit die Kolbeninnentemperatur erreicht wird. Andernfalls scheidet sich das Wolfram auf dem Glaskörper ab und schwärzt diesen [30].

Insgesamt bietet die Halogenlampe gegenüber der Glühfadenlampen unter anderem eine höhere Lichtausbeute und Energieeffizienz bei kompakterer Bauform. Auch eine höhere Farbtemperatur führt dazu, dass die Farbwahrnehmung der des Sonnenlichtes (Tageslicht) ähnelt. Zudem wird durch den Einsatz von Halogenen die Lebensdauer einer solchen Lampe gesteigert. Dennoch ist die Lebensdauer nicht unbegrenzt, denn die Wolframotope setzen sich nicht genau an den freien Stellen der Wendel ab,

sondern bevorzugt an den kältesten Stellen. Diese sind meist am Rand der Wendel. Es entsteht eine sog. Whisker-Struktur mit rauer Oberfläche. Somit kommt es trotz des Kreisprozesses schließlich zum Bruch der Glühwendel und damit zum Ausfall der Lampe.

Glühlampen sind aufgrund ihrer stabilen und reproduzierbaren Strahlungsemission verlässliche Strahlungsquellen. Wie zuvor beschrieben ist der Nachteil von Temperaturstrahlern ihr geringer Wirkungsgrad, denn der größte Teil der zugeführten Energie wird als Wärmestrahlung emittiert. Dadurch gilt dieser Lampentyp für den gesamten Spektralbereich als ineffizient. Das Einsatzgebiet von Glühlampen befindet sich vorrangig im infraroten und sichtbaren Spektralbereich. Beruhend auf der Strahlungserzeugung und der technischen Realisierbarkeit besitzen Glühlampen eine geringe Leistung im UV-Bereich. Dies kann Abbildung 2 entnommen werden, welche die spektrale Bestrahlungsstärke am Beispiel des Halogen-Kugelstrahlers des Gonioreflektometers der PTB mit Darstellung der Spektralfarben im Hintergrund zeigt. Die für den Halogen-Kugelstrahler verwendete 400 W-Halogenlampe Modell 64663 HLX/64664 HLX ist von OSRAM (Datenblatt im Anhang). Sie besitzt Xenon als Füllgas, eine Farbtemperatur von 3250 K/3500 K und eine durchschnittliche Lebensdauer von 50 h/150 h. Aufgrund der Wärmeentwicklung wird eine Wasserkühlung der Kugelwand benötigt, welche diese auf ca. 45 °C temperiert.

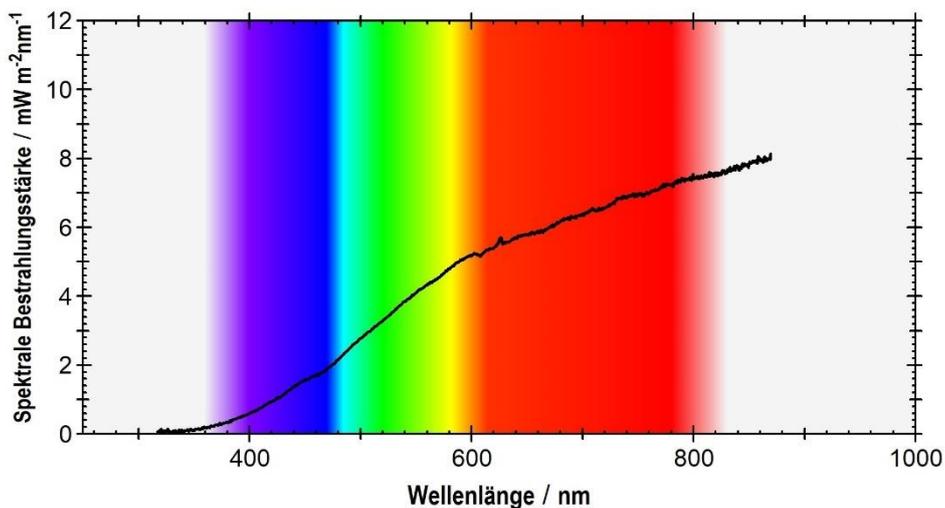


Abbildung 2: Spektrale Bestrahlungsstärke des Halogen-Kugelstrahlers mit Darstellung der Spektralfarben im Hintergrund.

2.1.2 Leuchtdioden

Leuchtdioden, auch Lumineszenzdioden und lichtemittierende Dioden genannt, kurz LEDs, sind spezielle Halbleiterdioden, die beim Betrieb in Durchlassrichtung Strahlung in einem bestimmten Wellenlängenbereich emittieren. Wie andere Arten von Dioden und Halbleiterbauelemente bestehen sie aus zwei unterschiedlichen, aneinander angrenzenden Materialien mit verschiedenen Eigenschaften hinsichtlich ihrer elektrischen Leitfähigkeit. Es wird zwischen n-dotierten Halbleitern (kurz n-Leiter) und p-dotierten Halbleitern (kurz p-Leitern) unterschieden. Der n-Leiter besitzt einen Überschuss an frei

beweglichen Elektronen und der p-Leiter an sog. „Elektronenlöchern“. In Anlehnung an das Energiebändermodell werden sie als Valenz- und Leitungsband bezeichnet. Das Modell dient der anschaulichen Beschreibung von Energiezuständen von Elektronen in Festkörpern und ihrer Leitfähigkeit. Insbesondere der sich zwischen den beiden Materialien befindende p-n-Übergang, auch Sperrschicht genannt, ist entscheidend für die Strahlungserzeugung, welche auf Injektionslumineszenz basiert. Dies geschieht durch Energiezufuhr wie z. B. durch das Anlegen einer Spannung, wodurch in die Heterostruktur der LED-Ladungsträger (Elektronen und Elektronenlöcher) injiziert werden. Diese Überschussladungsträger können über verschiedene Mechanismen rekombinieren (Abbildung 3).

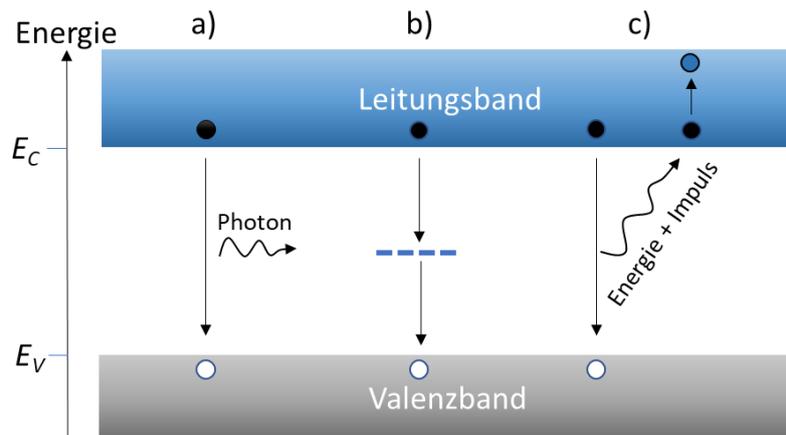


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Rekombinationsmechanismen in einem direkten Halbleiter mit vereinfachter Skizze der Bandstruktur. Dabei entspricht E_V der Energie an der Valenzbandkante und E_C der Energie an der Leitungsbandkante. a) Strahlende Rekombination, b) Shockley-Read-Hall (SRH)-Rekombination und c) Auger Rekombination.

Bei direkter bzw. strahlender Rekombination (s. Abbildung 3) wird die quantisierte Energiedifferenz in Form von Strahlung frei. Diese wird von der Bandlücke des Halbleitermaterials und deren Dotierung bestimmt und entscheidet über die emittierte Wellenlänge. Der Zusammenhang zwischen emittierter Wellenlänge und der Energiedifferenz E der Bandlücke, gemessen in eV, ist in Gleichung (1) dargestellt mit dem Planck'schen Wirkungsquantum h und der Lichtgeschwindigkeit c als Naturkonstanten. Bei sichtbarer Strahlung liegt die Energiedifferenz im Bereich von 3,2 eV bis 1,6 eV. Dies entspricht Wellenlängen im Bereich von 380 nm bis 770 nm [30, 36].

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E} \quad (1)$$

Die Übergangswahrscheinlichkeit der strahlenden Rekombination hängt von dem Bandstrukturtyp des Halbleitermaterials und der Art und Dichte von vorhandenen Rekombinationszentren ab. Bei Halbleitern mit direkter Bandlücke kann ein Elektron direkt aus dem Leitungsband in einen freien Zustand im Valenzband (Loch) fallen. Die dabei freiwerdende Energie wird als Photon emittiert. Ein Beispiel für einen direkten Halbleiter ist GaAs. Bei indirekten Halbleitern wie Si, Ge und GaP ist der Übergang mit einer Impulsänderung des Elektrons verbunden. Die Übergangswahrscheinlichkeit für

strahlende Rekombination kann durch den Einbau von isoelektronischen Rekombinationszentren wie Störstellen erhöht werden. Außerdem kann durch eine unterschiedliche Dotierung eine bestimmte Energielücke geschaffen und somit die emittierte Wellenlänge der LEDs beeinflusst werden.

Neben der strahlenden Rekombination gibt es noch weitere Rekombinationsmechanismen. Die bekanntesten alternativen Rekombinationsmechanismen in LEDs sind dabei die Shockley-Read-Hall (SRH)-Rekombination und die Auger-Rekombination, auf welche nachfolgend vollständigshalber kurz eingegangen wird. Wie zuvor erwähnt, gelangen bei einer Energiezufuhr in Halbleitern Elektronen aus dem Valenzband ins Leitungsband.

Bei der SRH-Rekombination (Abbildung 3 b) relaxiert das Leitungsband-Elektron zuerst auf ein Rekombinationsniveau, welches oft als „Trap“ bezeichnet wird und rekombiniert anschließend mit einem Loch im Valenzband, wobei thermische Energie in Form von Gitterschwingungen freigesetzt wird. Die „Trap“-Energieniveaus in der Bandlücke entstehen durch Defekte im Kristallgitter, welche durch Dotieratome zumeist gewollt eingebaut werden. Da die Rekombination über ein „Trap“-Energieniveau weniger Energie erfordert, ist diese wahrscheinlicher als die direkte Rekombination. Somit dienen sie als Rekombinationszentren bzw. Fallen für freie Ladungsträger [30, 36].

Bei der Auger-Rekombination (Abbildung 3 c) relaxiert das Leitungsband-Elektron zwar, jedoch wird die freiwerdende Energie vollständig von einem anderen Leitungsband-Elektron aufgenommen. Dieses Elektron wird entsprechend auf ein noch höheres Energieniveau gehoben und relaxiert anschließend wieder zum Leitungsband, indem es seine Energie in Form von Gitterschwingungen abgibt.

2.1.2.1 Geschichte und Entwicklung der Leuchtdioden

Historisch betrachtet begann die Geschichte der LEDs 1907, als der Engländer Henry Joseph Round in der Zeitschrift „Electrical World“ seine Entdeckung veröffentlichte, dass anorganische Stoffe unter elektrischer Spannung leuchten können [37, 38]. Erst mit dem Fortschritt in der Halbleiterphysik und nach der Entwicklung des Transistors in den 1950er Jahren konnte die Lichtemission, die mittlerweile auch mit anderen Halbleitermaterialien beobachtet wurde, erklärt werden. 1962 kam die erste industriell gefertigte LED, eine rote Lumineszenzdiode (Typ GaAsP), auf den Markt. Sie diente zunächst nur der Lichtanzeige und Signalübertragung. Nach weiteren Entwicklungen verbesserte sich die Effizienz und Leistung der LEDs zunehmend [39]. Der Einsatz neuer Halbleitermaterialien, insbesondere von Galliumnitrid (GaN), ermöglichte LEDs für andere Spektralbereiche (grün, gelb). Dadurch erweiterte sich der Anwendungsbereich der LEDs, jedoch bleiben energieeffiziente grüne LEDs („Green Gap“) bis heute weiterhin eine Herausforderung. Die Herstellung blauer LEDs hingegen blieb trotz erheblichem Forschungsaufwand in Wissenschaft und Industrie fast drei Jahrzehnte aus. Die Schwierigkeit lag zum einen in der Züchtung von Galliumnitrid-Kristallen, welche eine (hexagonale) Wurtzit-Struktur besitzen, und zum anderen in deren p-Dotierung [40]. Beide Hindernisse konnten 1993 in Japan von Isamu Akasaki, Hiroshi Amano und Shuji Nakamura überwunden werden. Sie entwickelten die erste

blaue LED mit großer Lichtintensität auf der Grundlage von Galliumnitrid, indem sie Saphir als Substrat nutzten und die Wasserstoffpassivierung entdeckten, womit die p-Dotierung ermöglicht wurde [41]. 2014 wurden sie hierfür mit dem Nobelpreis für Physik für „die Erfindung effizienter blauer Leuchtdioden, welche helle und energiesparende weiße Lichtquellen ermöglichen“ ausgezeichnet [19]. Dies wiederum ermöglichte die Herstellung weißer LEDs, nicht nur mittels additiver Farbmischung (Rot, Grün und Blau) sondern auch mithilfe von Leuchtstoffen basierend auf Lumineszenzkonversion. Dabei wird ein Teil der primären, energiereicheren, kurzwellig emittierten Strahlung, zumeist zwischen 370 nm und 430 nm, mittels eines Leuchtstoffs in längerwellige, energieärmere Strahlung konvertiert. Durch additive Farbmischung des Restanteils der Primärstrahlung mit der konvertierten Strahlung entsteht im menschlichen Auge der Eindruck von „weißem“ Licht. Der eingesetzte Leuchtstoff bzw. die Leuchtstoffmischung kann dabei auf die gewünschten finalen Eigenschaften wie Farbwiedergabe, Farbort und Farbtemperatur unter Voraussetzung der bekannten primären LED-Emissionswellenlänge angepasst werden [42, 43]. Seit der Realisierung dieser weißen LEDs steigt der Wirkungsgrad von LEDs immer weiter und ihre Effizienz übertrifft mittlerweile die der meisten anderen Strahlungsquellen. Zudem können sie nahezu monochromatisch als auch in Kombination als breitbandige Quellen eingesetzt werden und sind in vielerlei Bauformen und -größen verfügbar. Aufgrund dessen und der anhaltenden Fortschritte der LED-Technologie in Hinsicht auf Effizienz, Lichtextraktion, Farbwiedergabe, etc. finden LEDs Anwendung als alltägliche Lichtquellen, aber auch als spezialisierte Strahlungsquellen. Entscheidend für die Verwendung von LEDs ist sowohl ihre Lebensdauer wie auch Stabilität. Diese werden durch die im Betrieb auftretenden physikalischen Degradationsmechanismen bedingt [44], die im nächsten Abschnitt genauer erläutert werden.

2.1.2.2 LED-Alterung und Degradationsmechanismen

Im Laufe der Betriebszeit lässt bei allen Strahlungsquellen die Strahlungsleistung nach. Je nach Strahlungsquelle und Funktionsprinzip sind hierfür verschiedene Faktoren verantwortlich, wie die verwendete Betriebstemperatur und die angelegte Spannung oder der fließende Strom. Aber auch die Alterung der technischen Komponenten und deren Qualität spielen eine entscheidende Rolle. Die betriebsbedingte Degradation von LEDs äußert sich oft in den Änderungen der elektrooptischen Parameter wie der optischen Leistung, der Betriebsspannung und der Lage des Emissionsspektrums [1, 45, 46].

Die Nennlebensdauer von LEDs liegt meist, abhängig von dem Halbleitermaterial, bei einigen 10.000 h. Dies ist der Zeitraum, in welchem der Betrieb der LEDs in Bezug auf deren Ausfall und Alterung wirtschaftlich ist und wird daher auch als „wirtschaftliche Lebensdauer“ bezeichnet. Auch nach diesem Zeitraum ist die Nutzung möglich, jedoch steigt zunehmend die Wahrscheinlichkeit des Ausfalls oder der Unterschreitung von Nennparametern wie der angegebenen Beleuchtungsstärke. Die mittlere Bemessungslebensdauer hingegen bezieht sich auf einen spezifizierten Grad der Lichtstromdegradation. So wird neben der Nennlebensdauer auch die Degradation als eine zusätzliche Kenngröße angegeben.

Sie gibt darüber Auskunft, wieviel Prozent der ursprünglichen Strahlungsleistung einer LED über die angegebene Nennlebensdauer erhalten bleibt [46].

Bei so langen Lebensdauern wie sie bei LEDs üblich sind, ist es nicht wirtschaftlich, diese auf konventionelle Art durch Dauerbetrieb zu bestimmen. Deshalb werden diese Strahlungsquellen meist künstlich in Testlaboren gealtert. Dies erfolgt beispielsweise durch eine höhere Betriebstemperatur. Denn, wie in zahlreichen Publikationen [47, 48] aufgezeigt und untersucht, stellen die Betriebsparameter relevante Einflüsse und Beschleunigungsfaktoren für die zeitliche Reduktion der optischen Leistung von LEDs dar. Es wurden mathematische Modelle des zeitlichen Verlaufs der Leistungsreduktion abgeleitet, um eine Eingrenzung möglicher dahinterliegender Degradationsprozesse zu erhalten [49 bis 51].

Wie zuvor genannt, ist einer der Hauptgründe der Leistungsreduktion die Alterung der technischen Komponenten, welche durch den Betrieb und die Betriebsparameter ausgelöst und begünstigt wird. Hierzu zählen die Materialveränderungen in der LED wie z. B. Fehlstellen im Halbleiterkristall und die Trübung der Optik. Zum Teil können die Ursachen hierfür bereits in der Fertigung der LED liegen.

Die Herstellung von LEDs ist komplizierter und aufwändiger als die der meisten anderen Dioden und ist nach wie vor Gegenstand der aktuellen Forschung [52, 53]. Um bei definierten Wellenlängen Emissionen mit hohem Wirkungsgrad zu erhalten, müssen die einzelnen Halbleiterschichten der LED lichtdurchlässig und frei von Aufbaustörungen im Kristallgitter sein. Die präzise Herstellung beeinflusst maßgeblich ihre Funktion und Effizienz. Durch unterschiedliche Epitaxieverfahren wie z. B. Metallorganische Gasphasenepitaxie (MOVPE, MOCVD) und Molekularstrahlepitaxie (MBE), können dotierte Halbleiterschichten auf einen Halbleiterwafer aufgebracht bzw. „aufgewachsen“ werden. So entsteht der LED-Chip mit seiner Sandwichstruktur, welcher mit den Metallanschlüssen versehen und je nach Bauform zu einer fertigen LED in Kunststoff eingegossen wird (Abbildung 4). Das Gehäuse dient dem Schutz und sorgt als optischer Strahlungsleiter, manchmal auch mit einer Kuppellinse versehen (dem sog. Dome), für eine bestimmte Lichtverteilung der sonst fast punktförmigen Strahlungsquelle.

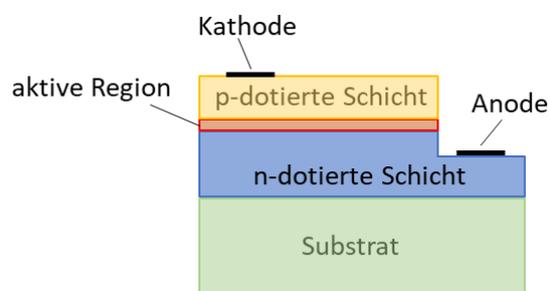


Abbildung 4: Schematischer Querschnitt der Grundstruktur einer LED.

Physikalische Parameteränderungen der LED wie z. B. lokale Stromleitungsunterschiede können durch Störungen und Defekte in den epitaktisch gewachsenen Schichten verursacht werden und dadurch die Funktion der LED beeinträchtigen. Es kann zwischen Punktdefekten und ausgedehnten Kristalldefekten

unterschieden werden [54, 55]. Bei Punktdefekten handelt es sich um sogenannte nulldimensionale Defekte. Zu ihnen zählen intrinsische Kristalldefekte wie Vakanzen oder Eigenzwischengitteratome und extrinsische Defekte durch substitutionelle oder interstitielle Fremdatome, welche bewusst als Dotierung eingebaut werden oder ungewollt als Verunreinigung enthalten sein können [54, 55]. Substitutionsatome besetzen reguläre Gitterplätze, wohingegen die interstitiellen Fremdatome Zwischengitterplätze einnehmen. Zu den ausgedehnten Kristalldefekten zählen Versetzungen als eindimensionale Defekte, Flächendefekte als zweidimensionale Defekte und Volumendefekte als dreidimensionale Defekte. Sie limitieren die Effizienz der LEDs und können auch Risse in den Kristallschichten verursachen. Ausgedehnte Kristalldefekte entstehen z. B. durch Gitterfehlpassungen, welche auf den unterschiedlichen Gitterkonstanten und thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Substrats und des verwendeten Halbleitermaterials basieren. Die dabei auftretende Spannung wird bei durchstoßenden Versetzungen durch die Versetzungen im Kristall ausgeglichen und tritt dabei als Stufen-, Schrauben-, und gemischte Versetzungen auf (Abbildung 5). Insbesondere die Dichte von Durchstoßversetzungen mit Stufencharakter limitiert die Effizienz von Nitrid-basierten Leuchtdioden, denn sie begünstigen eine nichtstrahlende Rekombination [56, 57].

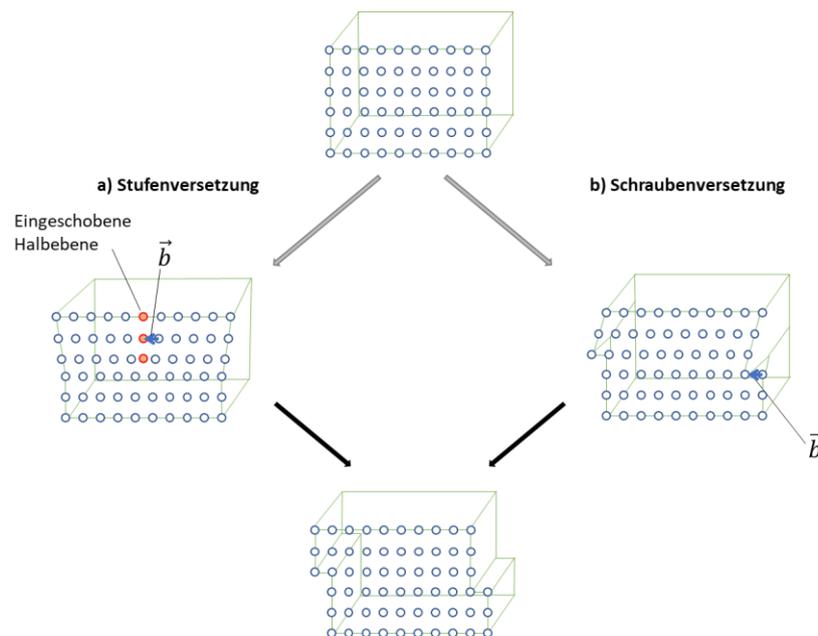


Abbildung 5: Schematische Abbildung eines vereinfachten Kristallgitters (oben) mit auftretender durchstoßender Versetzung a) Stufenversetzung und b) Schraubenversetzung mit den jeweiligen Burgersvektoren \vec{b} . Dieser beschreibt die Richtung und den Betrag der Ableitung durch die Versetzungsbewegung, welche schließlich zu der Versetzung (unten) des Kristallgitters führt.

Diese Defekte führen zu halbleiterbezogenen Degradationsmechanismen. Hierzu zählt z. B. die Generation und Aktivierung von Punktdefekten in der aktiven Zone, welche als Störstellen bezeichnet werden. Je nach Energieniveau der Störstellen kommt es zu unterschiedlichen Degradationsmechanismen. Störstellen mit einem Energieniveau nahe der Mitte der Bandlücke begünstigen nichtstrahlende Rekombination, wohingegen Störstellen mit einem tieferen Energieniveau beim Valenz- oder Leitungsband häufig parasitäre Defektlumineszenz begünstigen und zu einer Verunreinigung des

Emissionspeaks beitragen. Ein weiterer oft beschriebener Degradationsmechanismus ist die Migration von Verunreinigungen oder Kristallgitteratomen und die Interaktion dieser mit Versetzungen während des Betriebs der LED. In allen Fällen kommt es zur Zunahme nichtstrahlender Rekombination, einer Effizienzlimitierung und der Alterung der LEDs.

Daneben gibt es noch die allgemeinen sowie die kontaktbezogenen Degradationseffekte. Die allgemeine Degradation resultiert durch den Einfluss der Betriebsparameter Strom, Stromdichte und Temperatur und bewirkt bei deren Erhöhung eine Abnahme der optischen Leistung. Die kontaktbezogenen Degradationseffekte basieren auf den Metall-Halbleiter-Kontakten. Hierbei wird zwischen zwei Degradationsmechanismen an den p-Kontakten der Bauelemente unterschieden. Dazu gehört die betriebsinduzierte Diffusion von Wasserstoffatomen aus dem Halbleiter oder dem Isolator an den Metall-Halbleiter-Kontakt. Dies wird durch Akzeptoren wie z. B. Magnesium aus den p-Kontakten kompensiert, wodurch die Spannung im nicht-linearen Teil der Strom-Spannungs-Kennlinie zunimmt. Zudem kann es an dem p-Kontakt zu einer Elektromigration des Kontaktmetalls in den Halbleiter kommen. Unterstützt durch ausgedehnte Kristalldefekte verursacht dies eine Erhöhung des Stroms unterhalb der Einschaltspannung. Beide Effekte beeinträchtigen die stabile Leistungsfähigkeit der LEDs und können zum Ausfall dieser führen [57].

Ein weiterer Faktor für Degradation sind sogenannte heiße Ladungsträger. Diese besitzen eine größere kinetische Energie als die thermische Energie des Kristallgitters, weshalb sie sich nicht im thermischen Gleichgewicht mit dem Kristallgitter befinden. Sie wurden in einigen LEDs nachgewiesen [58]. Die zusätzliche kinetische Energie könnte in Halbleiterbauelementen theoretisch über verschiedene Prozesse aufgenommen werden wie z. B. über die Auger-Rekombination [58]. Die Effekte von heißen Ladungsträgern an Halbleiteroberflächen sind ausführlich untersucht. So kann es zur Generation [59] und Aktivierung von Punktdefekten [60, 61] oder zu einer Halbleiteroberflächenbeschädigung [62] kommen. All dies begünstigt eine stärkere Degradation der elektrooptischen Parameter der LED. Die betriebsbedingte Degradation von UV-LEDs (Alterung) wird insbesondere der Auger-Rekombination zugeschrieben, welche durch den Energieeintrag zur Veränderung in den Halbleitereigenschaften führt, wodurch die optische Leistung infolge nichtstrahlender Rekombination abnimmt.

Eine ausführliche Erläuterung und Auflistung von Degradationsmechanismen mit Fokus auf die Vorgänge in UV-LEDs ist beispielsweise in [57, 63] zu finden. Bei (Ga,Al,In)N-basierten LEDs werden zumeist drei Stadien der Änderung der optischen Leistung beobachtet [64]. Hierzu zählt ein kurzzeitiger Anstieg der optischen Leistung in den ersten Betriebsstunden [18, 47], worauf eine schnelle Abnahme, gefolgt von einer graduellen Abnahme mit großer Zeitkonstante (~ 1000 h) zu beobachten sind [65, 66]. Diese Stadien unterscheiden sich je nach LED-Typ in der Ausprägung voneinander und treten nicht zwingend nacheinander auf. Lediglich die letztendlich eintretende graduelle Abnahme kann übereinstimmend festgestellt werden [49, 57].

2.1.2.3 Gegenüberstellung traditionelle UV-Strahlungsquellen und UV-LEDs

In der vorliegenden Arbeit wurde ein LED-Kugelstrahler (LED-SR) für den kurzwelligen Spektralbereich entwickelt. In diesem Abschnitt soll auf alternative Strahlungsquellen im vergleichbaren Spektralbereich sowie deren Vor- und Nachteile und die Voraussetzungen für eine Anwendung, bzw. Integration in die Messapparatur aufgezeigt werden.

Die Ultraviolettstrahlung umfasst je nach Literatur den Spektralbereich von 100 nm bis 380 nm bzw. 400 nm. Diese wird formal in die Spektralbereiche UV-A 380 nm bis 315 nm, UV-B 315 nm bis 280 nm und UV-C 280 nm bis 100 nm unterteilt [67]. Elektromagnetische Strahlung unterhalb einer Wellenlänge von 180 nm wird in der Luft praktisch vollständig absorbiert.

Künstlich erzeugte UV-Strahlung wird für vielfältige Anwendungen in der Industrie und Technik sowie Forschung und auch im Alltag benötigt. Sie findet zum Beispiel Anwendung in der Aushärtung spezieller Materialien wie Druckfarben, Lacken, Klebstoffen und optische Gläser, in der Chemie und der Wasseraufbereitung/Desinfektion, in der Elektronik, z. B. bei der Herstellung von mikroelektronischen Bauelementen, und in der Materialprüfung. Konventionell wird UV-Strahlung durch thermische Anregung von Atomen und Molekülen in Feststoffen oder in Schmelzen oder mittels einer elektrischen Anregung durch eine Elektronenstoßreaktion in Gasen oder Dämpfen erzeugt. Die erste Erzeugungsmöglichkeit wird unter dem Überbegriff Temperaturstrahler (siehe Abschnitt 2.1.1) zusammengefasst. Diese Strahlungsquellen emittieren ein kontinuierliches Spektrum, dessen UV-Anteil zumeist jedoch sehr gering ist, weshalb sie kaum Anwendung als UV-Strahler finden [68].

Die Gasentladungsstrahler oder auch Entladungslampen und Bogenentladungslampen genannt, erzeugen Strahlung durch einen Lichtbogen zwischen zwei Elektroden. Beim Durchgang des elektrischen Stroms durch das Gas oder durch Metaldämpfe werden diese durch Elektronenstöße zunächst angeregt und emittieren Strahlung bei der Gasentladung. Dieser Lampentyp wird in Glimm-, Niederdruck- und Hochdruckentladungslampen unterteilt. Neben dem Kolbendruck werden sie auch meist nach dem sich im Kolben befindlichen und zur Entladung genutzten Gas benannt wie Neon, Argon, Xenon, Krypton, Natrium, Metallhalogenid und Quecksilber. Dabei wird meist ein erheblicher Energieanteil in UV-Strahlung konvertiert, jedoch besteht das Spektrum von Entladungslampen vorwiegend aus Spektrallinien [30]. Bei Leuchtstofflampen, welche zu den Niederdruck-Entladungslampen zählen, wird die UV-Strahlung durch eine Leuchtstoffschicht auf der Kolbenwand zu sichtbarem Licht umgewandelt.

Wie zuvor beschrieben findet die Emissionserzeugung in LEDs durch elektrische Anregung statt (siehe 2.1.2). Die emittierte Wellenlänge von LEDs wird von der Bandlücke des Halbleitermaterials und dessen Dotierung bestimmt. LEDs im nahen UV- und sichtbaren Spektralbereich basieren auf Indium-Gallium-Nitrid (InGaN) und Galliumnitrid (GaN). Für den tiefen UV-Bereich finden hauptsächlich Materialsysteme aus Galliumnitrid/Aluminium-Galliumnitrid (GaN/AlGaIn) bzw. Aluminiumnitrid

(AlN) Verwendung. Diese III-Nitrid-Materialsysteme werden je nach gewünschtem Emissionsspektrum auch durch andere Metalle angereichert. Der Zusammenhang der Energiebandlücke und Emissionswellenlänge für verschiedene III-Nitrid-Materialien ist in Abbildung 6 dargestellt [4, 69].

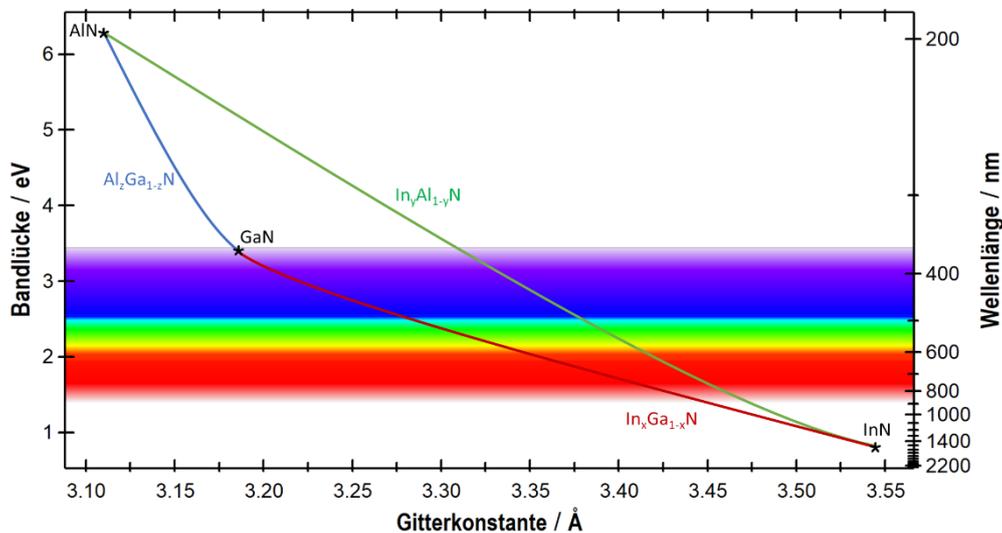


Abbildung 6: Grafische Darstellung der Energiebandlücken und entsprechende Emissionswellenlängen verschiedener III-Nitrid-Materialien, dargestellt gegen ihre Gitterkonstante mit Veranschaulichung der Spektralfarben im Hintergrund.

UV-LEDs haben eine wesentlich geringere Lebensdauer gegenüber Leuchtdioden im sichtbaren Spektralbereich bzw. auch eine etwas geringere Lebensdauer als Entladungslampen. Ihre Effizienz bzw. der Wirkungsgrad besonders im UV-C-Bereich ist gering und die entsprechenden Kosten pro Watt höher, verglichen mit einer Quecksilberdampf Lampe [69]. Es kämen somit prinzipiell auch Entladungslampen als Strahler für den Einsatz im Gonioreflektometer in Frage. Allerdings benötigen diese meist komplexe Einhausungen, sind sehr groß und besitzen oft nur Linienspektren.

Zudem verfügen UV-LEDs auch über einige Vorteile gegenüber Entladungslampen. Hierzu zählen die Einschaltdauer und ihre Dimmbarkeit, ihre kleineren Abmessungen sowie eine Auswahl des Emissionsbereichs durch geeignete Materialelektion. Zudem weisen sie eine niedrige Betriebstemperatur und geringe Wärmeentwicklung, was besonders für temperatursensitive Prozesse entscheidend ist, sowie einen relativ geringen Energieverbrauch auf. Dazu kommt eine mechanische Stabilität (Erschütterungs- und Schwingungsunabhängigkeit) und die Skalierbarkeit bei der Produktion. Dies sind einige Gründe, warum LEDs generell und UV-LEDs im Speziellen in einigen Anwendungsbereichen bereits weit verbreitet sind. Es wird erwartet, dass III-Nitrid-basierte UV-LEDs bald eine ähnliche Effizienz und Lebensdauer wie weiße LEDs aufweisen und sich auch preislich diesen annähern werden [69]. Im Gegensatz zu Entladungslampen haben LEDs ihre theoretische Effizienzgrenze noch nicht erreicht. Deshalb wird in der heutigen Forschung auf eine Verbesserung der Materialqualität, der chemischen Reinheit, der elektrischen Leitfähigkeit, der optischen Transparenz und der Herstellungstechnologie hingearbeitet [4, 69]. Zusammenfassend sind damit LEDs mit ihren

geringen Abmessungen, den kleinen Dimensionen und Gewicht selbst bei Verwendung einer notwendigen Kühlung eine elegante und geeignete Möglichkeit für den Einsatz in der Messapparatur.

2.2 Diffuse Reflexion und der spektrale Strahldichtefaktor (SRF) $\beta(\lambda)$

Trifft Strahlung auf die Oberfläche eines Körpers, so wird die Strahlung auf eine bestimmte Weise gestreut. Bei der regulären, direkten, spekularen Reflexion trifft die Strahlung auf eine glatte Oberfläche, wie z. B. einen ebenen Spiegel. Die Ausbreitungsrichtung der reflektierten Strahlung wird durch das Reflexionsgesetz beschrieben. Dieses besagt, dass der Einfallswinkel α des einfallenden Strahls bezogen auf die Oberflächennormale genauso groß ist wie der Ausfallswinkel α' des reflektierten Strahls. Dabei befinden sich der einfallende Strahl, das Einfallslot und der reflektierte Strahl in einer Ebene und der reflektierte Strahl ändert seine Ausbreitungsrichtung. Dies ist vor allem vom Material und der Oberflächenbeschaffenheit abhängig. Trifft die Strahlung auf eine unebene oder rauere Oberfläche, dann wird die einfallende Strahlung in verschiedene Richtungen diffus reflektiert, dringt in das Material ein und wird auch mehrfach gestreut. Die detaillierte Betrachtung und Beschreibung der diffusen Reflexion an diesen Oberflächen kann mithilfe der Maxwellgleichungen bzw. dem RCWA (*Rigorous Coupled Wave Analysis*) erfolgen. Das Mikrofacettenmodell ist eine starke Vereinfachung, welches jedoch ein gut nachvollziehbares und anschauliches Modell liefert. Dabei wird die Oberfläche im Microfacettenmodell als Bestandteil vieler unterschiedlich angeordneter Teilflächen, sog. spiegelähnlichen Facetten, angesehen. Für jeden einzelnen Einfallsstrahl und die zugehörige auftreffende Teilfläche gilt dabei das Reflexionsgesetz [70]. Somit verteilt sich bei der diffusen Reflexion im Unterschied zur regulären, spekularen Reflexion die eingestrahlte Strahlung über alle Raumrichtungen. Die Wechselwirkung optischer Strahlung mit Materialien wird durch die Angabe von charakteristischen Kennzahlen in der Reflektometrie mit dem spektralen Strahldichtefaktor (SRF) $\beta(\lambda)$ quantitativ beschrieben. Sie ist zwar eine materialspezifische Größe, jedoch ist sie von einer Vielzahl von Parametern wie der Messgeometrie, Wellenlänge, Polarisation etc. abhängig. Somit ist die Angabe des SRF nur in Kombination mit einer detaillierten Beschreibung und Darstellung dieser Parameter aussagekräftig.

Die Messung der diffusen Reflexion bzw. der diffusen Reflexionseigenschaften von Materialien spielt eine wichtige Rolle in der optischen Messtechnik [71, 72] sowie in zahlreichen Industriezweigen wie der Automobil-, Papier-, Textil- und Farbindustrie [73 bis 75]. Sie ist eine charakteristische Materialeigenschaft und ihre Bestimmung wird in zahlreichen Normen für die Qualitätskontrolle gefordert, z. B. [76 bis 78]. Zudem sind die entsprechenden Messverfahren bzw. die Realisierung von Messungen an Proben mit herausfordernden Eigenschaften, wie Goniochromatismus, Glanz und Glitzern, selbst Teil aktueller Forschungsprojekte [79] und unterliegen stetigen Verbesserungsprozessen

sowie wissenschaftlichen Diskussionen in involvierten Expertenausschüssen [79]. Kalibrierte Reflexionsnormale werden auch in der Forschung benötigt, z. B. für die weltraumgestützte Erdbeobachtung und die Materialcharakterisierung von Satellitenkomponenten [80, 81].

In der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) lassen sich die verwendeten Methoden zur Messung der diffusen Reflexionseigenschaften grundsätzlich in hemisphärisch-gerichtete (halbräumlich-gerichtete) und winkelräumlich auflösende Geometrien unterteilen. Die hemisphärisch-gerichteten Geometrien werden mittels eines Kugelreflektometers realisiert [82, 83]. Dabei handelt es sich um eine integrierende Kugel, eine sog. Ulbricht-Kugel. In dieser wird die Probe eingespannt und halbräumlich diffus angestrahlt. Die reflektierte Strahlungsleistung wird gerichtet detektiert. Die gerichteten Geometrien, bei welchen sowohl die Einstrahlung als auch die Detektion gerichtet erfolgen, werden mit einem Gonioreflektometer realisiert. Der in dieser Arbeit konstruierte LED-SR wurde für den Einsatz in dem roboterbasierten Gonioreflektometer der PTB entwickelt, weshalb die Messapparatur im folgenden Abschnitt detailliert beschrieben wird.

2.2.1 Das Gonioreflektometer der PTB

Das Referenz-Gonioreflektometer der PTB ist das nationale Normal für bidirektionale diffuse Reflexionsmessungen im Wellenlängenbereich zwischen 250 nm – 1700 nm [84]. Es dient der Bestimmung des absoluten SRF $\beta(\lambda)$ und damit der Realisierung, Bewahrung und Weitergabe der diffusen Reflexionsskala in gerichtet-gerichteten Geometrien.

Die Messapparatur in ihrer ursprünglichen Form wurde 2006 konstruiert und ist in [85] ausführlich beschrieben. Seitdem wurde sie fortlaufend modifiziert und erweitert. Prinzipiell besteht sie aus drei Hauptkomponenten: der Strahlungsquelle, der Probenhalterung und der Detektion. Die zu untersuchende Probe wird auf einem fünfsichtigen Roboterarm in der Mitte der Apparatur platziert. Zur Probenbestrahlung dient ein spezieller Ulbricht-Kugelstrahler [86], welcher auf einem großen Drehkranz montiert ist und somit um die Probe herum geschwenkt werden kann. Der Detektionsgang, in welchen die von der Probe reflektierte Strahlung gelangt, ist invariabel festgelegt und besteht aus der Abbildungsoptik, einem Doppelmonochromator und einem Detektionssystem (Elektronik inkl. Detektor). In einer zweistufigen Abbildung (Abbildungsmaßstab 10:1) mittels einer Spiegeloptik wird das gemessene Reflexionssignal im Doppelmonochromator abgebildet. Somit wird eine kreisrunde Fläche mit einem Durchmesser von 20 mm auf der Probe auf einen 2 mm breiten Eintrittsspalt des Monochromators abgebildet. Für präzise Messungen auch bei steilen Messgeometrien, also Geometrien, bei denen der verwendete Einfallswinkel zu einer Verzerrung der Form des Messflecks auf der Probe führt, ist es notwendig, die Öffnungsweite anzupassen, sodass der unveränderte Messfleck betrachtet wird. Dies erfolgt durch einen Aperturwechsler. Die Bestrahlung der Probe erfolgt spektral breitbandig mit einer anschließend spektral selektiven Detektion der reflektierten Strahlung. Auf der Detektionsseite können standardmäßig vier verschiedene Detektortypen eingesetzt werden: Ein *Solar-Blind Channel-*

Photomultiplier im Bereich zwischen 250 nm und 350 nm, ein *Yellow Enhanced-Channel-Photomultiplier* zwischen 300 nm und 400 nm, eine Silizium(Si)-Photodiode im Bereich zwischen 350 nm und 1150 nm und eine gekühlte InGaAs-Photodiode zwischen 1000 nm und 1700 nm. Die Signale werden mit einem Picoamperemeter erfasst. Darüber hinaus kann im sehr ähnlichen Forschungsgoniometer ARGon3 eine CCD-Kamera anstelle eines Einzelementdetektors zur gleichzeitigen Erfassung des sichtbaren Spektralanteils verwendet werden [87]. Die in dieser Arbeit vorgestellten Daten umfassen hauptsächlich den Spektralbereich von 360 nm bis 850 nm, weshalb eine Si-Photodiode verwendet wurde. An Stellen der Arbeit, an welchen der gemessene Spektralbereich bzw. der verwendete Detektor von dieser Angabe abweicht, wird explizit darauf hingewiesen.

Der Aufbau der Messapparatur und das Zusammenspiel der beschriebenen Einzelkomponenten ist schematisch in Abbildung 7 dargestellt. Die Kombination aus robotergestütztem Probenhalter, mobiler Lichtquelle und fester Detektion ermöglicht hochpräzise Messungen des SRF in nahezu jeder beliebigen bidirektionalen Geometrie, sowohl in-plane als auch out-of-plane, bezogen auf die Ebene, die von der Beleuchtungsrichtung und der Normalen auf der Probe aufgespannt wird.

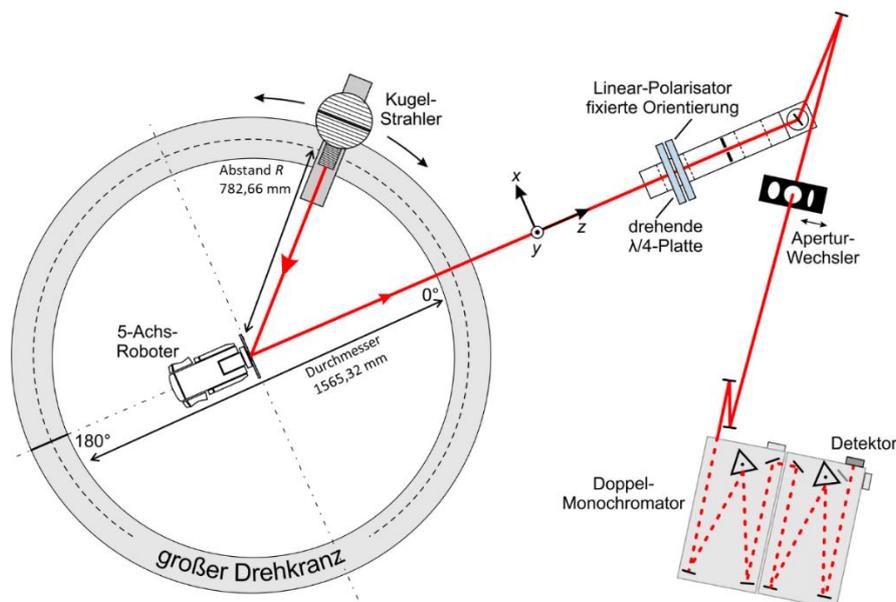


Abbildung 7: Schematische Skizze des Referenz-Gonioreflektometers der PTB. Der Abstand zwischen der Probe und dem Aperturwechsler beträgt 3,8 m. [12, 87, 88]

Die Strahlungsquelle spielt eine entscheidende Rolle innerhalb des Messkonzepts. Erforderlich ist eine Strahlungsquelle mit einem möglichst starken Lambert'schen Strahlprofil, welche eine räumlich homogene Strahlung mit einer von der Betrachtungsrichtung unabhängigen Strahldichte aufweist. Zugleich sollte diese eine hohe Leistung und bestenfalls ein über den gesamten Spektralbereich kontinuierliches Spektrum erzeugen. Als konventionelle Strahlungsquelle dient ein Kugelstrahler mit einem Innendurchmesser von 150 mm, der mit einer 400-W-Quarz-Wolfram-Halogenlampe ausgestattet ist [86]. Dieser zuverlässige Halogen-SR besitzt eine Präzisionsapertur von 40 mm und emittiert eine räumlich homogene, unpolarisierte Strahlung [88 bis 90] über den gesamten

Öffnungsbereich mit einer hohen Ausgangsleistung im VIS- und NIR-Spektralbereich. In Richtung UV-A nimmt die verfügbare Ausgangsleistung ab, was zu einem schlechteren Signal-zu-Rausch-Verhältnis und damit zu einem Anstieg der Messunsicherheit in diesem Spektralbereich führt.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Vorzüge des derzeitigen Strahlerprinzips zu erhalten und gleichzeitig die nutzbare Strahlungsleistung zu erhöhen, indem LEDs als primäre Strahlungsquellen eingesetzt wurden. Dieser entwickelte LED-SR wird nachfolgend ausführlich beschrieben, charakterisiert und mit dem Halogen-SR verglichen.

2.2.2 Spektraler Strahldichtefaktor und seine Messung

Die Herleitung der allgemeinen Gleichung für den SRF $\beta(\lambda)$ ist in zahlreichen Veröffentlichungen und der Literatur beschrieben [76, 85, 91]. Daher wird nachfolgend nur eine kurze Zusammenfassung gegeben, um auf die spezifischen Modifikationen und Voraussetzungen für die verwendete Messapparatur einzugehen.

Der SRF $\beta(\lambda)$ ist definiert als das Verhältnis der reflektierten spektralen Strahldichte $L_r(\lambda)$ der Probe und der reflektierten spektralen Strahldichte $L_r^{\text{PRD}}(\lambda)$ eines vollkommen mattweißen perfekt reflektierenden Diffusors (PRD), der unter den gleichen Bedingungen bestrahlt wird [76] (Gleichung (2)). Die vollständige Definition des SRF umfasst stets die Angabe der Messgeometrie mit allen zugehörigen Einfallswinkeln (Index i) und Reflexionswinkeln (Index r). Dies ist exemplarisch in Gleichung (3) und Abbildung 8 vollständigshalber dargestellt. Jedoch wird zur besseren Lesbarkeit auf die Winkelabhängigkeiten in den nachfolgenden Gleichungen verzichtet.

$$\beta(\lambda) = \frac{L_r(\lambda)}{L_r^{\text{PRD}}(\lambda)} \quad (2)$$

$$\beta(\theta_i, \Phi_i, \theta_r, \Phi_r, \lambda) = \frac{L_r(\theta_i, \Phi_i, \theta_r, \Phi_r, \lambda)}{L_r^{\text{PRD}}(\theta_i, \Phi_i, \theta_r, \Phi_r, \lambda)} \quad (3)$$

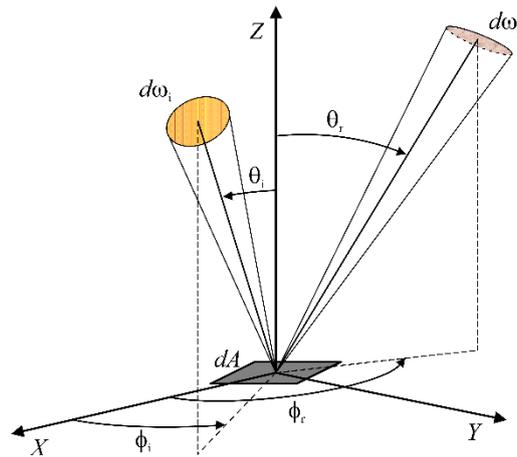


Abbildung 8: Definition der Richtungen und aller zugehörigen Winkel θ_i , ϕ_i , θ_r , ϕ_r in der gerichteten Geometrie [12] mit dem auftreffendem $d\omega_i$ und reflektiertem $d\omega_r$ Strahl und der bestrahlten Fläche dA .

Der PRD, welcher die auf ihn auftreffende Strahlung verlustfrei, vollständig diffus und mit einer Lambert'schen Richtungscharakteristik reflektiert, existiert nur als theoretisches Konzept und kann nicht materialisiert werden. Somit erfolgt die Realisierung einer absoluten Messung des spektralen Strahldichtefaktors durch die physikalische Beschreibung und Messung der Messapparatur selbst. Die Herleitung für diesen strahlungsbasierten Ansatz bei goniometrischen Messungen wie er in der PTB zur Anwendung kommt, ist ausführlich in [85, 92, 93] beschrieben.

Grundvoraussetzung für diesen Ansatz ist, dass die Strahldichte der Strahlungsquelle $L_i(\lambda)$ über den gesamten Strahlquerschnitt und für alle Richtungen konstant ist. Diese Bedingung wird durch den verwendeten Kugelstrahler, zumindest für die gebräuchlichen diffusen Reflexionsnormale, die in Standardgeometrien außerhalb der Spiegelrichtung gemessen werden, erfüllt.

Um den differentiellen Charakter der Messgröße zu berücksichtigen, ist eine weitere Voraussetzung, dass die Öffnungswinkel des Bestrahlungs- und Detektionsgangs klein sein müssen. Die Messapparatur hat einen vollen Bestrahlungsöffnungswinkel von 3° und einen vollen Detektionsöffnungswinkel von $0,64^\circ$. Daraus ergibt sich die in Gleichung (4) dargestellte Schreibweise für $L_r^{\text{PRD}}(\lambda)$.

$$L_r^{\text{PRD}}(\lambda) = \frac{\cos \theta_i}{\pi} \cdot \frac{A_Q}{R^2} \cdot L_i(\lambda) \quad (4)$$

Dabei bezeichnet A_Q die emittierende Fläche und R den Abstand zwischen Strahler und Probe. Während der Messung werden sowohl die einfallende Strahldichte $L_i(\lambda)$ als auch die reflektierte Strahldichte $L_r(\lambda)$ durch Messung der zugehörigen Photostromsignale $S_i(\lambda)$ und $S_r(\lambda)$ erfasst. Diese sind proportional zur Strahldichte und werden mit demselben Messgerät, demselben optischen Pfad und derselben Messelektronik gemessen. In diesem Idealfall sind die Proportionalitätsfaktoren gleich und heben sich auf. Unter Berücksichtigung der zugehörigen Dunkelsignale $S_{(i,r)d}(\lambda)$ ergibt sich daraus die Grundgleichung für den absoluten SRF, der mit dem Gonioreflektometer der PTB bestimmt wird:

$$\beta(\lambda) = \frac{\pi R^2}{A_Q \cos(\theta_i)} \cdot \frac{S_r(\lambda) - S_{rd}(\lambda)}{S_i(\lambda) - S_{id}(\lambda)} \quad (5)$$

Durch regelmäßige internationale Vergleichsmessungen mit anderen Metrologieinstituten wird die Vergleichbarkeit und Rückführbarkeit der Skalen des spektralen Strahldichtefaktors an der PTB gewährleistet [91, 93].

Um einen Einblick in typische Verläufe von Reflexionseigenschaften relevanter Materialien zu erhalten, sind in der Quelle [94] einige davon grafisch aufgeführt und einsehbar. Diese spiegeln jedoch nur exemplarische Werte für bestimmte Probentypen wider. Die exakten Werte für eine bestimmte Probe müssen durch eine Kalibrierung bestimmt werden. Zudem ist in steigender Richtung der zunehmende Einfluss der Winkelauflösung der verwendeten Apparatur in den Reflexionswerten zu erkennen.

Notwendigerweise sind auch die Probeneigenschaften der zu untersuchenden Probe selbst ebenfalls wichtige Faktoren, welche die Messung beeinflussen. So hat die Nachfrage nach Messungen und Kalibrierungen mit bidirektionalen diffusen Reflexionsgeometrien nicht zuletzt aufgrund der Vielzahl neuer Materialien zugenommen. Diese weisen meist gonioapparente bzw. goniochromatische Eigenschaften auf, wie interferometrische Beschichtungen, Metallic-Lacke und Glanzpigmente und verändern ihr visuelles Erscheinungsbild je nach Bestrahlungs- und Betrachtungswinkel [79, 91, 95, 96]. Außerdem wächst auch das Interesse an Proben mit extrem niedriger Reflektivität, da solche Materialien z. B. für Beschichtungen, Lackierungen und in elektrischen Bauteilen Verwendung finden [97, 98]. Hinzukommen weitere für die Messung anspruchsvolle Probeneigenschaften wie z. B. Fluoreszenz [99, 100], Temperatur- und Strahlungssensitivität von strahlungsempfindlichen Proben bzw. Probenpigmenten, welche bei einer Auswertung sorgfältig betrachtet und einbezogen werden müssen. Hierauf wird in 3.3.2.1 und 3.3.2 näher eingegangen.

3 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden wird der Konstruktionsprozess des LED-Kugelstrahlers mit dessen Voruntersuchungen und vorangegangenen Versionen erläutert und erklärt. Anschließend wird die Charakterisierung der finalen Version des LED-SR beschrieben, woraufhin die Messunsicherheitsbetrachtung und die quantifizierbaren Einflüsse betrachtet und die durchgeführten Validierungsmessungen vorgestellt und diskutiert werden. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf der Auswertung der Messergebnisse und der Messunsicherheitsbetrachtung, welche detailliert aufgeführt werden. Im Anschluss wird ein kleiner Ausblick auf weitere messtechnische Einsatzgebiete des LED-SR gegeben.

3.1 Konstruktion und Charakterisierung eines LED-Kugelstrahlers

Wie zuvor bei der Gegenüberstellung möglicher UV-Strahlungsquellen in 2.1.2.3 beschrieben, sollte eine geeignete Quelle im Gonioreflektometer der PTB (siehe Abschnitt 2.2.1) eingesetzt werden, um die Genauigkeit der Messungen des spektralen Strahldichtefaktors in dem UV/VIS-Grenzspektralbereich zu verbessern. Da das Messprinzip [85, 87] beibehalten und somit die Strahlungsquelle beweglich sein sollte, musste eine mechanische Stabilität (Erschütterungs- und Schwingungsunabhängigkeit) gewährleistet werden. Zudem ist eine Grundvoraussetzung des Messprinzips eine räumlich homogene Strahldichte über den gesamten Strahlungsquerschnitt. Darüber hinaus soll gleichzeitig ein möglichst kontinuierliches Spektrum in einem größtmöglichen Spektralbereich erzeugt werden

Hierzu erschienen LEDs, speziell UV-A-LEDs, als geeignete Option. Es wurde ein LED-SR basierend auf dem Kugelstrahlerprinzip [85, 86] entwickelt. Dieser erfüllt als Ulbricht-Kugel die Bedingung der Erzeugung eines homogenen Strahlungsquerschnitts und nutzt LEDs als primäre Strahlungsquelle, womit er diese beiden Anforderungen vereinigt.

Aufgrund der zunehmenden Wichtigkeit von LEDs bestand das Interesse und die Bestrebung, deren Eignung als moderne Strahlungsquelle für metrologische Anwendungen zu validieren. Denn es ist anzunehmen, dass LEDs in den kommenden Jahren immer mehr an Bedeutung in der Messtechnik gewinnen werden. Hierzu trägt u. a. das schrittweise in Kraft getretene Glühlampenverbot der EU [22, 23, 101] bei, welches auch die Weiterentwicklung von LEDs im metrologischen Kontext beschleunigt. Für LEDs als Strahlungsquellen sprechen nicht nur die grundsätzlichen Vorzüge wie ihre lange Lebensdauer, ihre Effizienz und ihre hohe Strahlungsleistung [1 bis 3], sondern auch ihre Bauform, Dimmbarkeit, ihr geringer Energieverbrauch, ihre mechanische Stabilität sowie die wesentliche Möglichkeit der Auswahl des Emissionsbereichs durch geeignete Materialselektion. Dies ist Gegenstand aktueller Forschung, welche sich z. B. damit beschäftigt, die Verwendung und Herstellung neuer Halbleiterverbindungen sowie die Optimierung der Herstellungsprozesse mit dem Ziel der Erschließung und Effizienzsteigerung weiterer Spektralbereiche voranzutreiben [4, 17, 18, 69]. Begünstigt wurde die Entscheidung, LEDs als moderne Strahlungsquellen in dem Kontext dieser Arbeit einzusetzen, dadurch,

dass zum Forschungszeitpunkt bereits LEDs mit ausreichend Strahlungsleistung im Grenzbereich zwischen sichtbarer und UV-Strahlung (< 430 nm) kommerziell erhältlich waren.

Bei einigen dieser kommerziell erhältlichen LEDs handelt es sich um kleine LED-Module, bei welchen mehrere LEDs herstellerseitig zu Modulen größerer Leistung zusammengeschaltet werden und nach wie vor als LEDs vertrieben werden (vgl. Anhang II). Diese werden nachfolgend der Verständlichkeit halber weiterhin als LEDs bezeichnet. Die Spezifikationen aller im Rahmen dieser Arbeit erworbenen und untersuchten LEDs sind im Anhang aufgeführt.

Die in dieser Arbeit verwendeten LEDs zur Konstruktion des finalen LED-SR gehörten zum Erstellungszeitraum der Arbeit und der praktischen Untersuchungen zu den leistungsstärksten kommerziell erwerblichen LEDs in diesem Spektralbereich. Aufgrund der hohen Nachfrage und der schnellen Entwicklung von LEDs in den letzten Jahren gibt es bereits LEDs mit größeren optischen Leistungen, welche zudem auch weitere Bereiche im kurzwelligen Spektralbereich abdecken. Es ist davon auszugehen, dass diese Entwicklung sich weiter fortsetzt, bis die LEDs im kurzwelligen Spektralbereich ähnlich leistungsstark sind wie im sichtbaren Bereich. Aufgrund dessen wurde von Beginn der Konstruktion der Strahlungsquelle darauf geachtet, diese möglichst modular zu halten, sodass im Bedarfsfall Anpassungen auf einfache Weise möglich sind. Zudem ist zu erwähnen, dass bereits bei der Idee, LEDs für diese Messaufgabe einzusetzen, der spitzförmige spektrale Verlauf von LEDs mit ausgeprägten Maxima und starken Modulationen im Spektrum bekannt war und diskutiert wurde. Dies ist ein komplexer Einfluss, der speziell bei spektralen Messungen und Auswertungen explizit betrachtet und analysiert werden muss. Jedoch wurde bewusst die Entscheidung zur Wahl dieses Ansatzes getroffen, um den Einfluss durch den Einsatz von LEDs auf die Auswertung in der vorliegenden Arbeit näher zu betrachten. Somit legt diese Arbeit einen Grundstein dafür, LEDs und den konstruierten LED-SR auch perspektivisch im Gonioreflektometer zu nutzen.

3.1.1 Konstruktion des LED-SR

Vor Auswahl der LEDs, welche zur Konstruktion des LED-SR verwendet werden sollten, wurde eine Marktübersicht der zu Beginn der Arbeit im Jahr 2018 gebräuchlichen und erwerblichen LEDs erstellt. Ausschlaggebend waren dabei der Spektralbereich (< 430 nm) und die optische Leistung. Der UV/VIS-Grenzbereich wurde gewählt, da hier nachweislich die Strahlungsleistung des bis dato verwendeten Halogen-SR trotz der Verwendung einer leistungsstarken 400 W-Quarz-Halogenlampe abnimmt und mehr Messzyklen erforderlich sind, um eine Messstatistik mit geringen Unsicherheiten zu erhalten (siehe Abschnitt 3.2).

Die kommerziell erhältlichen LEDs wurden anhand ihrer elektrooptischen Parameter verglichen und testweise wurden acht als stabil und leistungsstark beschriebene LEDs im Spektralbereich von 365 nm – 410 nm für weitere Untersuchungen erworben. Die technischen Datenblätter der betrachteten LEDs befinden sich im Anhang II. Diese wurden jeweils auf einem Kühlkörper aufgebracht und in eine

Ulbricht-Kugel eingebracht. Die Bestrahlungsstärke (Anhang IV.i) wurde mittels einem auf Bestrahlungsstärke rückgeführten Array-Spektrometer (siehe Anhang III.i) aufgenommen.

Um einen Eindruck über ein zusammengesetztes, möglichst kontinuierliches Spektrum unter Verwendung verschiedener LED-Typen und der benötigten Anzahl zu erhalten, wurde dies anhand der ermittelten Spektrometerdaten (Anhang IV.i, Abbildung A 1) simuliert. Dabei wurde als Zielspektrum eine Bestrahlungsstärke verwendet, welche beim Halogen-SR bei 700 nm erreicht wird. Nachfolgend sind drei Simulationen mit je drei verwendeten LED-Typen gezeigt (siehe Abbildung 9). Zur Optimierung wurde ein Algorithmus zur Minimierung der Fehlerquadratsumme eingesetzt, welcher mit den gegebenen LEDs das Zielspektrum annähert. Für die Abbildung 9 a und b, in welchen die gleichen LEDs in unterschiedlicher Anzahl simuliert wurden, war die zusätzliche Restriktion angewandt worden, möglichst wenige LEDs einzusetzen. Bei der Simulation c ging es um eine möglichst gute Annäherung an das Zielspektrum.

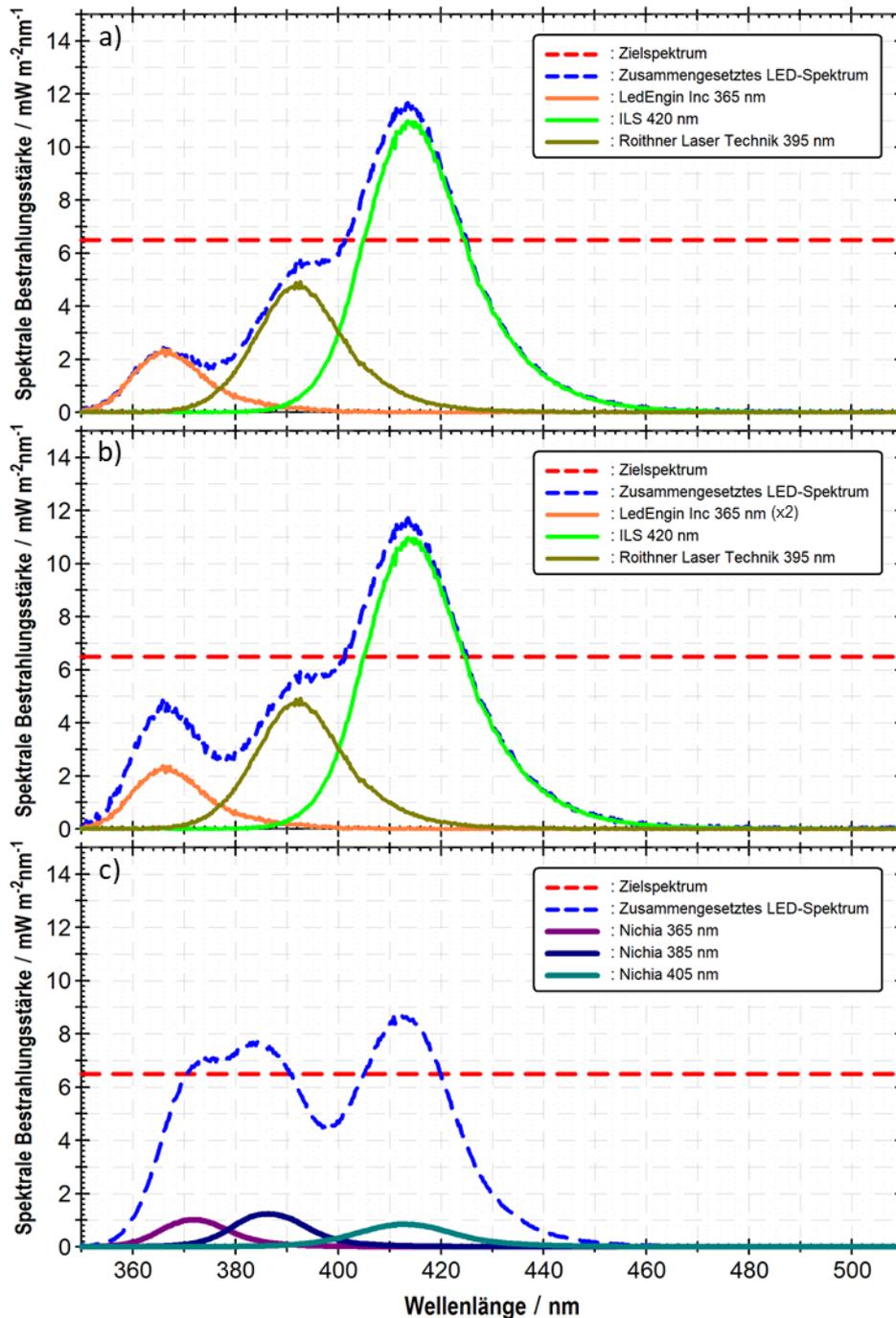


Abbildung 9: Simulation eines möglichst kontinuierlichen konstanten Spektrums mit den verwendeten Spektrometerdaten von je drei LED-Typen, eingebracht in eine mit BaSO_4 beschichtete Ulbricht-Kugel und ermittelt mit einem Array-Spektrometer. Das Zielspektrum ist in rot und das sich ergebende zusammengesetzte LED-Spektrum in blau aufgeführt. a) Simulation zusammengesetzt aus je einer LED, die bei 365 nm, 395 nm und 420 nm emittiert; b) Simulation a mit einer zusätzlichen LED bei 365 nm; c) Simulation mit Nichia LEDs, die bei 365 nm (x6), 385 nm (x5) und 405 nm (x10) emittieren. Die zugehörigen technischen Datenblätter befinden sich im Anhang II.

Der für die LEDs final zur Verfügung stehende Platz in der Ulbricht-Kugel stellte ebenfalls einen entscheidenden Faktor für die Konstruktion des LED-SR dar. Das Kugelstrahlerprinzip erzeugt durch Mehrfachreflexion ein räumlich homogenes Strahlungsfeld. Dadurch wird allerdings zugleich die Strahlungsleistung verringert. Bedingungen, welche die Funktion des Kugelstrahlerprinzips und damit die Mehrfachreflexion begünstigen, sind wenig innere Abschattungen und Öffnungen (sog. Ports) und eine reflektierende homogene, ebene Oberfläche. Aufgrund der kleinen Bauform der verwendeten Halogenlampe beim Halogen-SR, welche in der hinteren Kugelhalbschale eingebracht wird, wird das Kugelstrahlerprinzip nicht beeinträchtigt. LEDs haben prinzipiell auch eine kleine Bauform, jedoch benötigen speziell Hochleistungs-LEDs für einen stabilen Betrieb einen Kühlmechanismus. Auch müssen ihre elektrischen Kontakte in geeigneter Weise aus der Kugel geführt werden, um das Ulbricht-Kugel-Prinzip nicht zu beeinträchtigen. Daher ist es sinnvoll, die LEDs nicht verteilt in der Kugel zu platzieren, sondern gemeinsam über einen Port einzubringen. Durch diesen Ansatz wird ein gewisser Raum der Kugeloberfläche durch die LEDs eingenommen. Für die finale Version des LED-SR sollte derselbe Kugeldurchmesser von 15 cm wie für den Halogen-SR verwendet werden. Um sicherzustellen, dass das Kugelstrahlerprinzip nicht beeinträchtigt wird und der in der Kugel integrierte Reflexionseinsatz die LEDs vollständig abdeckt und somit ein direkter Strahlungsausgang verhindert wird, durfte die durch die LEDs in der hinteren Kugelhalbschale beanspruchte Fläche nicht mehr als 3 % der Kugeloberfläche einnehmen.

Die Konstruktion des LED-SR fand in drei Entwicklungsschritten statt. Zunächst wurde ein Testaufbau entworfen, um die LEDs im Kugelstrahler zu testen und weitere Anforderungen an die finale Version des LED-SR zu spezifizieren. Im nächsten Schritt entstand die erste Version des LED-SR, in welchem das Prinzip und der Strahler mit LEDs umfassend untersucht und Optimierungsansätze abgeleitet wurden. Nach Umsetzung dieser Verbesserungen entstand die finale Version des LED-SR, welche nicht nur ausführlich charakterisiert, sondern auch in die Messapparatur integriert und für Validierungsmessungen eingesetzt wurde. Nachfolgend werden der Entstehungsprozess und die drei Stadien der Entwicklung des LED-SR näher beschrieben. Im nächsten Abschnitt wird die Charakterisierung der finalen Version des LED-SR gezeigt.

In einem Testaufbau des LED-SR mit zunächst drei LEDs wurde die Simulation (Abbildung 9a) überprüft und eine grobe Konstruktion des LED-SR realisiert. Dazu wurden die LEDs in einer mit Bariumsulfat beschichteten Kugel älteren Modells (Durchmesser 20 cm mit seitlichem Port) verwendet. Mittels in der Kugel integrierter Reflexionseinsätze wurde ein direkter Strahlungsausgang verhindert. Eine passive Kühlung, bestehend aus einem Kühlkörper und einem Luftkühler, wurde eingebaut und die LEDs waren einzeln mit konstantem Strom steuerbar (siehe Abbildung 10). Das sich daraus zusammengesetzte Spektrum ist im Vergleich zu den einzelnen LED-Spektren, der Simulation und dem Spektrum des Halogen-SR in Abbildung 11 dargestellt.

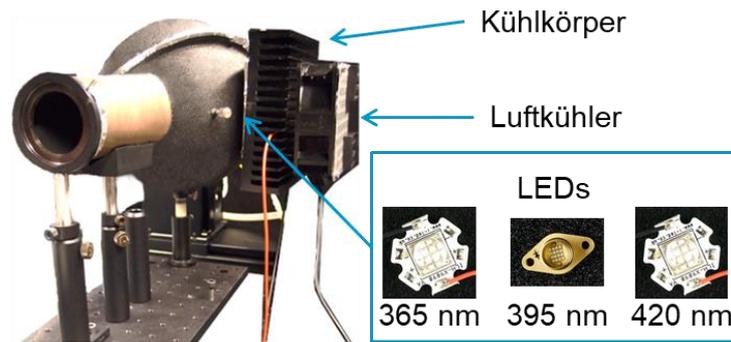


Abbildung 10: Die erste Testversion des LED-SR mit einer Bariumsulfatkugel und drei einzeln gesteuerten high-power LEDs (365 nm, 395 nm und 420 nm).

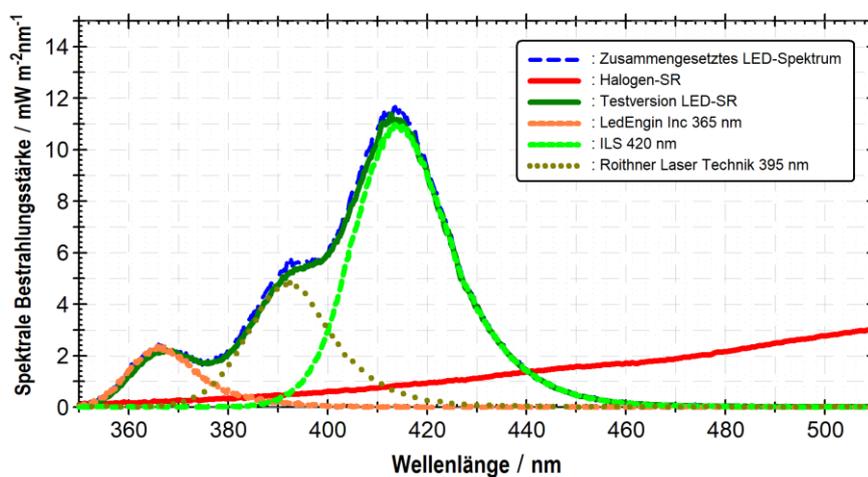


Abbildung 11: Spektrale Bestrahlungsstärke der Testversion des LED-SR (dunkelgrün) und der einzelnen LEDs, welche für die Konstruktion verwendet wurden (365 nm orange, 395 nm ocker und 420 nm hellgrün), gemessen mit einem Array-Spektrometer. Zum Vergleich ist die spektrale Bestrahlungsstärke des Halogen-SR in rot und das Ergebnis der Simulation aus Abbildung 9 a) in blau aufgeführt.

Die Testversion des LED-SR zeigt, dass mit diesem System grundsätzlich eine größere verfügbare Strahlungsleistung im kurzwelligen Spektralbereich, verglichen mit dem Halogen-SR, erzielt werden konnte (Abbildung 11). Zudem stimmen die Ergebnisse mit der Simulation überein.

Im nächsten Entwicklungsschritt wurde eine erste Version des LED-SR in einer speziell dafür gefertigten Ulbricht-Kugel erstellt. In der Mitte der Kugel ist ein Innenreflektor aus einer mit Bariumsulfat (BaSO_4) beschichteten Aluminiumplatte angebracht. Der Reflexionseinsatz ist entscheidend für das Messprinzip [102] und beeinflusst maßgeblich die räumliche Homogenität der emittierten Strahlung [10]. Da der Reflexionseinsatz aus Bariumsulfat hausintern gefertigt, an die Kugelbedingungen angepasst und beschichtet werden kann und somit eine optimale Oberflächenqualität des Reflektors gewährleistet ist, wurde Bariumsulfat als Beschichtungsmaterial für den Einsatz verwendet. Die Position des Reflektors kann in Bezug auf das Zentrum der Kugel eingestellt werden, um ein homogenes reflektiertes Strahlprofil zu erhalten. Die Ulbricht-Kugel selbst besteht aus Aluminium und enthält einen inneren Teil mit einem Durchmesser von 150 mm aus gesintertem

Polytetrafluorethylen (PTFE). BaSO_4 zeigt über einem weiten spektralen Bereich gute Reflexionseigenschaften und ist temperaturstabil, jedoch führt UV-Strahlung zu einer Vergilbung der Oberfläche und die Beschichtung ist empfindlich gegenüber mechanischer Belastung (Abbildung 12). PTFE ist robuster und besitzt bessere diffuse Reflexionseigenschaften im kurzwelligen Spektralbereich als BaSO_4 (Abbildung 13). Aufgrund dieser höheren diffusen Reflexion im kurzwelligen Spektralbereich, die durch die Mehrfachreflexion die letztendliche Strahlungsleistung des Strahlers maßgeblich beeinflusst, wurde gesintertes PTFE anstelle einer Bariumsulfat-Beschichtung für die Kugelinnenfläche des LED-SR verwendet.

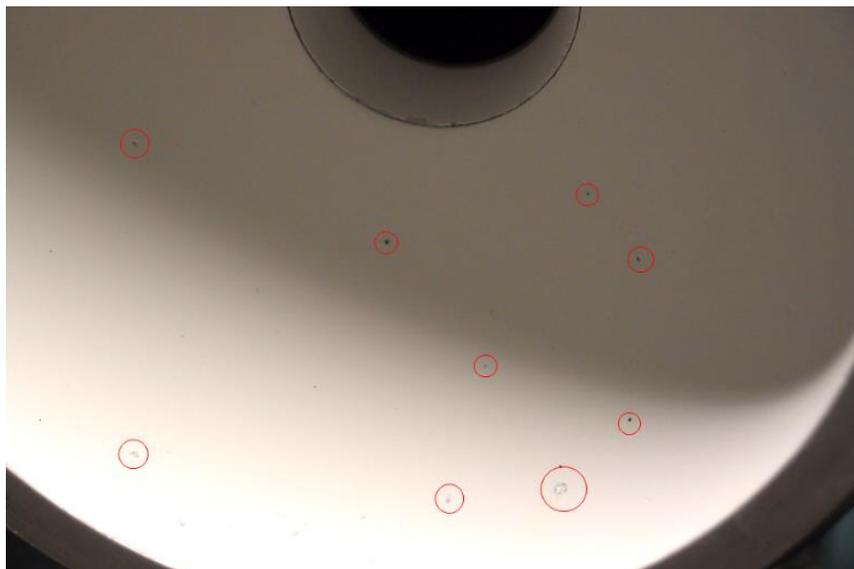


Abbildung 12: BaSO_4 -Kugelbeschichtung nach einem jahrzehntelangen Einsatz am Gonioreflektometer. Einige stark beanspruchte Stellen, welche u. a. durch das Explodieren von Halogenlampen, mechanischer Abnutzung, die Temperaturbelastung und UV-Strahlung entstanden sind, sind rot eingekreist. Beim LED-SR wurde mit einer PTFE-Beschichtung gearbeitet, welche robuster gegen solche Schäden ist.

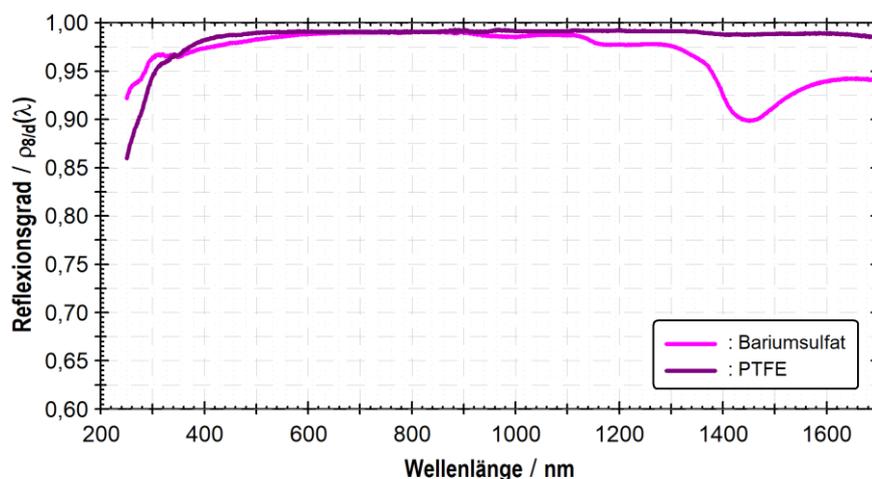


Abbildung 13: Reflexionsgrad von Bariumsulfat und PTFE gemessen in der $8^\circ/d$ -Geometrie mit einem UV-Vis-NIR Spektralphotometer mit einer Ulbricht-Kugel für spektrale und diffuse Reflexionsmessungen.

Als zugrundeliegende Strahlungsquelle für die verbesserte Version des LED-SR wurde dieselbe Kombination der bereits getesteten drei verschiedenen Hochleistungs-LED-Typen gewählt, die im Wellenlängenbereich von 350 nm bis 450 nm emittieren. Dieses Mal wurden insgesamt vier LEDs verbaut (Simulation Abbildung 9 b). Die LEDs wurden auf einen speziell entwickelten Kühlkörper mit Luftkühler montiert (Abbildung 14).

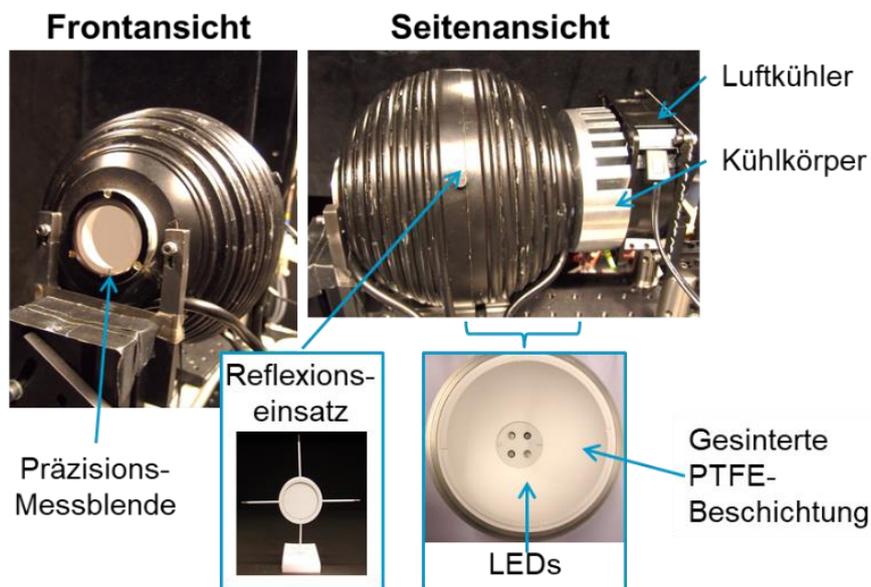


Abbildung 14: Struktur der verbesserten Version des LED-SR mit einer Beschichtung aus gesintertem PTFE und vier einzeln gesteuerten high-power LEDs (365 nm (x2), 395 nm and 420 nm) [9, 10].

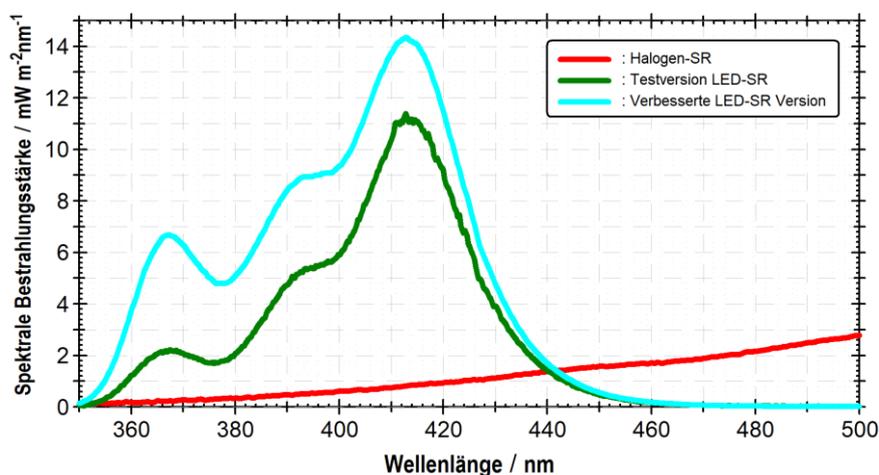


Abbildung 15: Spektrale Bestrahlungsstärke der verbesserten LED-SR-Version (türkis), gemessen mit einem Array-Spektrometer. Zum Vergleich ist die spektrale Bestrahlungsstärke der vorangegangenen Testversion des LED-SR in dunkelgrün und des Halogen-SR in rot aufgeführt.

Dieser Entwicklungsstand des LED-SR wurde ausführlich charakterisiert (zum Vorgehen bei der Charakterisierung siehe Abschnitt 3.1.2) und die Eignung als Strahlungsquelle für die Anwendung im Gonioreflektometer untersucht [9]. Der LED-SR-Ansatz erwies sich als vielversprechend, denn er behält die Vorteile des bestehenden Systems bei und verbessert die verfügbare Strahlungsleistung im kurzwelligen Spektralbereich im Vergleich zum Halogen-SR, aber auch zur vorangegangenen

Testversion des LED-SR (Abbildung 15). Die höhere Bestrahlungsstärke und Abweichung zur Simulation lassen sich auf die nun verwendete PTFE-Beschichtung der Kugel zurückführen. Dennoch lieferten die Untersuchungen noch Ansatzpunkte für Weiterentwicklungen und Verbesserungen. So zeigten die Messdaten (Anhang IV.ii, Abbildung A 3), dass eine aktive Temperaturregelung notwendig war, um eine temperaturunabhängige zeitliche Stabilität des gemessenen Photostroms zu erreichen. Auch die Homogenität des Strahlprofils, welche ein wichtiger Parameter für die Messungen ist, sollte noch optimiert werden (Anhang IV.ii, Abbildung A 5) [9].

So wurde die finale Version des LED-SR (Abbildung 16) um ein aktives Temperaturkontrollsystem erweitert. Dieses hochpräzise thermoelektrische System steuert die Temperatur von der Rückseite der LEDs. Es verbessert deutlich die temperaturabhängige zeitliche Stabilität des LED-SR im Vergleich zur Vorgängerversion (siehe [10] und Abschnitt 3.1.2.2). Wie im Vorgängermodell befindet sich in der Mitte der Kugel ein interner Reflektor, bestehend aus einer mit Bariumsulfat beschichteten Aluminiumplatte. Dieser Reflexionseinsatz dient als emittierende Fläche des Strahlers und verhindert die direkte Emission durch die Kugel. Seine spezifische Position in der Kugel beeinflusst die Abstrahlcharakteristik [102] und damit die Genauigkeit der Messung. Die optischen und mechanischen Eigenschaften des Reflektors wurden bei dem neuen LED-SR-Modell verbessert. Die beim Vorgängermodell noch vorhandenen Unebenheiten auf der Oberfläche des Reflexionseinsatzes wurden beseitigt und die mechanische Zentrierung optimiert, was zu einer verbesserten Homogenität des Strahlungsfeldes führt, wodurch wiederum die Strahlungsverteilung auf der Probe verbessert wird [10]. Die finale Charakterisierung und die zugehörigen Messungen werden im folgenden Abschnitt beschrieben (Abschnitt 3.1.2.2).

Im Zuge dieser Optimierungen des LED-SR wurden auch die zuvor verwendeten vier einzelnen LEDs durch eine speziell entwickelte Hochleistungs-LED-Platine ersetzt. Diese besteht aus 21 oberflächenmontierten LEDs (SMD-LEDs), die einen ähnlichen Spektralbereich abdecken wie die vorher verwendeten einzelnen LEDs (Emissionsmaxima bei 365 nm, 385 nm und 410 nm). Da die LEDs zu einer Baugruppe gehören, besitzen sie identische elektrische und thermische Anforderungen, wodurch sich eine effektive aktive Temperierung auf einem Platinen-Layout hochpräzise realisieren lässt. Diese High-Power-LED-Platine liefert eine höhere Strahlungsleistung (Abbildung 17) und entspricht in ihrer Zusammensetzung der Simulation in Abbildung 9 c. Die gemessene Strahlungsleistung ist aufgrund der nun verwendeten PTFE-Kugelbeschichtung jedoch größer als in der Simulation. Zudem bietet die LED-Platine Modifikations- und Erweiterungsmöglichkeiten für ein zukünftiges modulares System, in dem LED-Platinen für verschiedene Spektralbereiche ausgetauscht und verwendet werden können (siehe Abschnitt 3.3.2). Hier kann weitere Optimierung sowie Forschung und Entwicklung ansetzen.

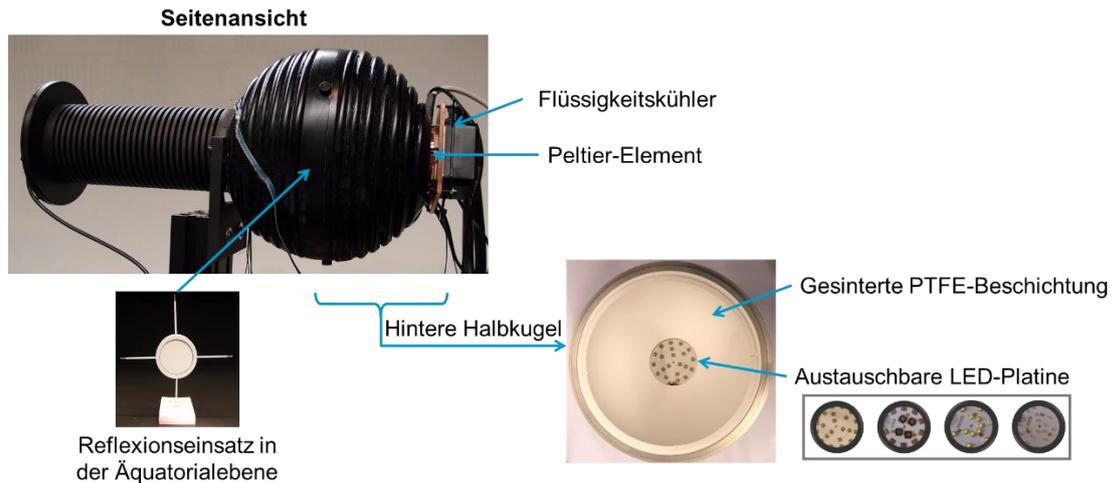


Abbildung 16: Seitenansicht der finalen Version des LED-SR mit dem inneren Reflexionseinsatz in der Äquatorialebene, einer gesinterten PTFE-Kugelwandbeschichtung, austauschbaren Hochleistungs-LED-Platinen (Hauptboard bestückt mit Nichia NVSU233B(T) U 365 nm (x6), U 385 nm (x5), U 405 nm (x10)) und ihrem aktiven Temperaturkontrollsystem [10, 11].

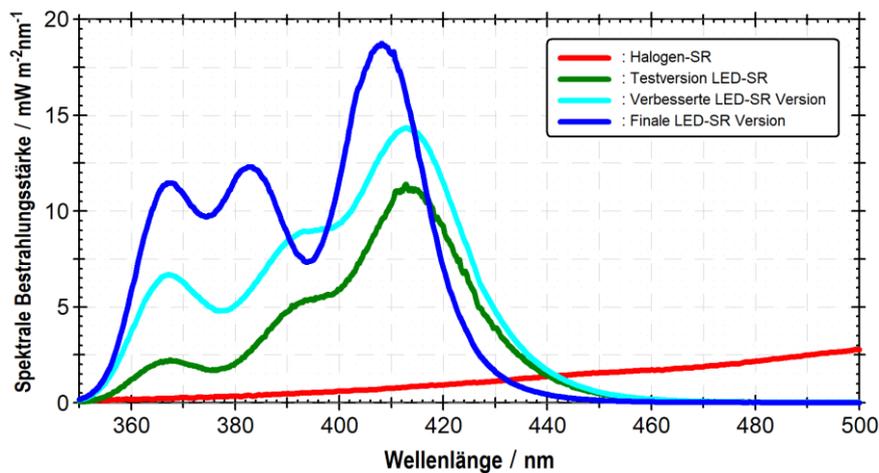


Abbildung 17: Spektrale Bestrahlungsstärke der finalen LED-SR-Version (blau), gemessen mit einem Array-Spektrometer. Zum Vergleich ist die spektrale Bestrahlungsstärke der vorangegangenen verbesserten LED-SR-Version in türkis, der Testversion des LED-SR in dunkelgrün und des Halogen-SR in rot aufgeführt.

Diese finale Version des LED-SR ist in Teilen in den Publikationen[10] und [11] beschrieben und stellt den letzten Stand des LED-SR dar, welcher vor dem Einsatz in den Validierungsmessungen ausführlich charakterisiert wurde. Das wird im folgenden Kapitel genauer erläutert.

3.1.2 Charakterisierung des LED-SR

Dieses Kapitel beinhaltet die Prüfung der Eigenschaften der finalen Version des LED-SR in Bezug auf die spektrale Abdeckung, die zeitliche Stabilität des Photostroms und die räumliche Homogenität des Strahlungsfeldes. Die Charakterisierung der Vorgängerversion sowie ein Vergleich der Vorgängerversion mit der finalen Version betreffend dieser Eigenschaften wurde in [9 bis 11] ausführlich beschrieben. Daraus wurden, wie in Abschnitt 3.1.1 erwähnt, Ansätze zur Optimierung der finalen Version abgeleitet und umgesetzt [10, 11]. Die nachfolgend aufgeführten und diskutierten Eigenschaften des LED-SR stellen den aktuellen Forschungs- und Entwicklungsstand bezüglich der wesentlichen Qualitätskriterien für gonioreflektometrische Messungen dar (siehe Abschnitt 2.2).

3.1.2.1 Spektrale Verteilung

Konstruktionsbedingt zeigt das Spektrum des LED-SR eine Überlagerung der Emissionsmaxima der drei verwendeten SMD-LED-Typen. Das erzeugte Signal weist eine deutlich höhere Bestrahlungsstärke unterhalb von 432 nm gegenüber dem Halogen-SR auf (Abbildung 17). Dies ist vergleichend in Abbildung 18 anhand des gemessenen normierten Photostroms aufgeführt und zeigt, dass die Differenz der beiden Strahlersignale fast 90 % entspricht. Insgesamt weist der LED-SR somit eine verbesserte Signalqualität in Bezug auf das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SRV) gegenüber dem Halogen-SR in diesem Spektralbereich auf [103]. Der visuelle Unterschied der gemessenen Spektren des LED-SR in Abbildung 17 und Abbildung 18 hat seine Ursache in der Erfassung verschiedener Messgrößen (Bestrahlungsstärke, Photostrom) und der Verwendung anderer Messinstrumente (Array-Spektrometer und Gonioreflektometeraufbau) und damit einhergehend anderer Detektoren.

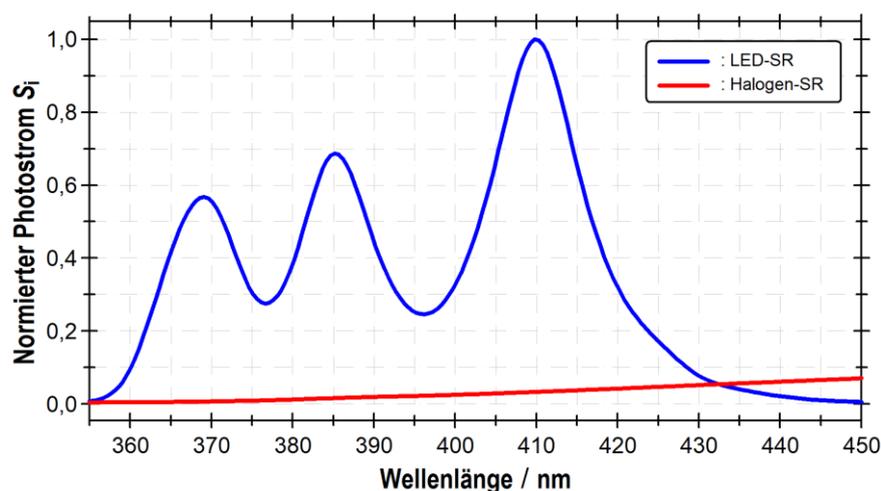


Abbildung 18: Emittierter normierter Photostrom des Halogen-SR (rot) und des LED-SR (blau) gemessen am Gonioreflektometer. Normierung auf den Photostrom des LED-SR bei 410 nm.

3.1.2.2 Stabilität und Alterung

Die finale Version des LED-SR wurde mit einer aktiven Temperaturregelung ausgestattet, da beim Vorgängermodell aufgrund der passiven Temperaturregelung eine signifikante temperaturabhängige Oszillation des Photostroms zu beobachten war (Anhang IV.ii, Abbildung A 3, Abbildung A 4) [9]. Zudem besitzt die Temperatur einen nachweislichen Einfluss auf die Stabilität und das Alterungsverhalten von LEDs [47, 48] (Abschnitt 2.1.2.2). Deshalb wurde eine thermoelektrische Kühlvorrichtung mit Regelung, ein sog. TEC-Controller, in Kombination mit einem Peltier-Element verwendet (Anhang III.iii). Mithilfe zweier Temperaturüberwachungseingänge und einer dazugehörigen Software wurde eine intelligente Proportional-Integral-Differential-(PID)-Regelung realisiert. Diese basiert darauf, dass die Regelgröße, hier Temperatur, mithilfe der Messwerte der Temperatursensoren auf einen vorgegebenen Sollwert eingestellt wird. Dafür wurde ein Temperatursensor auf der LED-Platine und ein weiterer zwischen dem Peltier-Element und dem Flüssigkeitskühler (Abbildung 16) verbaut. So konnte eine präzise Temperierung mit einer Temperaturstabilität der LED-Platine von $\pm 0,02$ °C erreicht werden (Abbildung 19). Die Langzeitmessung über 110 Stunden der breitbandigen Emission des LED-SR mit einer hochpräzisen Si-Photodiode zeigt, dass durch diese aktive Temperaturregelung auch ein stabiler Langzeitbetrieb des LED-SR ermöglicht wird (Abbildung 19).

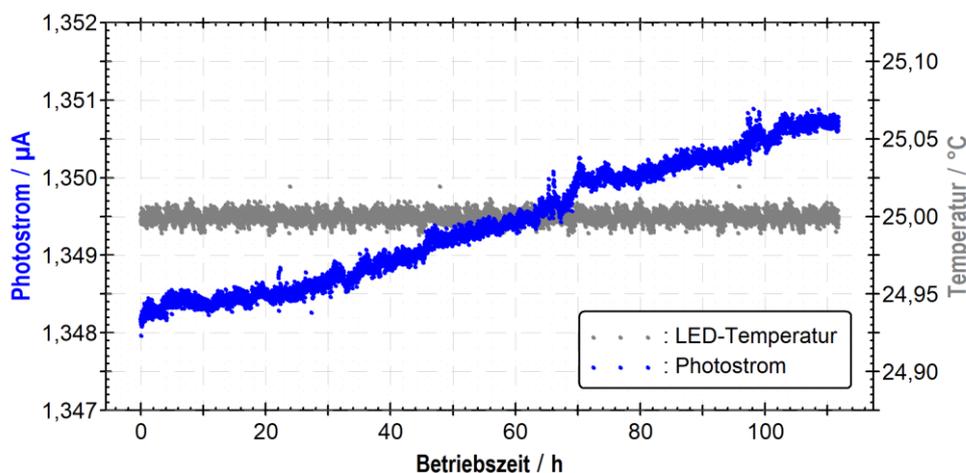


Abbildung 19: Langzeitstabilität des emittierten Photostroms (blau) und der Temperatur (grau) des LED-SR. Der Photostrom wurde mit einer Si-Photodiode aufgezeichnet. Die Temperatur wurde mithilfe des zur Regelung verwendeten Temperaturfühlers auf der LED-Platine gemessen.

Die zu beobachtende kleine Langzeit-Photostromdrift entspricht etwa 0,17 % in 100 h. Ursache für diese Drift ist höchstwahrscheinlich ein Zusammenspiel aus dem LED-Betriebsverhalten und einer geringfügigen Verschlechterung der Kugelbeschichtung, dessen Ausmaß voraussichtlich erst im weiteren Verlauf zunimmt und in die Betrachtung einbezogen werden muss. Trotz spezifischer Beschichtungseigenschaften nimmt der Reflexionsgrad der Beschichtung eines Kugelstrahlers im Allgemeinen mit der Zeit ab (Abbildung 12). Je nach eingesetzter Beschichtung können auch verschiedene Techniken zur Auffrischung angewendet werden wie z.B. die Neubeschichtung von

BaSO₄-Oberflächen oder das Ausbacken von PTFE-Beschichtungen [104]. Auch das Betriebsverhalten der LEDs kann zu der beobachteten langfristigen Drift beitragen. Die LEDs wurden bei 85 % der im technischen Datenblatt spezifizierten maximalen Betriebsparametern (1,4 A Strom in Vorwärtsrichtung und 25 °C Betriebstemperatur) und bei Raumtemperatur betrieben. Abhängig von dem LED-Typ der eingesetzten Materialien sowie den verwendeten Strömen und Stromdichten kann zwischen drei verschiedenen betriebsbedingten Degradationsmechanismen unterschieden werden (siehe Abschnitt 2.1.2.2).

Durch die Zunahme des gemessenen Photostroms (Abbildung 19) kann geschlossen werden, dass die verwendeten LED-Typen zu den Bauelementen gehören, welche zunächst einen Anstieg der optischen Leistung zeigen [18, 47]. Beim Betrieb einer exemplarischen UV-LED mit diesen Eigenschaften wurde der Zustand der Zunahme der optischen Leistung mit einem Zeitrahmen von 50 h- 100 h beobachtet. Als zugrundeliegender Degradationsmechanismus wird vermutet, dass es in der p-dotierten Schicht der LED zu einer Aktivierung der Magnesium-Wasserstoff-Defektkomplexe kommt und daher die Konzentration an ionisierten Magnesium-Akzeptoren zunimmt [18, 57, 71]. Dies führt zu einer effizienteren Löcherinjektion in der aktiven Zone, wodurch wiederum die strahlende Rekombination zunimmt. Dadurch kommt es zu einer Zunahme der optischen Leistung der LED. Dieser Degradationsmechanismus bestimmt die erfasste Langzeit-Photostrommessung der LED-Platine. Literaturangaben zufolge [47, 49, 57] soll dieser Zustand schließlich in eine Abnahme der optischen Leistung übergehen, welcher graduell verläuft und Zeitkonstanten von etwa 1000 h besitzt.

Diese langfristigen beobachteten Veränderungen im gemessenen Photostrom (Abbildung 19) sind zu langsam, um sich signifikant auf Messkampagnen mit einer Messdauer von einigen Tagen oder auf einzelne Messungen mit einer Messdauer von wenigen Minuten auszuwirken. Zudem wird der Einfluss einer linearen Drift durch das Messschema „Strahlungsquelle – Probe – Strahlungsquelle“ bei der Messung und Auswertung berücksichtigt, indem das Signal der Strahlungsquelle vor und nach der Messung des von der Probe reflektierten Signals gemessen und daraus der Mittelwert gebildet wird (siehe 3.2.1. Messdatenerfassung).

Die kurzfristigen Veränderungen im Photostrom zeitlich aufeinanderfolgender Werte liegen bei deutlich unter 0,5 nA und weisen eine Standardabweichung unter 0,3 nA auf. Der Vergleich mit dem Langzeitverhalten des Halogen-SR in Abbildung 20 weist bereits auf eine vergleichbare Stabilität des LED-SR hin, die für die Messung des spektralen Strahldichtefaktors ausreichend ist. In der finalen Messapparatur werden 20 Messwerte mit je einer Integrationszeit von 1 s aufgenommen, wodurch aufgrund der Mittelung noch kleinere Abweichungen der hier gezeigten Werte zu erwarten sind. Somit entsprechen sowohl die kurzfristigen als auch die langfristigen Photostromschwankungen des LED-SR den Stabilitätsanforderungen des Zielaufbaus.

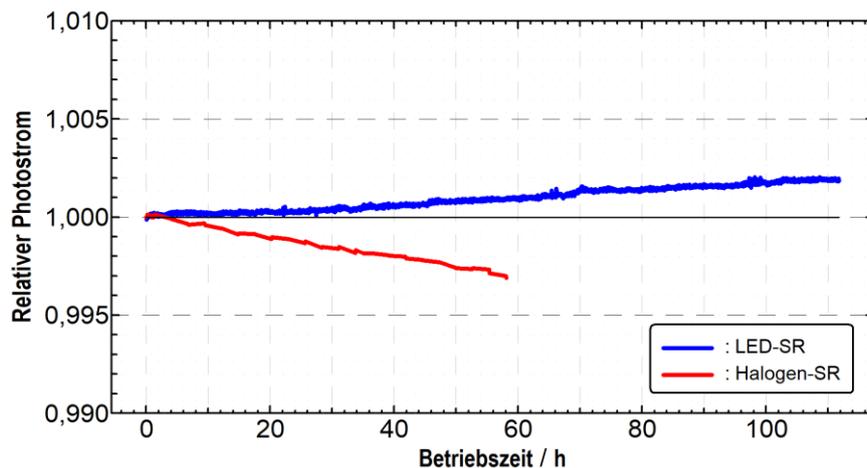


Abbildung 20: Relativ gemessener Langzeit-Photostrom des LED-SR (blau) und des Halogen-SR (rot). Der Photostrom wurde mit einer Si-Photodiode aufgezeichnet.

Die Charakterisierung der Stabilität des LED-SR umfasst auch die Betrachtung der spektralen Stabilität. Diese beschreibt die zeitliche Stabilität des Spektrums und kann anhand der Abweichung des gemessenen Spektrums des LED-SR im Verlauf der Betriebszeit beobachtet werden. Kurzfristige Schwankungen in den Emissionsspektren des Strahlers sollten so gering wie möglich sein. Dies wurde durch den Vergleich von Messungen der Emissionsspektren des LED-SR nach einer Betriebszeit von 1 min, 10 min, 1 h und 100 h nach der Einbrenn- und Temperier-Zeit von 10 min mit je einer Integrationszeit von 120 ms untersucht. Die Abweichung der gemessenen Spektren im signifikanten Spektralbereich (360 nm – 430 nm) des LED-SR betrug bei einer Betriebszeit von bis zu 1 h weniger als $\pm 0,2\%$. Die spektrale Abweichung gegenüber dem Ausgangsspektrum nach 100 h betrug maximal bis zu $\pm 0,5\%$ (Abbildung 21). In Relation zu dem Messzyklus im Gonioreflektometer, welcher ca. 10 Minuten beträgt und aus dem Messschema „Strahlungsquelle – Probe – Strahlungsquelle“ besteht (siehe 3.2.1. Messdatenerfassung), ist diese Veränderung vernachlässigbar.

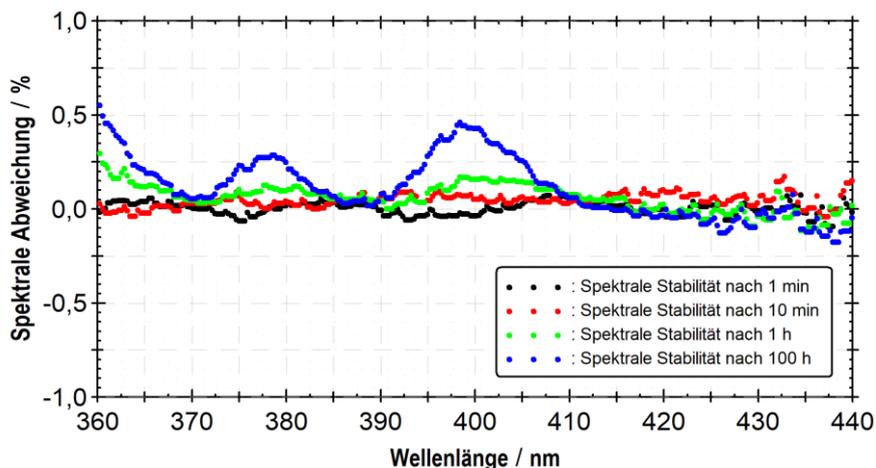


Abbildung 21: Spektrale Stabilität des LED-SR. Ermittelt anhand der Abweichung der Emissionsspektren bei verschiedenen Betriebszeiten zum initialen Spektrum nach der Einbrenn- und Temperier-Zeit von 10 min. Gemessen mit einem Array-Spektrometer.

Bei UV-LEDs konnte gezeigt werden, dass die Intensität des dominanten Maximums, welcher der Band-zu-Band-Rekombination entspricht, im Laufe der Betriebszeit abnimmt. Zeitgleich können sog. parasitäre Lumineszenzen im langwelligeren Bereich auftreten und zunehmen [47, 49, 57]. Dies wird auf die Generierung oder Aktivierung elektrisch aktiver Punktdefekte, vermutlich mit Akzeptoreigenschaften in der aktiven Zone, zurückgeführt. Sie können als nichtstrahlende Rekombinationszentren wirken, wodurch es zur Abnahme der strahlenden Rekombination kommt oder zu defektassistierter Rekombination durch Ladungsträgerakkumulation außerhalb der aktiven Zone [57]. Hierdurch kommt es zu einer Abnahme der Intensität des Emissionsmaximums und zugleich zu einer Zunahme parasitärer Emission um die Maxima.

Darauf würde die beobachtete Restwelligkeit in der ermittelten spektralen Stabilität des LED-SR hindeuten (Abbildung 21). Die Maxima dieser Restwelligkeit spiegeln parasitäre Schultern um die Emissionsmaxima der verwendeten LEDs wider, welche im Rahmen der betriebsbedingten Alterung zunehmen und somit erst in der Aufnahme nach 100 h sichtbar zu erkennen sind. Dies könnte auch mit dem zuvor beschriebenen Degradationsmechanismus und der Erzeugung von Magnesium-Akzeptoren einhergehen, weshalb auch der breitbandig aufgenommene Photostrom zunimmt (Abbildung 19).

Um die Auswirkungen dieser kurzfristigen Fluktuation zu minimieren, erfolgt im endgültigen Aufbau eine 20-fache Aufzeichnung jedes Messpunkts mit einer Integrationszeit von 1 s. Die verbleibende spektrale Fluktuation wird in der Standardabweichung der Messung berücksichtigt und geht somit in die statistische Unsicherheit ein.

3.1.2.3 Reflexionseinsatz und Homogenität des Strahlungsfeldes

Ein homogenes Strahlungsfeld stellt eine weitere entscheidende und notwendige Eigenschaft für das Messprinzip dar. Dies wurde beim LED-SR, wie zuvor beim Halogen-SR [86], in einem zur Bestimmung der räumlichen Homogenität des Strahlungsfeldes bei Kugelstrahlern entwickelten

Scanning-Messaufbau untersucht. Dabei wird der Kugelstrahler auf einem zweidimensionalen XY-Lineartisch montiert. Seine emittierte Strahlungsfläche, welche durch eine Präzisionsblende bestimmt wird und einen Durchmesser von 40 mm besitzt, wird zeilenweise abgefahren und dabei wird je ein 2 mm großer Messfleck aufgenommen. Dies findet unter Verwendung einer 1:1-Abbildung, die von einem Objektiv mit einer Brennweite $f = 500$ mm und einer hochpräzisen Si-Photodiode mit 2 mm Blende erzeugt wird, statt (Abbildung 22).

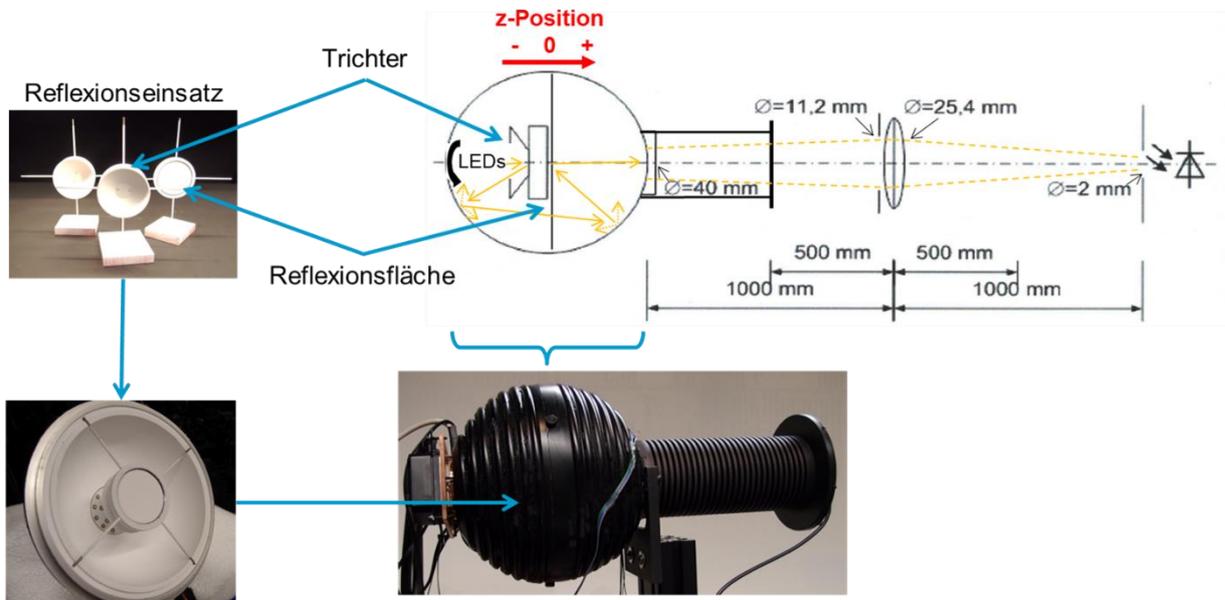


Abbildung 22: Skizze des sog. „Homogenitätsmessaufbaus“, eines zur Bestimmung der Homogenität des Strahlungsfeldes bei Kugelstrahlern entwickelten Scanning-Messaufbaus nach [86]. Gemessen mit einer Si-Photodiode und einem Digitalmultimeter.

Entscheidend für das gemessene Strahlprofil der emittierenden Fläche und somit die Homogenitätseinstellung der Kugelstrahlers ist die Längsposition des Reflexionseinsatzes nahe der Äquatorialebene des Kugelstrahlers, welche nachfolgend als z -Position bezeichnet wird. Die z -Position gibt den Abstand des Reflektors zum Mittelpunkt der Kugel an. Eine positive Verschiebung der z -Position bedeutet eine Verschiebung des Reflektors in Richtung der Präzisionsöffnung der Kugel. Die Position $z = 0$ ist definiert als die Äquatorialebene des Kugelstrahlers. Dementsprechend bedeutet eine negative z -Position eine Verschiebung des Reflektors in Richtung der hinteren Halbschale. Das Messverfahren sieht vor, dass durch eine Variation der z -Position des Reflexionseinsatzes die optimale z -Position gefunden und damit ein gleichmäßiges Strahlungsfeld der emittierenden Fläche eingestellt wird. Vorausgesetzt wird dabei eine ebene Oberfläche des Reflexionseinsatzes, da jegliche Unebenheiten Inhomogenitäten verursachen [9].

Die resultierende zweidimensionale Darstellung der Homogenität der emittierten Strahldichte des LED-SR normiert auf die emittierte Strahldichte in der Mitte der Präzisionsblende ist in Abbildung 23 dargestellt [10, 11]. Die z -Position des Reflexionseinsatzes beträgt dabei $z = -1,96$ mm und ist vergleichbar mit der ermittelten optimalen Position beim Halogen-SR welche $z = -1,94$ mm

entspricht. Unter dieser Bedingung liegt die Homogenität des Strahlungsfeldes des LED-SR in einem Bereich von $\pm 0,2\%$. Dieses Ergebnis ist vergleichbar mit der Homogenität des Halogen-SR, welche in [86] angegeben wird.

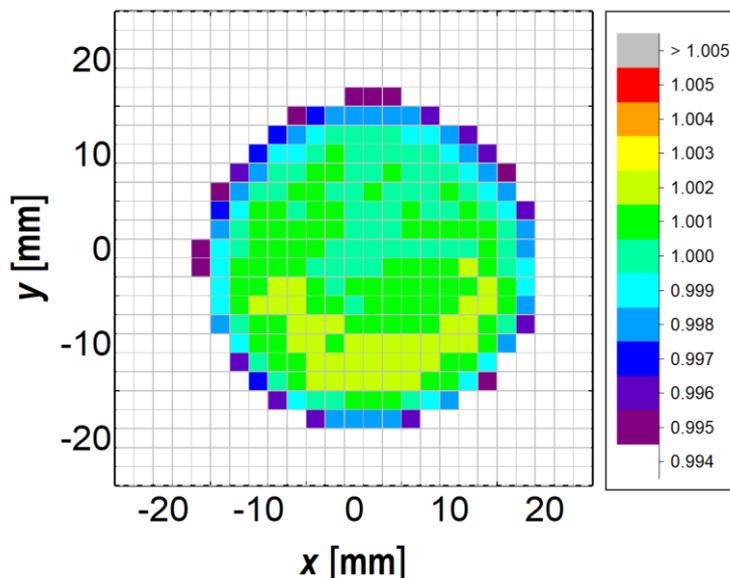


Abbildung 23: Zweidimensionales Homogenitätsdiagramm der emittierten Strahldichte des LED-SR, normiert auf den Wert des Mittelpunkts der Strahlungsfläche [10, 11, 86]. Die Messung erfolgte mit einer Si-Photodiode.

Neben der äquatorialen Positionierung des Reflexionseinsatzes im Kugelstrahler besitzt auch die mechanische Zentrierung, also die Ausrichtung an der optimalen z -Position des Reflektors in der Ebene, einen großen Einfluss auf die Strahlungseigenschaften [105]. Die Qualität der Querzentrierung des Reflexionseinsatzes in der Kugel wurde in einem bildgebenden Messaufbau am Gonioreflektometer untersucht. Diese Positionierung des Reflexionseinsatzes beeinflusst die Strahlungsverteilung des Strahlers an der Probenposition im Gonioreflektometer und hat somit einen direkten Einfluss auf die Messung. Eine Kamera mit einem großen, hochauflösenden CCD-Bildsensor (SBIG STF 8300, Anhang III.iv) und einem Teleobjektiv ($f = 80$ mm) wurde an der Probenposition aufgestellt, mit der Möglichkeit einer Verschiebung auf der Probenebene senkrecht zur Strahlungsquelle (Abbildung 24). Um die Strahlungsverteilung am Probenstandort zu bestimmen, wurde in drei Positionen gemessen: in der Mitte, am rechten und am linken Rand des hypothetischen Messflecks auf der Probe. In diese Positionen wurde die Kamera entsprechend verschoben. Die Positionen werden nachfolgend als 1, 2 und 3 bezeichnet.

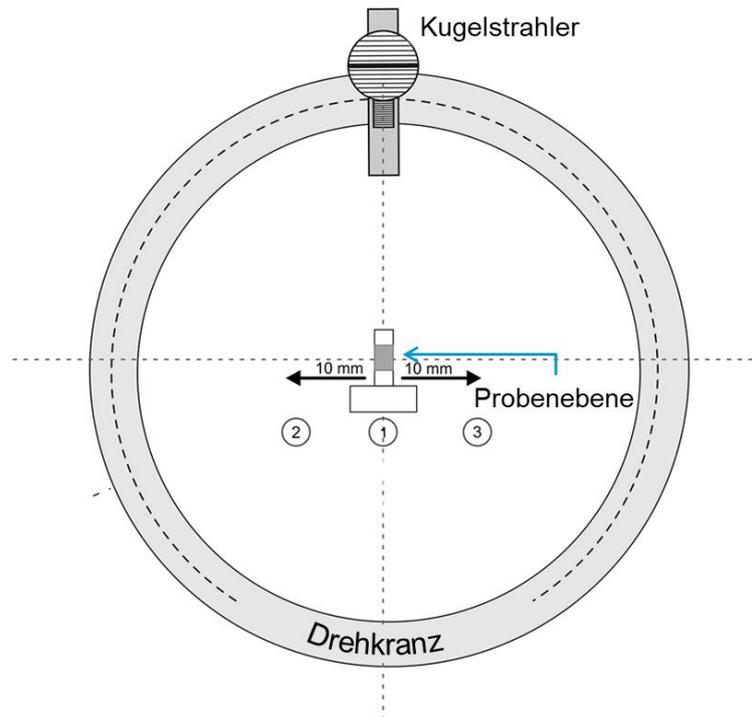


Abbildung 24: Skizze des Messverfahrens zur Bestimmung der mechanischen Zentrierung des Reflexionseinsatzes des LED-SR. Position ①: Kamera zentriert in der Probenebene. Positionen ② und ③: Kamera am rechten bzw. linken Rand des Messflecks (\varnothing 20 mm).

Nach optimaler mechanischer Ausrichtung der Querpositionierung des Reflexionseinsatzes ergab die Aufnahme der Strahlfläche eine homogene Ausleuchtung in allen drei Positionen auf der Probe (Abbildung 25 a). Zum Vergleich ist zusätzlich eine vorausgegangene Aufnahme beim Zentriervorgang aufgeführt, bei welcher ca. 1,8 mm des Halters des Reflexionseinsatzes in Position 2 zu sehen sind (Abbildung 25 b). Selbst eine derart geringe Deplatzierung beeinflusst durch eine fehlerhafte Probenausleuchtung die gemessenen Reflexionseigenschaften, weshalb die Prüfung und Zentrierung des Reflexionseinsatzes zwingend erforderlich ist.

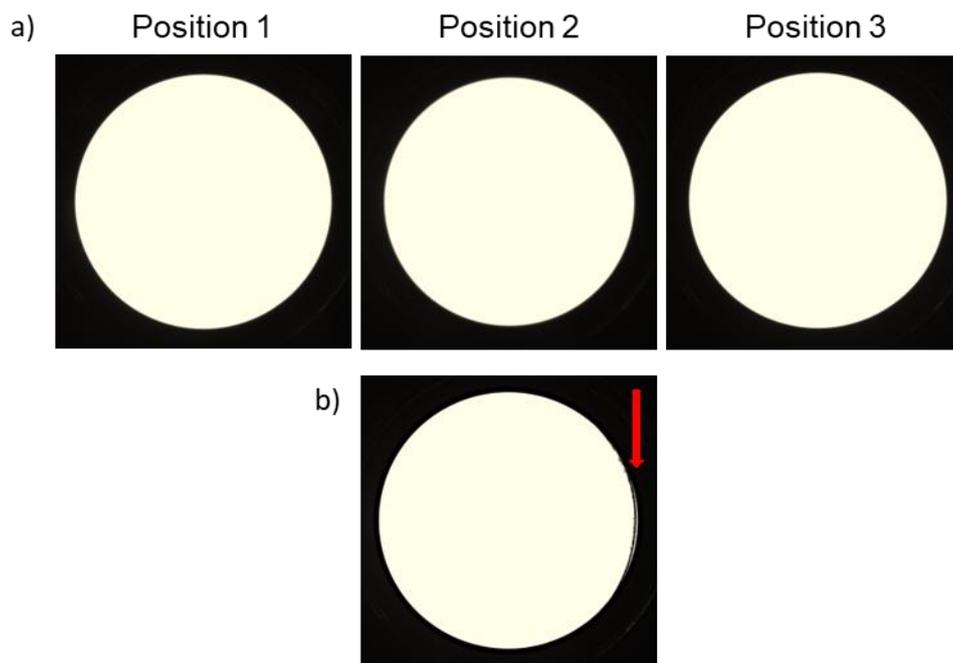


Abbildung 25: Strahlaufnahme des LED-SR a) für alle drei Positionen des hypothetischen Messflecks auf der Probe nach optimaler mechanischer Zentrierung des Reflexionseinsatzes. b) von Position 2 vor der Korrektur der mechanischen Zentrierung des Reflexionseinsatzes. Hier ist der Rand des Halters des Reflexionseinsatzes noch zu erkennen und mit einem roten Pfeil markiert.

Die ausgiebigen Untersuchungen an der finalen LED-SR-Version zeigen, dass die grundlegenden Eigenschaften wie Spektralbereich, Stabilität und Homogenität für den Einsatz als Strahlungsquelle für das Gonioreflektometer erreicht werden. Dabei ist die eingebaute aktive Temperaturregelung maßgeblich für die Realisierung einer temperaturunabhängigen zeitlichen Langzeitstabilität verantwortlich. Auch die Homogenität der Strahlfläche, die einen wichtigen Parameter für die Messung darstellt, ist vergleichbar mit dem derzeit verwendeten Halogen-SR. Quantifizierbare Einflüsse auf die Messung werden ausführlich in dem folgenden Abschnitt 3.2 näher erläutert und beschrieben.

3.2 Messunsicherheitsbetrachtung

Die Betrachtung der Messunsicherheit ist bei Messungen und Auswertungen in der Metrologie unerlässlich. So spielt diese auch in Hinblick auf den absoluten spektralen Strahldichtefaktor eine entscheidende Rolle. Die nachfolgend erläuterte Bestimmung der Messunsicherheit richtet sich nach dem "Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)" des Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) [10] und wird detailliert betrachtet und exemplarisch anhand der in Abschnitt 3.3 beschriebenen drei Keramikproben für die Validierungsmessungen präsentiert (Abschnitt 3.3). Als Modellgleichung für die Messunsicherheitsbetrachtung des absoluten spektralen Strahldichtefaktors wird die nachfolgend in symbolischer Form aufgeführte Gleichung (6) angenommen [12]. Eine detaillierte Beschreibung aller Komponenten ist in Tabelle 1 auf Seite 51 zu finden.

$$\beta(\lambda, R, A_Q, \Delta T, \vec{\Delta}, \vec{\Gamma}, \vec{K}, \vec{C}_{\text{sens}}, \vec{S}, T_f, f_{\text{br}}, f_{\text{bi}}, f_{\text{pol}}, f_{\text{fluo}}) \quad (6)$$

$$= \frac{\pi R^2}{A_Q(\Delta T) \cos(\theta_i(\vec{\Delta}, \vec{\Gamma}, \vec{K}))} \cdot T_f \cdot f_{\text{pol}}$$

$$\cdot \frac{(c_{\text{sens } 11} + c_{\text{sens } 12})S_r \cdot f_{\text{br}} \cdot f_{\text{fluo}} - (c_{\text{sens } 21} + c_{\text{sens } 22})S_{\text{rd}}}{f_{\text{bi}} \cdot (S_{i1} + S_{i2}) - (c_{\text{sens } 31}S_{\text{id1}} + c_{\text{sens } 32}S_{\text{id2}})}$$

Die Modellgleichung ergibt sich aus dem beschriebenen Messverfahren zur Bestimmung des absoluten SRF (Abschnitt 2.2.2 und Gleichung (5)) und wird um Multiplikatoren der Einflussgrößen erweitert, welche nachfolgend detailliert betrachtet und erläutert werden (Tabelle 1, Abschnitt 3.2.1). Zudem ist die Messunsicherheitsbetrachtung als fester Bestandteil eines modularen Auswertungsalgorithmus in MATLAB umgesetzt worden und bietet die Möglichkeit einer Anpassung und Erweiterung auf weitere Strahlungsquellen sowie die Berücksichtigung spezifischer Strahlungsquelleneinflüsse (siehe z. B. 3.3.1.1 und 3.3.2).

3.2.1 Einflussgrößen der Messunsicherheitsbetrachtung des absoluten spektralen SRF

Für eine bestmögliche Abschätzung der Messunsicherheit ist es notwendig, die Einflussfaktoren, die zum Unsicherheitsbudget beitragen, möglichst vollständig zu identifizieren. Die Eingangsgrößen x_i , ihre Unsicherheiten $u(x_i)$ und ihre entsprechenden Empfindlichkeitskoeffizienten $c_{i, \text{GUM}}$ werden nach GUM [13] bestimmt und in der kombinierten Unsicherheitsberechnung berücksichtigt. Demnach ergibt sich im unkorrelierten Fall für die gesamte relative Unsicherheit die Gleichung (7) und für die Empfindlichkeitskoeffizienten c_i der Zusammenhang in Gleichung (8).

$$\frac{u(\beta)}{\beta} = \sqrt{\sum_i (c_{i, \text{GUM}} u(x_i))^2} \quad (7)$$

$$c_{i, \text{GUM}} = \left| \frac{1}{\beta} \frac{\partial \beta}{\partial x_i} \right| \quad (8)$$

Nachfolgend werden die einzelnen Einflussgrößen besprochen, ihre individuellen Beiträge diskutiert und es wird gezeigt, wie spezifische Unsicherheitsbeiträge und ihre Größenordnungen für das Gonioreflektometer ermittelt wurden. Eine Übersicht aller hier aufgeführten Überlegungen ist in [12] zu finden.

Messdatenerfassung

Ein Haupteinflussfaktor ist die Strahlungsquelle. Wie in Abschnitt 3.1.2.2 beschrieben, ist eine gewisse Stabilität der gemessenen Signale S_i (Strahlung der Strahlungsquelle) und S_r (von der Probe reflektierte Strahlung) für eine robuste Messdatenerfassung notwendig. Eine auftretende lineare zeitliche Drift während der Datenerfassung bei einer definierten Wellenlänge und Messgeometrie wird durch den Messablauf berücksichtigt (siehe auch Abschnitt 3.1.2.2). Dazu wird das Signal der Strahlungsquelle vor (S_{i1}) und nach (S_{i2}) der Messung des von der Probe reflektierten Signals (S_r) gemessen und daraus der Mittelwert gebildet. Zusätzlich wird der Einfluss von Instabilitäten durch die Messdatenerfassung selbst reduziert, indem der Photostrom typischerweise durch eine n -fache Mittelung ($n_{i1} = n_{i2} = 10$, $n_r = 20$) mit einer Zeitkonstanten von $dt = 1\text{s}$ aufgenommen wird. Die Unsicherheiten der gemessenen Signale ergeben sich durch die Standardabweichung des Mittelwerts von n Signalmesswerten und werden bei jeder Datenerfassung neu berechnet.

Strahlungsfläche

Weiter definiert die Präzisionsmessblende der Strahlungsquelle die Strahlungsfläche $A_Q(\Delta T)$. Temperaturbedingte Effekte tragen zur Unsicherheit der Strahlungsfläche durch die thermische Ausdehnung der Präzisionsblende bei. Für die Bestimmung der Strahlungsfläche bei unterschiedlichen Temperaturen gilt der in Formel (9) gezeigte Zusammenhang. Dabei entspricht A_{20} der kalibrierten Fläche der Präzisionsblende bei $T_{\text{cal}} = 20\text{ }^\circ\text{C}$, α dem Wärmeausdehnungskoeffizienten des Blendenmaterials und ΔT der Temperaturdifferenz zwischen T_{cal} und der Temperatur der Blende, welche während des Messbetriebs erfasst wird. Insbesondere beim Halogen-SR weist die Aperturtemperatur trotz aktiver Kühlung etwa $45\text{ }^\circ\text{C}$ auf und beeinflusst somit die Strahlungsfläche. Die zugehörigen Unsicherheitsbeiträge für A_{20} und ΔT ergeben sich aus den durchgeführten Kalibrierungen, welche zum Teil in verschiedenen Fachabteilungen der PTB durchgeführt wurden.

$$A_Q(\Delta T) = A_{20}(1 + \alpha\Delta T)^2 \quad (9)$$

Dynamikbereich des Messsignals

Aufgrund des Messprinzips und der Intensität der Strahlungsquelle hat auch der Größenunterschied der gemessenen Signale S_i und S_r einen Einfluss auf die Messunsicherheitsbetrachtung. Diese Signale können sich leicht um vier bis fünf Größenordnungen unterscheiden. Daher muss die Nichtlinearität des Detektionssystems (Elektronik inkl. Detektor), welche hier einer hochpräzisen Si-Photodiode in Kombination mit einem Picoamperemeter entspricht, berücksichtigt werden. Somit ergeben sich die in der Formel (10) und (11) dargestellten Vektoren für die signal- und nichtlinearitätsbezogenen Eingangsgrößen.

$$\vec{S} = (S_r \quad S_{rd} \quad S_{i1} \quad S_{id1} \quad S_{i2} \quad S_{id2}) \quad (10)$$

$$\vec{C}_{\text{sens}} = \begin{pmatrix} c_{\text{sens } 11} & c_{\text{sens } 12} \\ c_{\text{sens } 21} & c_{\text{sens } 22} \\ c_{\text{sens } 31} & c_{\text{sens } 32} \end{pmatrix} \quad (11)$$

In Anlehnung an die Gleichung (5) entsprechen dabei S_r, S_{rd} dem von der Probe reflektierten Signal und dem entsprechenden Dunkelsignal. S_{i1}, S_{id1} stehen für das Signal und das entsprechende Dunkelsignal der Strahlungsquelle, gemessen vor der Messung, und S_{i2}, S_{id2} dementsprechend für das Signal und das entsprechende Dunkelsignal der Strahlungsquelle, gemessen nach der Messung der Probe. Die dazugehörigen Korrekturfaktoren für die Nichtlinearität des Detektionssystems entsprechen $c_{\text{sens } ij}$ und die Korrektur erfolgt durch Multiplikation mit dem entsprechend gemessenen Signal.

Alternativ kann ein Neutralsichtfilter verwendet werden, um das Signal der Strahlungsquelle abzuschwächen, sodass das detektierte Signal der Strahlungsquelle und das von der Probe reflektierte Signal die gleiche Größenordnung besitzen und im selben Detektionsbereich der Elektronik erfasst werden können. In diesem Fall müsste T_f , die Transmission des eingesetzten Neutralsichtfilters, in der Messunsicherheitsbetrachtung berücksichtigt werden.

Die entsprechenden Unsicherheiten für die Nichtlinearitätskoeffizienten des Detektionssystems $c_{\text{sens } ij}$ und die Filtertransmission T_f wurden anhand von Kalibrierungen in den entsprechenden Fachabteilungen der PTB ermittelt.

Öffnungswinkel

Ein weiterer Aspekt, der bei der Strahlungsquelle zu berücksichtigen ist, ist der endliche Öffnungswinkel. Dieser entspricht beim Kugelstrahler (Halogen-SR und LED-SR) einem vollen Winkel von 3° (Abschnitt 2.2.2). Je nach betrachteter Geometrie sind die Teilstrahlen aufgrund der Strahldivergenz und der Tatsache, dass der Messbereich in den meisten Fällen eine Ellipse auf der Probe bildet, geometrisch nicht exakt gleich. Dieser Einfluss nimmt mit steileren Einfallswinkeln zu. Für

Standardgeometrien, zu welcher auch die hier vorgestellte Geometrie der Validierungsmessungen (Abschnitt 3.3) zählt, ist dieser Effekt jedoch vernachlässigbar.

Wellenlänge

Eine weitere wichtige Einflussgröße stellt die Wellenlänge dar. Der Einfluss erstreckt sich von Bereichen, in denen der Reflexionsgrad der Probe stark von der Wellenlänge abhängt, über den Einfluss des stark strukturierten Spektrums des LED-SR (Abschnitt 3.1.2.1). Deshalb umfasst die Einflussgröße der Wellenlänge λ die Unsicherheit der Wellenlängenpräzision $\Delta\lambda_p$ und die der Wellenlängengenauigkeit mit spektraler Bandbreite $\Delta\lambda_b$.

Erstere basiert auf der Wellenlängenpräzision des verwendeten Monochromators und ist von der für die Messung eingesetzten Strahlungsquelle unabhängig. Die Wellenlängenunsicherheit für $\Delta\lambda_p$ kann dem Kalibrierzertifikat des Instruments entnommen werden.

Die für eine Messung verwendete spektrale Bandbreite des Monochromators hängt von dem eingestellten Eingangsspalt und dem eingesetzten Gitter ab. Je nach Einstellungen kann es zu einer Verbreiterung von scharfen spektralen Merkmalen führen. Da am Gonioreflektometer typischerweise mit konstanten Monochromator-Einstellungen und einer Bandbreite von 3 nm gemessen wird, beeinflusst hauptsächlich das Spektrum des verwendeten Strahlers die Wellenlängengenauigkeit mit spektraler Bandbreite. Dies spielt insbesondere beim Einsatz des LED-SR eine wichtige Rolle, da dieser ein strukturiertes Spektrum (Abschnitt 3.1.2.1) aufweist. Im Gegensatz dazu ist das Spektrum des Halogen-SR glatt und besitzt nur eine schwache Wellenlängenabhängigkeit des Ausgangssignals. Somit ist der Einfluss von $\Delta\lambda_b$ beim Halogen-SR klein, wohingegen der Einfluss bei dem LED-SR verglichen damit größer ausfällt. Eine vergleichende Darstellung ist in Abschnitt 3.3.1.1 aufgeführt.

Die Wellenlängengenauigkeit mit spektraler Bandbreite $\Delta\lambda_b$ kann durch eine Multiplikation der gemessenen Signale mit dem Korrekturfaktor f_{bx} unter Berücksichtigung der verwendeten Bandbreite korrigiert werden. Er wird als Korrekturfaktor f_{bi} auf das gemessene Signal der Strahlungsquelle und als f_{br} auf das gemessene, von der Probe reflektierte Signal angewandt. Die Bestimmung des Korrekturfaktors f_{bx} kann mit verschiedenen gleichwertigen Ansätzen durchgeführt werden [106 bis 109]. Im Zuge der hier betrachteten Auswertung wurde der Taylor-Reihen-Ansatz mit der Annahme einer dreieckigen Bandpassfunktion gewählt. In diesem Fall kann eine mathematische Vereinfachung angewandt werden, indem nur die Terme bis zur zweiten Ableitung berücksichtigt werden [106, 108], wodurch der Korrekturfaktor f_{bx} durch die Gleichung (12) beschrieben wird und von der verwendeten spektralen Bandbreite $\Delta\lambda$ und dem gemessenen Signal \vec{S} abhängt.

$$f_{bx}(\vec{S}, \Delta\lambda) = 1 - \frac{1}{12} \cdot \frac{\Delta\lambda^2}{\vec{S}(\lambda)} \cdot \frac{\partial^2 \vec{S}(\lambda)}{\partial \lambda^2} \quad (12)$$

Für diskrete Messsignale wie hier beispielsweise für das Messsignal $S_i(\lambda) = S_{i1}(\lambda) - S_{id1}(\lambda)$ eines Emissionsmaximas des LED-SR aufgeführt, kann die zweite Ableitung in Gleichung (12) durch lineare Interpolation (13) angenähert werden. Bei Verwendung der typischerweise eingesetzten Bandbreite von 3 nm ergibt sich der Korrekturfaktor f_{bi} bei 380 nm mit 0,970747226258768 (Beispielrechnung (14)): Daraus folgt durch Multiplikation mit dem gemessenen Messsignal und anschließender Differenzbildung damit ein Korrekturbetrag des Messsignals von 0.573 nA (siehe auch Abbildung 35).

$$f_{bi}(S_i(\lambda), \Delta\lambda) = 1 - \frac{1}{12} \cdot \frac{\Delta\lambda^2}{\vec{S}(\lambda)} \cdot \frac{S_i\left(\lambda - \frac{\Delta\lambda}{2}\right) - 2S_i(\lambda) + S_i\left(\lambda + \frac{\Delta\lambda}{2}\right)}{\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right)^2} \quad (13)$$

Beispielrechnung (14):

$$\begin{aligned} f_{bi}(S_i(380 \text{ nm}), 3 \text{ nm}) &= 1 - \frac{1}{12} \cdot \frac{9 \text{ nm}^2}{S_i(380 \text{ nm})} \cdot \frac{S_i(378,5 \text{ nm}) - 2S_i(380 \text{ nm}) + S_i(381,5 \text{ nm})}{2,25 \text{ nm}^2} \\ &= 1 - \frac{1}{12} \cdot \frac{9 \text{ nm}^2}{1,96001048501866 \cdot 10^{-8} \text{ A}} \\ &\quad \cdot \frac{1,579057222741 \cdot 10^{-8} \text{ A} - 2 \cdot 1,96001048501866 \cdot 10^{-8} \text{ A} + 2,5129709770424 \cdot 10^{-8} \text{ A}}{2,25 \text{ nm}^2} \\ &= 0,970747226258768 \end{aligned}$$

Polarisationseffekte

Auch die zu untersuchende Probe beeinflusst die Messunsicherheit des SRF. Neben der Oberflächenbeschaffenheit und der Rauigkeit beeinflussen insbesondere Polarisierungseffekte und Fluoreszenzeigenschaften die Messung und müssen in geeigneter Weise in der Messunsicherheitsbetrachtung berücksichtigt werden. Reflexionsnormale können Strahlung je nach bidirektionaler Geometrie und Wellenlänge stark polarisiert reflektieren, was für matte Keramiken gezeigt wurde [88, 89]. Auch bei Bestrahlung mit unpolarisierter Strahlung kann selbst bei Proben mit einem Quasi-Lambert'schen Reflexionsverhalten die reflektierte Strahlung stark polarisiert sein. Solche Polarisierungseffekte müssen für jede Probe untersucht und in geeigneter Weise in der Messunsicherheitsbetrachtung berücksichtigt werden. Die Abschätzung von Polarisierungseffekten, die bei Reflexionsmessungen auftreten können, kann gemäß [90, 110, 111] durchgeführt werden. Die Polarisationsparameter können experimentell bestimmt werden, indem die Polarisation der Bestrahlungs- und Detektionsrichtung kontrolliert und der SRF in verschiedenen festen Polarisationszuständen bestimmt wird. Da die Emission des Kugelstrahlers als unpolarisiert angesehen werden kann [89](Abschnitt 3.3.2.2), besteht eine Möglichkeit zur Ermittlung der Polarisierungseffekte einer Probe darin, die Stokes-Parameter im reflektierten Signal zu messen und ihre Beiträge zu bestimmen [90]. Zu diesem Zweck kann ein spezieller Polarisationsanalysator in den Detektionspfad

der Apparatur eingebaut werden (Abbildung 7). Er besteht aus einer Viertel-Wellenplatte, die senkrecht zum Strahlengang in $\Delta\vartheta = \frac{\pi}{8}$ -Schritten gedreht werden kann und einem in Bezug auf das nachfolgende Detektionssystem festen linearen Polarisator ($\varphi = 0$). Mit Hilfe einer 8-Schritt-Technik [112, 113] können die normierten Stokes-Parameter für den einfallenden und reflektierten Strahl bei jeder Geometrie und jeder Wellenlänge bestimmt werden. Aus diesen Parametern und ihren jeweiligen Unsicherheiten lässt sich eine detaillierte Abschätzung des Einflusses der Polarisation auf die Unsicherheit der SRF ableiten. Die Bestimmung der Stokes-Parameter ist mindestens einmal je Probenmaterial, bzw. Probe erforderlich, um eine Abschätzung der Größe und des Einflusses der Polarisationseffekte auf die Messergebnisse zu erhalten. Der Nachteil dieser Methode ist, dass sich die Dauer der Messung erheblich verlängert. Bei Geometrien mit steilen Einfalls- und/oder Reflexionswinkeln und bei der Behandlung spezieller Proben wie z. B. Effektpigmentproben ist es unabdingbar, die vollständigen Stokes-Parameter für fast jede Wellenlängenposition für eine genaue Unsicherheitsanalyse zu bestimmen. Der Einfluss der Polarisation ist gering für Standardproben, also Proben aus Referenzmaterialien welche standardmäßig als Kalibrierstandards eingesetzt werden wie z.B. Bariumsulfat, Spectralon und bestimmte Keramiken und für häufig verwendete Geometrien wie beispielweise $45^\circ:0^\circ$ oder $0^\circ:45^\circ$. Für üblicherweise verwendete Weißstandards ist die durch den Stokes-Parameter M_0 beschriebene lineare Polarisation in Bezug auf die Hauptachse ($0^\circ/90^\circ$) die dominierende Größe [89]. Wenn, wie in dem Fall der Validierungsmessungen (Standardprobe und Geometrie $45^\circ:0^\circ$), beide Faktoren zutreffen und der Einfluss der Polarisation gering ist, kann ein alternatives Verfahren zur Korrektur von Abweichungen im resultierenden SRF angewandt werden. Dieser vereinfachte Ansatz ist deutlich schneller und effektiver, denn die Polarisation wird nicht ausdrücklich durch die Ermittlung aller Stokes-Parameter bei der Messung berücksichtigt, sondern basiert auf dem Einfluss der Polarisation auf den gemessenen SRF. Es lässt sich der Zusammenhang in Gleichung (15) herleiten [90, 110, 111]. Dabei entspricht β_{tr} dem zu bestimmenden unpolarisierten SRF, während β_m den tatsächlich gemessenen, durch Polarisationseffekte beeinflussten SRF darstellt. In der fortgesetzten Herleitung der Gleichung (15)[90, 110, 111] resultiert daraus, dass der Grad des Polarisationseinflusses für das System aus dem Grad des Polarisationseinflusses der Einstrahlung in Bezug auf die s-Polarisationsebene P_1 und dem Grad der Polarisationseinflusses durch das Detektionssystem P_2 bestimmt wird. Unter Berücksichtigung, dass die Strahlung des Kugelstrahlers unpolarisiert ist, muss nur der Einfluss einer polarisierten Detektion betrachtet werden. Somit hängt die relative Differenz nur von der durch die Reflexion an der Probe induzierten Polarisation und von der Polarisationsempfindlichkeit der Detektionsstrecke, bzw. dem Detektionssystem ab. Die resultierende wellenlängenabhängige Polarisationsempfindlichkeit des Detektionssystems kann durch Bestimmung der maximalen Polarisationsmodulation mit einem linearen Polarisator bei unpolarisierter Bestrahlung bestimmt werden. Die Abweichung des SRF und damit der Polarisationseffekt skaliert linear mit dem Produkt aus dem Polarisationsgrad P_2 des Detektionspfads und dem Stokes-Parameter M_0 für lineare s- oder p-Polarisation.

$$\Delta\beta = \frac{\beta_m - \beta_{rr}}{\beta_{rr}} = -P_2 \cdot M_0 = -\frac{S_s - S_p}{S_s + S_p} \cdot M_0 \quad (15)$$

Somit ergibt sich eine vereinfachte Abschätzung unter Anwendung von Gleichung (15), wodurch eine vollständige Polarisationsanalyse vermieden werden kann. Dieser Ansatz wird auch für die Abschätzung der Unsicherheit der Polarisation der untersuchten Keramikproben (Abschnitt 3.3) verfolgt. Hierfür sind nur die Polarisationsempfindlichkeit im Detektionspfad des Geräts P_2 und die Polarisations-eigenschaft M_0 der Probenklasse in Bezug auf Geometrie und Wellenlänge zu bestimmen. In dem in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Gonioreflektometer wird P_2 hauptsächlich durch das verwendete Gitter des Doppelmonochromators beeinflusst.

Zusätzlich ergeben sich eine physikalische Bilddrehung und auftretende Polarisationsänderungen im Detektionspfad durch die verwendeten Spiegel. Die resultierende wellenlängenabhängige Empfindlichkeit des Detektionssystems kann durch Bestimmung der maximalen Polarisationsmodulation mit einem linearen Polarisator und unpolarisierter Bestrahlung ermittelt werden. Die Polarisationsempfindlichkeit im Detektionspfad P_2 als Funktion der Wellenlänge für den sichtbaren Spektralbereich des hier eingesetzten Gonioreflektometers liegt in der Größenordnung von $\pm 0,15$ und ist in [12] aufgeführt. Anhand Gleichung (15) kann ein Korrekturfaktor f_{pol} zur Berücksichtigung von Polarisations-effekten abgeschätzt werden, welcher der Differenz $\Delta\beta$ entspricht und für die hier dargestellten Keramikproben (Abschnitt 3.3) als $|\Delta\beta| = 5 \times 10^{-4}$ angenommen werden kann [12]. Diese durch die Anwendung der vereinfachten Polarisationsbehandlung eingeführte Korrektur liegt in der Größenordnung der Gesamtunsicherheit, weshalb sie auf dem vorgestellten Unsicherheitsniveau zu berücksichtigen ist. Eine weiterführende Betrachtung von Polarisations-effekten in Reflexionsmessungen ist in Abschnitt 3.3.2.2 aufgeführt.

Fluoreszenzeffekte

Ein weiterer Probeneinfluss sind Fluoreszenzeffekte. Es ist bekannt, dass einige weiße Referenzmaterialien fluoreszierende Eigenschaften zeigen, wenn sie UV- und kurzwelliger sichtbarer Strahlung ausgesetzt werden [99] (Abschnitt 3.3.2.1). Die Fluoreszenz ist materialspezifisch, daher muss der durch sie induzierte Fehler bei der Messung der diffusen Reflexion für die jeweilige zu prüfende Probe berücksichtigt werden [100]. So fluoresziert insbesondere die für die Validierungsmessungen verwendete weiße, matte Keramikprobe (Abschnitt 3.3) in Banden von 500 nm bis 600 nm und 700 nm bis 900 nm, wenn sie mit kurzwelliger sichtbarer bis Nah-UV-Strahlung bestrahlt wird [114]. Um diese Fluoreszenz bei der Unsicherheitsberechnung zu berücksichtigen, kann ein Fluoreszenz-korrekturfaktor f_{flu} bestimmt werden. Dieser wurde in der vorliegenden Arbeit mithilfe des LED-SR ermittelt. In Kombination mit Interferenzfiltern wurden einzelne Wellenlängenbereiche der breitbandigen LED-SR-Strahlung in 10-nm-Schritten ausgewählt, um eine Schätzung der Fluoreszenzmenge zu erhalten, die von der Probe bei einer bestimmten Wellenlänge und Intensität

angeregt wird. Die Fluoreszenz der Probe bei diesen Anregungswellenlängen wurde mit einem empfindlichkeitskorrigierten CCD-Sensor aufgenommen. Daraus wurde eine probenspezifische Fluoreszenzkurve als Funktion der Anregungswellenlänge und -intensität ermittelt. Diese relative, auf die Anregungswellenlänge normierte Fluoreszenz ist beispielhaft für die weiße matte Keramikprobe für einige Anregungswellenlängen von 360 nm bis 430 nm dargestellt (Abbildung 26). Der Fluoreszenzeffekt der Probe nimmt in Richtung längerer Anregungswellenlänge zu.

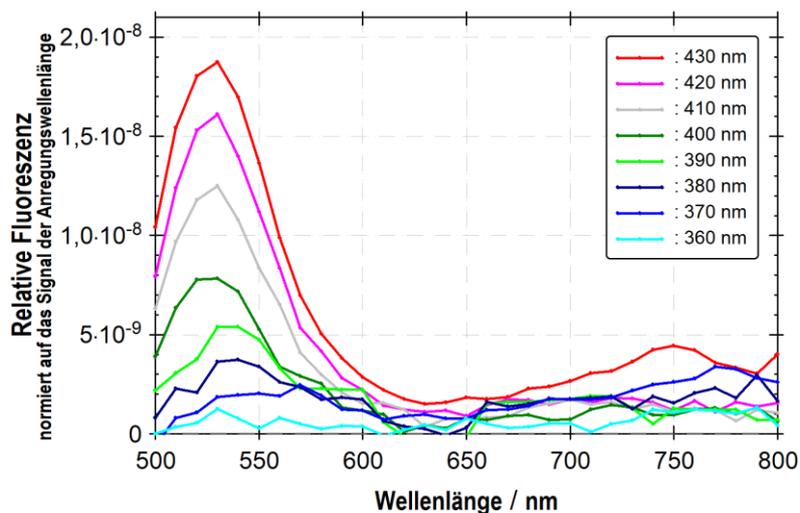


Abbildung 26: Relative Fluoreszenz einer weißen matten Keramik, jeweils normiert auf die Anregungswellenlänge von 360 nm bis 430 nm.

Um auf die für die Messunsicherheitsbetrachtung relevanten absoluten entsprechenden Photostromwerte schließen zu können, müssen die normierten Fluoreszenzdaten in Bezug zu der jeweiligen Strahlung der Anregungswellenlänge während der Messung gesetzt werden. Zudem sollte zwischen zwei Einflüssen des Fluoreszenzverhaltens einer Probe unterschieden werden, welche beide in geeigneter Weise in den SRF-Messungen zu berücksichtigen sind. Erstens muss der nachgewiesene Fluoreszenzanteil (Abbildung 26) in dem Spektralbereich, in dem Fluoreszenz detektiert wurde, von dem gemessenen diffusen Reflexionssignal der Probe subtrahiert werden, da die ermittelte probenspezifische Fluoreszenz zusätzlich zum "echten" diffusen Reflexionssignal gemessen wird. Zweitens entspricht die ermittelte probenspezifische Fluoreszenz in Abhängigkeit von der jeweiligen Anregungswellenlänge genau dem Signal, das die Fluoreszenz anregt und daher im diffusen Reflexionssignal der Probe bei der spezifischen Anregungswellenlänge nicht mehr im gleichen Anteil vorhanden ist. Daher muss die gemessene Fluoreszenz bei jeder Anregungswellenlänge integriert und zum entsprechenden Messsignal der Anregungswellenlänge addiert werden. Dabei wird keine Annahme über die Abstrahlung gemacht, sondern der Fluoreszenzeinfluss der jeweiligen Probe auf das Messsignal betrachtet.

Der Unsicherheitsbeitrag der Fluoreszenzkorrektur f_{fluo} ergibt sich durch die Differenz des SRF bei Anwendung der Korrektur im Vergleich zu den unkorrigierten Werten. Der ermittelte Unsicherheitsbeitrag für die Fluoreszenz der weißen Keramikprobe liegt im Anregungsspektralbereich von 360 nm bis 430 nm bei $4,4 \times 10^{-4}$ und im Fluoreszenzspektralbereich über 500 nm bei max. 3×10^{-5} . Der

Fluoreszenzeffekt für die schwach reflektierende rote und blaue Probe wurden ebenfalls untersucht, jedoch ist dieser deutlich geringer und kann vernachlässigt werden.

Geometrische Faktoren

Weitere für die akkurate Realisierung der Messung entscheidende Einflussparameter sind die geometrischen Faktoren. Die tatsächliche Messgeometrie kann aus verschiedenen Gründen von der Nenngeometrie abweichen. Hierzu zählt die Probenpositionierung und ihre Reproduzierbarkeit, die Probenausrichtung sowie die Nichtplanarität der Probenoberfläche. Die Ausrichtung der Probenoberfläche relativ zur optischen Achse erfolgt mithilfe eines Streifenprojektionsverfahrens. Bei dieser optischen Messmethode wird die Verformung eines projizierten Streifenmusters ausgewertet, um die Form von Oberflächen zu rekonstruieren [115]. Es liefert nicht nur Informationen über die Ausrichtung der Probe, sondern auch über die Topographie der Probenoberfläche, die nicht vollkommen eben ist. In Abbildung 27 ist exemplarisch die Aufnahme der Ausrichtung der blauen Keramikprobe gezeigt.

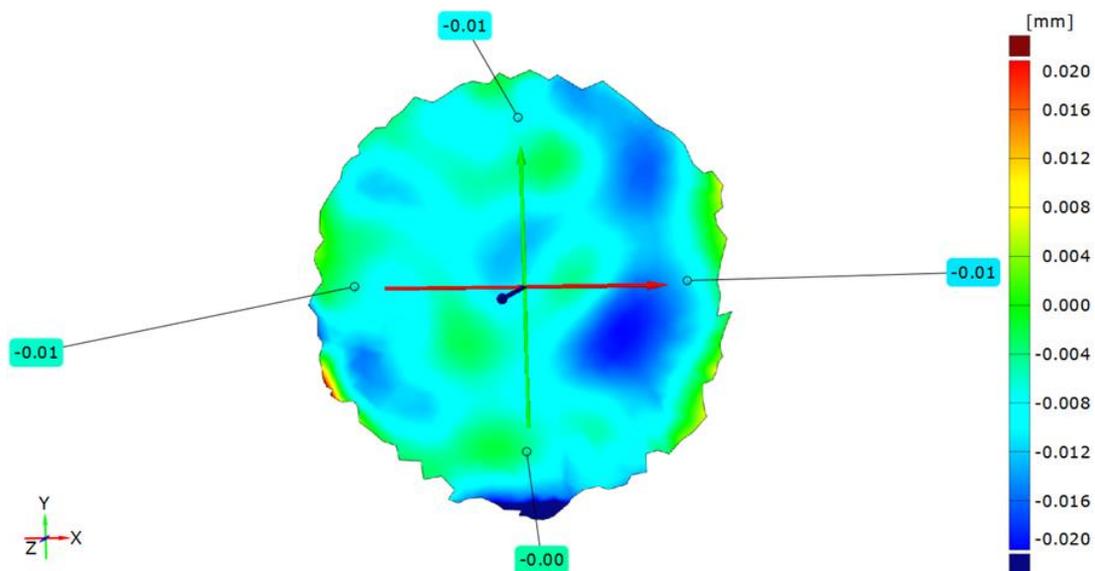


Abbildung 27: Exemplarische Darstellung der ermittelten Topographie der Probenoberfläche, gezeigt anhand der blauen matten Keramikprobe in feiner ($\pm 0,02$ mm) Auflösung. Aufnahme zeigt nur den Probenausschnitt aus dem Sichtfeld des verwendeten Streifenlichtprojektors von GOM Metrology.

Aufgrund einer möglichen Struktur und Welligkeit der Oberfläche erfahren verschiedene Teile des einfallenden Strahls unterschiedliche Einfallswinkel und Reflexionswinkel, die von den Nennwinkeln abweichen (vgl. Abschnitt 2.2). Unter Anwendung des Microfacettenmodells, welches zur Modellierung der Lichtreflexion an rauen Oberflächen [70] eingeführt wurde und sich für viele reale Oberflächen bewährt hat [116], wird der spektrale Strahldichtefaktor als Integral über diese "Teilgeometrien" betrachtet (Abschnitt 2.2). Daraus ergibt sich, dass die Oberflächentopographie und die daraus resultierende begrenzte Winkelgenauigkeit ebenfalls zur Unsicherheit beitragen können.

Durch den in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Messaufbau entspricht das Sichtfeld des Detektors auf der Probenoberfläche einem Kreis mit 20 mm Durchmesser, der um die Projektion oder den Kosinus des

Detektionswinkels der bidirektionalen Geometrie verlängert wird. Daher trägt nur die Oberflächentopographie in diesem Bereich zur Unsicherheit bei. Bei Standardgeometrien und der Messung von Reflexionsnormalen mit einer glatten und ebenen Oberfläche ist der Einfluss der Oberflächenkrümmung gering und kann durch die Ausrichtungsunsicherheit abgeschätzt werden. Dies entspricht auch den Gegebenheiten der in dieser Arbeit untersuchten Proben (Abschnitt 3.3). In anderen Spezialfällen, bei außergewöhnlichen Geometrien und unebenen Proben kann der Einfluss deutlich größer sein und muss in diesem Fall gesondert betrachtet und abgeschätzt werden.

Um die Messgeometrien im Messablauf umzusetzen, müssen der Drehwinkel der Probe Δ , der Kippwinkel der Probe Γ und die Winkelposition des Drehtisches K aus der Messgeometrie umgerechnet werden (Abbildung 8) [117]. Die Winkel sind in gerätespezifischen Koordinaten angegeben und können je als Summe mehrerer Beiträge beschrieben werden (Formeln (16) - (18)). Dabei entspricht Δ_0, Γ_0, K_0 jeweils dem Nennwinkel, $\Delta_{\text{stat}}, \Gamma_{\text{stat}}, K_{\text{stat}}$ der durch die endliche Genauigkeit der Winkeleinstellung verursachten Abweichung, $\Delta_{\text{syst}}, \Gamma_{\text{syst}}, K_{\text{syst}}$ der durch die Fehlausrichtung des Instruments verursachten Abweichung und $\Delta_{\text{just}}, \Gamma_{\text{just}}, K_{\text{just}}$ der durch Fehlausrichtung und Nichtplanarität der Probe verursachten Abweichung.

$$\Delta = \Delta_0 + \Delta_{\text{stat}} + \Delta_{\text{syst}} + \Delta_{\text{just}} \quad (16)$$

$$\Gamma = \Gamma_0 + \Gamma_{\text{stat}} + \Gamma_{\text{syst}} + \Gamma_{\text{just}} \quad (17)$$

$$K = K_0 + K_{\text{stat}} + K_{\text{syst}} + K_{\text{just}} \quad (18)$$

Die Unsicherheiten, die mit den Instrumentenwinkeln Δ, Γ, K verbunden sind, werden experimentell bestimmt. Zur Bestimmung der statistischen Komponenten $\Delta_{\text{stat}}, \Gamma_{\text{stat}}, K_{\text{stat}}$, wird ein Spiegel am Roboterarm an der Probenposition angebracht und die Ablenkung eines Laserstrahls erfasst, wenn die Instrumentenwinkel wiederholt geändert und eingestellt werden. So ergaben z.B. Strahlablenkungsuntersuchungen eines Laserspots auf eine 5 m entfernte Wand eine Abweichung von maximal ± 1 mm. Dies entspricht einem Einfallswinkel auf die Wand von 43° bzw. $\pm 0,73$ mm. Hieraus ergeben sich die Winkelunsicherheit von 0,0843 mrad (Formel (19)), wobei der Faktor $1/\sqrt{3}$ die rechteckige Verteilung der Eingangsgröße berücksichtigt.

$$u(\Delta_{\text{stat}}) = u(\Gamma_{\text{stat}}) = u(K_{\text{stat}}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{0,73 \text{ mm}}{5000 \text{ mm}} = 0,0843 \text{ mrad} \quad (19)$$

Im Gegensatz zur speziellen Topographie der Probenoberfläche kann ein globaler Keilwinkel für eine Richtung durch den Ausrichtungsprozess kompensiert werden. Der entsprechende Wert, der den Unsicherheitsbeitrag der Ausrichtungsgenauigkeit darstellt, ist abhängig von der betrachteten Probe. Für die hier gezeigten Keramikproben (Abschnitt 3.3) wird dieser Beitrag zur Ausrichtungsgenauigkeit auf $u(\Delta_{\text{just}}) = u(\Gamma_{\text{just}}) = 0,35$ mrad geschätzt. Aufgrund der Integration des Messsignals über einen 20 mm

großen Messfleck auf der Probe kann eine Fehlausrichtung der Winkelposition des Drehkranzes K_{just} , welche sich in der Größenordnung von unter 0,01 mm bewegt, vernachlässigt werden.

Der Abstand R zwischen der Präzisionsapertur der Strahlungsquelle und der Probenoberfläche geht ebenfalls direkt in die Berechnung des SRF ein. Dieser wird mithilfe einer kalibrierten Innenmessschraube ermittelt und der Unsicherheitsbeitrag durch Standardabweichung des Mittelwerts von n Wiederholungsmessungen abgeschätzt.

Weitere Einflussgrößen

Weitere Einflussgrößen, welche hier vollständigshalber aufgelistet werden, sind die Umgebungstemperatur und damit auch die Temperatur der Probe. Da die Temperatur im Messraum aktiv auf 23 °C eingestellt wird, ist davon auszugehen, dass auch die Probe auf 23 °C temperiert wird und somit die Temperatur als konstant betrachtet werden kann. Auch der Kalibrierzustand aller eingesetzten Gerätschaften ist eine Einflussgröße, welche durch stetige Kontrollen und Rekalibrierungen überprüft und aktualisiert wird. Das Messprogramm und die Auswertung beeinflussen ebenfalls das Messergebnis, weshalb die Soft- und Hardware ständiger Qualitätskontrolle und Begutachtung unterliegt. Demnach können diese Einflussgrößen vernachlässigt werden.

Zusammenfassend sind alle zuvor vorgestellten relevanten Beiträge, die in dieser Arbeit experimentell und theoretisch ermittelt wurden, in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Aufführung der berücksichtigten Unsicherheitsbeiträge für die Bestimmung des spektralen Strahldichtefaktors [12]

Eingangsgröße X_i	Beschreibung	Wert x_i	Verteilung	Messunsicherheit $u(x_i)$	Empfindlichkeitskoeffizienten $c_{i, \text{GUM}}$
S_r	Von der Probe reflektierte Strahlung	experimentell ermittelt	Gauß	experimentell ermittelt	$\frac{(c_{\text{sens } 11} + c_{\text{sens } 12})f_{\text{br}}f_{\text{fluo}}}{(c_{\text{sens } 11} + c_{\text{sens } 12})f_{\text{fluo}}f_{\text{br}}S_r - (c_{\text{sens } 21} + c_{\text{sens } 22})S_{\text{rd}}}$
S_{rd}	Entsprechendes Dunkelsignal	experimentell ermittelt	Gauß	experimentell ermittelt	$\frac{-c_{\text{sens } 21} - c_{\text{sens } 22}}{(c_{\text{sens } 11} + c_{\text{sens } 12})f_{\text{fluo}}f_{\text{br}}S_r - (c_{\text{sens } 21} + c_{\text{sens } 22})S_{\text{rd}}}$
S_{i1}	Strahldichte der Strahlungsquelle, gemessen vor der Messung der Probe	experimentell ermittelt	Gauß	experimentell ermittelt	$-\frac{f_{\text{bi}}}{f_{\text{bi}}(S_{i1} + S_{i2}) - (c_{\text{sens } 31}S_{\text{id}1} + c_{\text{sens } 32}S_{\text{id}2})}$
$S_{\text{id}1}$	Entsprechendes Dunkelsignal	experimentell ermittelt	Gauß	experimentell ermittelt	$\frac{c_{\text{sens } 31}}{f_{\text{bi}}(S_{i1} + S_{i2}) - (c_{\text{sens } 31}S_{\text{id}1} + c_{\text{sens } 32}S_{\text{id}2})}$
S_{i2}	Strahldichte der Strahlungsquelle, gemessen nach der Messung der Probe	experimentell ermittelt	Gauß	experimentell ermittelt	$-\frac{f_{\text{bi}}}{f_{\text{bi}}(S_{i1} + S_{i2}) - (c_{\text{sens } 31}S_{\text{id}1} + c_{\text{sens } 32}S_{\text{id}2})}$
$S_{\text{id}2}$	Entsprechendes Dunkelsignal	experimentell ermittelt	Gauß	experimentell ermittelt	$\frac{c_{\text{sens } 32}}{f_{\text{bi}}(S_{i1} + S_{i2}) - (c_{\text{sens } 31}S_{\text{id}1} + c_{\text{sens } 32}S_{\text{id}2})}$
$\Delta\lambda_p$	Wellenlängenpräzision	Nenn-Wellenlänge	Rechteck	$\frac{0.1 \text{ nm}}{\sqrt{3}}$	$\frac{1}{\beta} \frac{\partial \beta}{\partial \lambda}$
f_{bi}	Korrekturfaktor des Signals der Strahlungsquelle für die Wellenlängengenauigkeit durch die spektrale Bandbreite	experimentell ermittelt	Dreieck	experimentell ermittelt	$-\frac{S_{i1} + S_{i2}}{f_{\text{bi}}(S_{i1} + S_{i2}) - (c_{\text{sens } 31}S_{\text{id}1} + c_{\text{sens } 32}S_{\text{id}2})}$
f_{br}	Korrekturfaktor des von der Probe reflektierten Signals für die Wellenlängengenauigkeit durch die spektrale Bandbreite	experimentell ermittelt	Dreieck	experimentell ermittelt	$\frac{(c_{\text{sens } 11} + c_{\text{sens } 12})f_{\text{fluo}}S_r}{(c_{\text{sens } 11} + c_{\text{sens } 12})f_{\text{fluo}}f_{\text{br}}S_r - (c_{\text{sens } 21} + c_{\text{sens } 22})S_{\text{rd}}}$
$c_{\text{sens } 11}$	Korrekturfaktor für die Nichtlinearität des Detektionssystems	PTB-Kalibrierung	Gauß	PTB Kalibrierung	$\frac{f_{\text{br}}f_{\text{fluo}}S_r}{(c_{\text{sens } 11} + c_{\text{sens } 12})f_{\text{fluo}}f_{\text{br}}S_r - (c_{\text{sens } 21} + c_{\text{sens } 22})S_{\text{rd}}}$
$c_{\text{sens } 21}$	Korrekturfaktor für die Nichtlinearität des Detektionssystems	PTB-Kalibrierung	Gauß	PTB Kalibrierung	$-\frac{S_{\text{rd}}}{(c_{\text{sens } 11} + c_{\text{sens } 12})f_{\text{fluo}}f_{\text{br}}S_r - (c_{\text{sens } 21} + c_{\text{sens } 22})S_{\text{rd}}}$

Eingangsgröße X_i	Beschreibung	Wert x_i	Verteilung	Messunsicherheit $u(x_i)$	Empfindlichkeitskoeffizienten $c_{i, GUM}$
$c_{sens\ 31}$	Korrekturfaktor für die Nichtlinearität des Detektionssystems	PTB-Kalibrierung	Gauß	PTB Kalibrierung	$\frac{S_{id1}}{f_{bi}(S_{i1} + S_{i2}) - (c_{sens\ 31}S_{id1} + c_{sens\ 32}S_{id2})}$
$c_{sens\ 12}$	Korrekturfaktor für die Nichtlinearität des Detektionssystems	PTB-Kalibrierung	Gauß	PTB Kalibrierung	$\frac{f_{br}f_{fluo}S_r}{(c_{sens\ 11} + c_{sens\ 12})f_{fluo}f_{br}S_r - (c_{sens\ 21} + c_{sens\ 22})S_{rd}}$
$c_{sens\ 22}$	Korrekturfaktor für die Nichtlinearität des Detektionssystems	PTB-Kalibrierung	Gauß	PTB Kalibrierung	$-\frac{S_{rd}}{(c_{sens\ 11} + c_{sens\ 12})f_{fluo}f_{br}S_r - (c_{sens\ 21} + c_{sens\ 22})S_{rd}}$
$c_{sens\ 32}$	Korrekturfaktor für die Nichtlinearität des Detektionssystems	PTB-Kalibrierung	Gauß	PTB Kalibrierung	$\frac{S_{id2}}{f_{bi}(S_{i1} + S_{i2}) - (c_{sens\ 31}S_{id1} + c_{sens\ 32}S_{id2})}$
Δ, Γ, K_{stat}	Differenz aufgrund der endlichen Genauigkeit der Winkeleinstellung	0	Rechteck	0,0843 mrad	$\frac{1}{\beta} \frac{\partial \beta}{\partial \Delta_{stat}}, \frac{1}{\beta} \frac{\partial \beta}{\partial \Gamma_{stat}}, \frac{1}{\beta} \frac{\partial \beta}{\partial K_{stat}}$
Δ, Γ_{just}	Differenz durch Fehlausrichtung und Nichtplanarität der Probe	0	Rechteck	0,35 mrad	$\frac{1}{\beta} \frac{\partial \beta}{\partial \Delta_{just}}, \frac{1}{\beta} \frac{\partial \beta}{\partial \Gamma_{just}}$
Δ, Γ, K_{syst}	Differenz durch Fehlausrichtung der Messapparatur	0	Rechteck	0,17 mrad	$\frac{1}{\beta} \frac{\partial \beta}{\partial \Delta_{syst}}, \frac{1}{\beta} \frac{\partial \beta}{\partial \Gamma_{syst}}, \frac{1}{\beta} \frac{\partial \beta}{\partial K_{syst}}$
A_{20}	Strahlfläche der Strahlungsquelle	1257,34 mm ²	Gauß	0,072 mm ²	$1/A_{20}$
ΔT	Temperaturunterschied zwischen der Umgebungstemperatur und der Temperatur der Blende	25 °C (Halogen-SR) / 5 °C (LED-SR)	Rechteck	$\frac{5\text{ K}}{\sqrt{3}}$	$\frac{2\alpha}{1 + \alpha \cdot \Delta T}$
R	Abstand zwischen Präzisionsapertur und Probe	782,66 mm	Rechteck	$\frac{0,25\text{ mm}}{\sqrt{3}}$	$\frac{2}{R}$
T_f	Transmission eines Neutraldichtefilters	PTB-Kalibrierung	Gauß	PTB Kalibrierung	$1/T_f$
f_{pol}	Korrekturfaktor für Polarisierungseffekte	experimentell ermittelt	Gauß	experimentell ermittelt	$1/f_{pol}$
f_{fluo}	Korrekturfaktor für Fluoreszenzeffekte der Probe	experimentell ermittelt	Gauß	experimentell ermittelt	$\frac{(c_{sens\ 11} + c_{sens\ 12})f_{br}S_r}{(c_{sens\ 11} + c_{sens\ 12})f_{fluo}f_{br}S_r - (c_{sens\ 21} + c_{sens\ 22})S_{rd}}$

3.3 Validierungsmessungen

Nach einer ausführlichen Charakterisierung der Eigenschaften des LED-SR (Abschnitt 3.1.2) und der Sicherstellung, dass dieser den benötigten Anforderungen (vergleiche Abschnitt 2.2.1) entspricht, wurde der LED-SR in das Gonioreflektometer implementiert.

Vergleichsmessungen zwischen dem LED-SR und dem Halogen-SR wurden exemplarisch anhand der absoluten Messung des spektralen Strahldichtefaktors von drei matten keramischen Reflexionsnormalen (Abbildung 28, weiß, rot und blau) durchgeführt. Die Keramikproben haben eine runde Form mit einem Durchmesser von 50 mm und besitzen unterschiedliche Reflexionseigenschaften.



Abbildung 28: Satz käuflich erhältlicher matter Keramikproben. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Proben sind: Die weiße (1), die rote (4) und die blaue (6) Probe [12].

Für die Validierungsmessungen wurden die Proben im Spektralbereich von 360 nm bis 440 nm in der Geometrie $\theta_i = 45^\circ$, $\phi_i = 0^\circ$, $\theta_r = 0^\circ$, $\phi_r = 0^\circ$ abgekürzt als $45^\circ:0^\circ$ [118], mit beiden Strahlern, untersucht. Es wurde je eine Wiederholung mit 20-facher Datenaufnahme pro Messpunkt aufgenommen und eine spektrale Bandbreite von $\Delta\lambda = 3$ nm verwendet. Der aus den Wiederholungsmessungen resultierende mittlere spektrale Strahldichtefaktor $\beta(\lambda)$ ist mit der beigeordneten kombinierten Standardmessunsicherheit in Abbildung 29 dargestellt. Alle folgenden Betrachtungen beziehen sich ebenfalls auf die kombinierte Standardmessunsicherheit. Die Auswertung dieser Messungen wird im nachfolgenden Abschnitt unter Anwendung der Messunsicherheitsbetrachtung aus Abschnitt 3.2 detailliert erläutert und diskutiert.

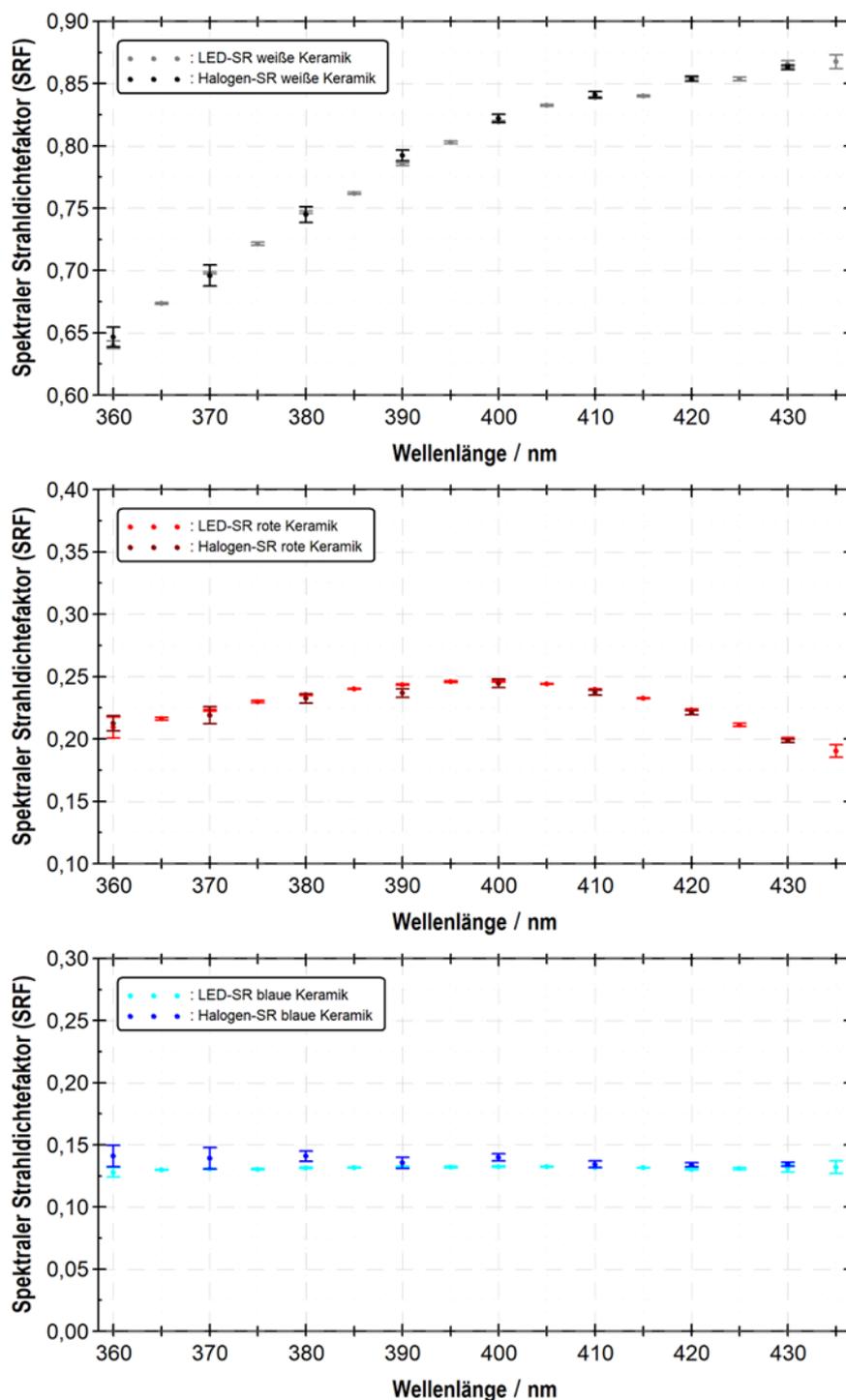


Abbildung 29: SRF einer weißen (oben), roten (in der Mitte) und blauen (unten) keramischen Probe mit der kombinierten Standardmessunsicherheit, gemessen mit dem Halogen-SR und dem LED-SR je in einer $45^{\circ}:0^{\circ}$ -Geometrie. Zur Detektion wurde eine Silizium-Photodiode (Hamamatsu S1337) verwendet.

3.3.1 Auswertung und Diskussion

Messunsicherheitsbetrachtungen des Gonioreflektometers im sichtbaren Spektralbereich zeigen, dass im UV/VIS-Grenzbereich die kombinierte Messunsicherheit stark ansteigt [12]. Dieser Anstieg wird hauptsächlich durch statistische Beiträge verursacht, denn trotz des Einsatzes einer leistungsstarken 400 W-Quarz-Halogenlampe beim Halogen-SR nimmt dessen Strahlungsleistung unterhalb von 450 nm stark ab. Die abnehmende Leistung des Strahlers beeinträchtigt insbesondere das gemessene, reflektierte Signal der Probe, welches wiederum zu einer größeren statistischen Unsicherheit führt und schließlich die kombinierte Unsicherheit in diesem Spektralbereich dominiert [12]. Bei Kalibrierungen kann dies durch eine höhere Anzahl von Wiederholungen oder durch den Wechsel zu einem empfindlicheren Detektortyp teilweise kompensiert werden, jedoch kann dies mit anderen Nachteilen verbunden sein. So kann z. B. der Detektor von der eingesetzten Si-Photodiode auf den *Yellow Enhanced Channel*-Photomultiplier umgestellt werden, um in diesem Spektralbereich noch empfindlicher messen zu können. Dieser kann jedoch nicht ohne Unterbrechung des Messbetriebs gewechselt werden, worunter die Praktikabilität bei langen Kalibrierungen leidet und der Zeitaufwand steigt, insbesondere, wenn zugleich der langwellige VIS-Spektralbereich berücksichtigt werden soll. Die Leistungsabnahme des Halogen-SR war einer der Gründe, weshalb der LED-SR bei seiner Konstruktion (Abschnitt 3.1.1) so ausgelegt wurde, dass er zunächst eine hohe optische Leistung unterhalb 430 nm besitzt. Anhand der in Abbildung 18 aufgeführten gemessenen Photostromdaten ist ersichtlich, dass die Konstruktion in dieser Hinsicht erfolgreich war und der LED-SR eine deutlich höhere Strahlungsleistung als der Halogen-SR in einem Spektralbereich von 360 nm bis 430 nm aufweist. Auch ansonsten erfüllt der LED-SR die grundlegenden Eigenschaften wie Stabilität und eine homogene Strahlfläche, welche bei der Konstruktion berücksichtigt wurden (Abschnitt 3.1.1).

Die Auswertung der Validierungsmessung zeigt, dass die mit beiden Strahlungsquellen ermittelten Strahldichtefaktorwerte prinzipiell innerhalb ihrer Unsicherheitsspanne miteinander übereinstimmen (Abbildung 29), also konsistent sind. Dennoch ist eine zunehmende Divergenz der Kurven unterhalb von 390 nm zu beobachten. Dies ist insbesondere aus Abbildung 30 ersichtlich, welche die Differenz des mit beiden Strahlern ermittelten SRF zeigt. Ursächlich dafür ist möglicherweise die bereits beschriebene Leistungsabnahme des Halogen-SR in diesem Spektralbereich in Kombination mit der abnehmenden Detektor-Empfindlichkeit.

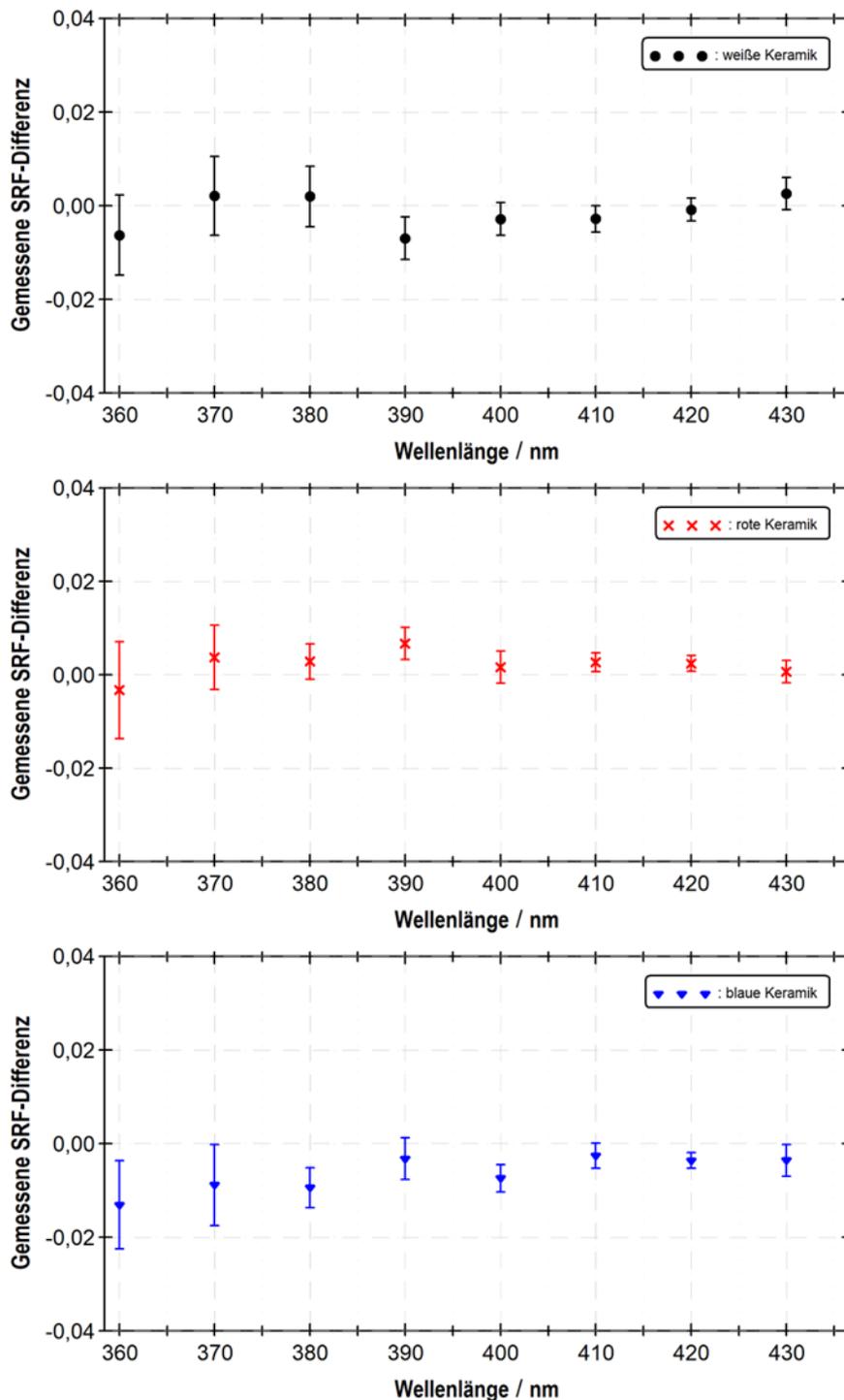


Abbildung 30: Die zu Abbildung 29 ermittelte SRF-Differenz $\beta_{\text{LED-SR}} - \beta_{\text{Halogen-SR}}$ für die Messung einer weißen (oben), roten (in der Mitte) und blauen (unten) keramischen Probe, erhalten durch die Verwendung beider Strahlungsquellen. Die angegebenen Unsicherheiten ergeben sich aus der Unsicherheitsfortpflanzung (Wurzel aus der Summe der Quadrate der Einzelunsicherheiten).

Die sich bei der SRF-Messung ergebene kombinierte Standardmessunsicherheit, basierend auf der Messunsicherheitsbetrachtung aus Abschnitt 3.2, ist in Abbildung 31 gezeigt. Sie setzt sich aus einem statistischen und systematischen Unsicherheitsbeitrag zusammen, welche jeweils in Abbildung 32 und in Abbildung 33 aufgeführt sind.

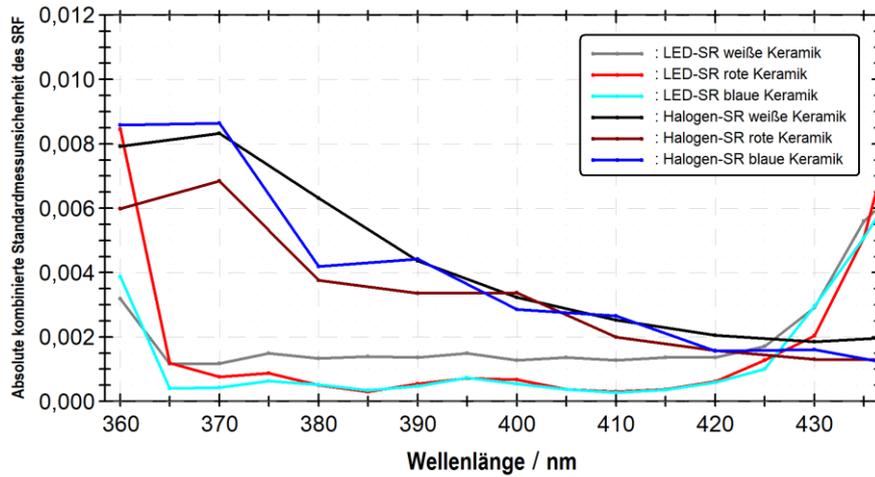


Abbildung 31: Kombinierte Standardmessunsicherheit des SRF für eine weiße, rote und blaue Keramikprobe, gemessen mit dem Halogen-SR und LED-SR in einer $45^{\circ}:0^{\circ}$ Geometrie.

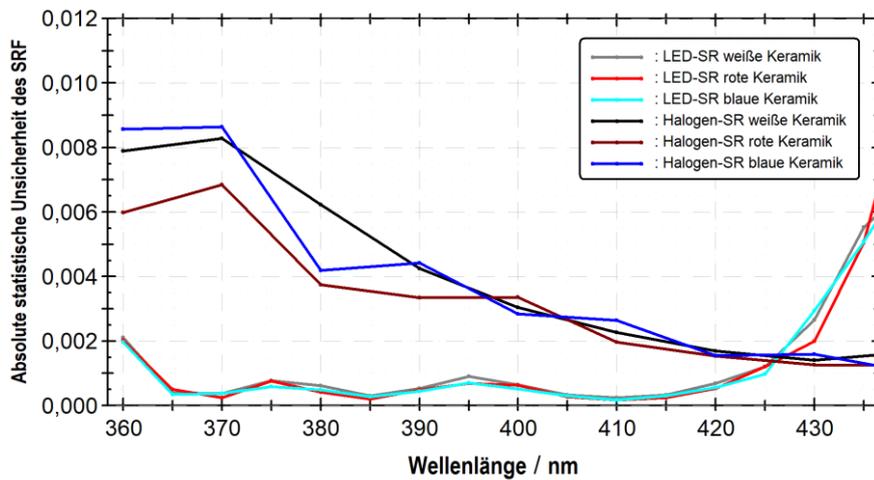


Abbildung 32: Statistischer Beitrag der kombinierten Standardmessunsicherheit des SRF für eine weiße, rote und blaue Keramikprobe, gemessen mit dem Halogen-SR und dem LED-SR in einer $45^{\circ}:0^{\circ}$ Geometrie.

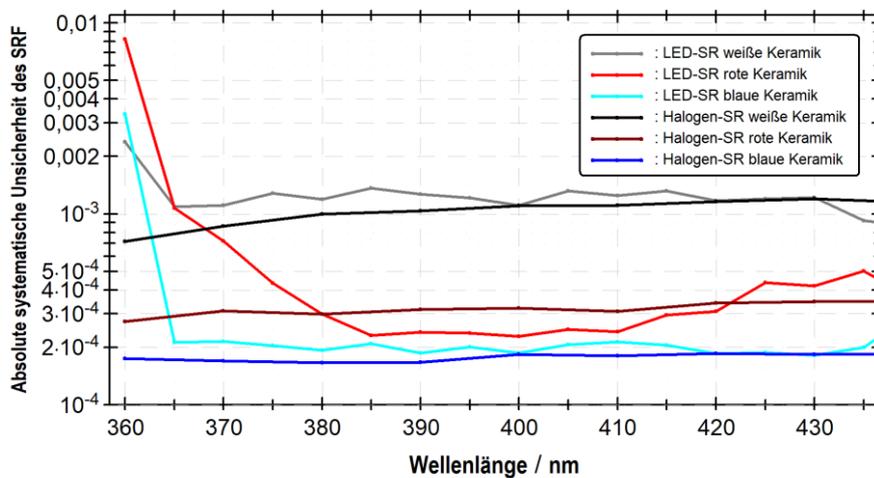


Abbildung 33: Systematischer Beitrag der kombinierten Standardmessunsicherheit des SRF für eine weiße, rote und blaue Keramikprobe, gemessen mit dem Halogen-SR und LED-SR in einer $45^{\circ}:0^{\circ}$ Geometrie. Zur besseren Veranschaulichung wird eine logarithmische Darstellung verwendet.

Bereits nach einem Messzyklus, welcher aus lediglich einer Messwertaufnahme bei einer Wellenlänge besteht, liefert der LED-SR eine signifikante Verbesserung hinsichtlich der erreichbaren Gesamtmessunsicherheit im Spektralbereich zwischen 360 nm und 430 nm.

Die statistische Unsicherheit, die sich aus der Messung mit dem LED-SR ergibt, bleibt konstant und steigt nur um 365 nm an, wenn die verfügbare Leistung abnimmt. Daraus lässt sich ableiten, dass die statistischen Beiträge für diese Quelle in dem Spektralbereich, für den sie optimiert wurde, sehr gering sind. Dies wird durch die sich ergebenden Unsicherheitsbeiträge für die schwach reflektierenden blauen und roten Proben hervorgehoben, die nur mäßig höher ausfallen als für die weiße Probe und hauptsächlich durch die Stabilität und Leistung des LED-SR erzielt werden. Unterhalb von 425 nm sind die statistischen Unsicherheitsbeiträge der Messung mit dem LED-SR kleiner als die mit dem Halogen-SR gemessenen. So steigt die Differenz der statistischen Unsicherheitsbeiträge beider Strahler zwischen 370 nm und 420 nm in Richtung kurzer Wellenlängen weiter an. Dies ist weitestgehend auf kleinere Standardabweichungen der aufgenommenen Messwerte aufgrund der größeren Strahlungsleistung des LED-SR und seiner Stabilität zurückzuführen. Zudem ist eine leichte Welligkeit des statistischen Beitrags des LED-SR zu erkennen. Diese stammt von den Intensitätsamplituden im Spektrum des LED-SR. In Bereichen zwischen den drei Emissionsmaxima der verwendeten LEDs nimmt die Strahlerintensität leicht ab, wodurch die statistischen Unsicherheiten zunehmen.

Der systematische Unsicherheitsbeitrag des Halogen-SR unterscheidet sich nur geringfügig von dem des LED-SR. Das liegt insbesondere daran, dass die meisten systematischen Einzelbeiträge zur Messunsicherheit für beide Strahlungsquellen identisch sind. Lediglich der Bandbreiteneinfluss auf die Wellenlängengenauigkeit unterscheidet sich bei beiden Strahlungsquellen, da der Halogen-SR ein sanft ansteigendes Spektrum besitzt, wohingegen das Spektrum des LED-SR drei Emissionsmaxima aufweist. Diese Wellenlängengenauigkeit mit spektraler Bandbreite wird im nachfolgenden Abschnitt 3.3.1.1 ausführlich betrachtet. In Abbildung 34 sind die fünf größten relativen systematischen Unsicherheitsbeiträge der Messung des SRF ohne Einbeziehung der Probeneigenschaften wie f_{pol} und f_{fluo} dargestellt. Zu ihnen zählen Unsicherheitsbeiträge von den Nichtlinearitätskorrekturkoeffizienten $c_{\text{sens } 11}$ und $c_{\text{sens } 12}$, den Ausrichtungswinkeln Δ_{just} , Δ_{sys} und K_{sys} , der Wellenlängenpräzision $\Delta\lambda_p$ und dem Abstand R . Alle anderen Beiträge liegen unterhalb von 10^{-4} und werden daher nachfolgend nicht explizit betrachtet.

Im Allgemeinen zeigen die Nichtlinearitätskorrekturkoeffizienten eine Wellenlängenabhängigkeit, die hauptsächlich von der Größe des verfügbaren Signals bestimmt wird. Dieses setzt sich zusammen aus der Strahleremission, dem Verlust im Detektionspfad (Spiegel, Polarisationsanalysator, Gitter) und der Detektoreffizienz über den beobachteten Spektralbereich. Aufgrund der wellenlängenabhängigen Änderung dieser Parameter und damit des resultierenden Signals ist es notwendig, den Messbereich und die damit einhergehenden Unsicherheiten des verwendeten Picoamperemeter zeitweise umzuschalten.

Andere wellenlängenabhängige Beiträge ergeben sich aus den unterschiedlichen spektralen Charakteristiken der Proben (weiß oder farbig). Diese Beiträge spiegeln sich in der Wellenlängenpräzision wider. Sie erreichen ihr Maximum am steilsten Punkt der Reflexionskennlinie.

Weitere stark beitragende systematische Unsicherheitsbeiträge sind geometrischer Natur und umfassen den Abstand R sowie die Winkel Δ_{just} , Δ_{sys} und K_{sys} .

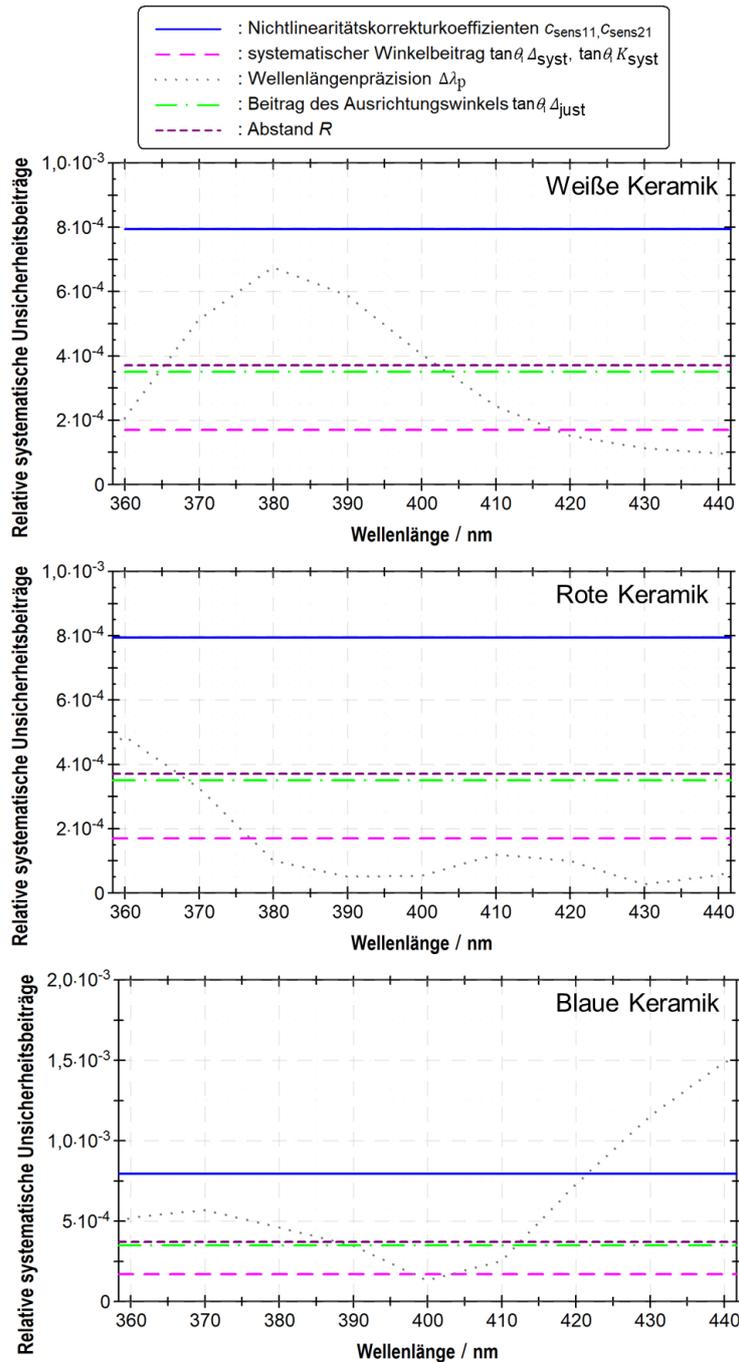


Abbildung 34: Die fünf größten relativen systematischen Unsicherheitsbeiträge für die weiße (oben), die rote (Mitte) und die blaue Keramikprobe (unten) bei Messung mit dem LED-SR ohne Einbeziehung der Probeneigenschaften wie f_{pol} und f_{flu} und die Wellenlängenungenauigkeit der spektralen Bandbreite $\Delta \lambda_b$, welcher in Abschnitt 3.3.1.1 näher betrachtet wird.

Die kombinierte Messunsicherheit sowie der absolute systematische und statistische Unsicherheitsbeitrag für die hier vorgestellte Messung der weißen, roten und blauen Keramikprobe sind im Anhang IV.iii zu finden. Ein charakteristischer Aspekt bei der Unsicherheitsbetrachtung von Messungen mit dem LED-SR ist aufgrund seines strukturierten Spektrums die Wellenlängenunsicherheit mit spektraler Bandbreite, welche im folgenden Abschnitt separat aufgeführt ist.

Unabhängig von der untersuchten Probe ist die ermittelte kombinierte Standardmessunsicherheit bei Anwendung des LED-SR im Spektralbereich von 360 nm bis 420 nm deutlich geringer als bei Verwendung des Halogen-SR. Probenspezifische Einflüsse wie die berücksichtigte Fluoreszenz und Polarisation tragen stark zur hier aufgeführten Gesamtunsicherheit der beiden Strahler bei. Zwar ist auch beim LED-SR ein Anstieg der Gesamtunsicherheit unterhalb von 365 nm insbesondere bei den schwach reflektierenden roten und blauen Proben zu erkennen. Dieser ist vermutlich auf den Leistungsabfall des LED-SR aufgrund der konstruktionsbedingten Spektralbereichsgrenze zurückzuführen. Insgesamt konnte die Messunsicherheit durch die Nutzung des LED-SR in dessen Spektralbereich deutlich reduziert werden, verglichen mit der Messunsicherheit bei Nutzung des Halogen-SR.

Bei einer unendlichen Anzahl von Messungen unter Voraussetzung perfekter Stabilität entspricht die kombinierte Messunsicherheit in etwa der systematischen Messunsicherheit. In diesem Fall wäre der Halogen-SR wegen seiner überwiegend kleineren systematischen Unsicherheit vorzuziehen. Bei einer realistischen Anzahl von Messungen ist jedoch die Verwendung des LED-SR in seinem vorgesehenen Spektralbereich vorteilhafter und zeitsparender. Denn die Verwendung des LED-SR resultiert in einer kleineren statistischen Messunsicherheit, die hauptsächlich von der Standardabweichung der Messwerte dominiert wird. Die Standardabweichung einer Messung nimmt mathematisch betrachtet mit der Wurzel der Anzahl an Messwiederholungen ab und steht in Relation zur benötigten bzw. zur investierten Messzeit. Die vergleichbare Anzahl von Messwiederholungen N , die für den Halogen-SR erforderlich ist, um die gleiche kombinierte Messunsicherheit zu erreichen, wie mit dem LED-SR kann als Gütewert mit Gleichung (20) berechnet werden. Die Schätzung kann unter Verwendung der Messdaten und ihrer Unsicherheitsanalyse aus dieser Arbeit durchgeführt werden, da sie eine übliche Messwiederholung mit 20-facher Ablesung pro Messpunkt darstellen. Dabei bezeichnet u_{stat} die statistischen, u_{sys} die systematischen Unsicherheitsbeiträge und U die kombinierte Messunsicherheit für den LED- bzw. Halogen-SR.

$$N = \frac{u_{\text{stat Halogen-SR}}^2}{U_{\text{LED-SR}}^2 - u_{\text{sys Halogen-SR}}^2} \quad (20)$$

Somit kann die Anzahl der Messwiederholungen N , die der Halogen-SR benötigt, um die gleiche kombinierte Messunsicherheit zu erreichen, welche mit nur einer Wiederholung (20-facher

Datenaufnahme pro Messpunkt) mit dem LED-SR erzielt wird, mit Gleichung (20) berechnet werden. Beispielsweise sind für die zuvor gezeigten weißen, roten und blauen Keramikproben bei 390 nm 23, 98 und 58 Messwiederholungen mit dem Halogen-SR erforderlich, um die gleiche Messunsicherheit wie mit dem LED-SR zu erreichen. Wie in Tabelle 2 zu sehen, nimmt diese Verbesserung und Effizienz sogar bis 370 nm zu.

Tabelle 2: Anzahl der Messwiederholungen N , welche benötigt werden, um mit dem Halogen-SR die gleiche kombinierte Messunsicherheit zu erreichen wie mit einer Messwiederholung mit dem LED-SR (20-fache Datenaufnahme pro Messpunkt, Gleichung (20)) für eine weiße, rote und blaue Keramikprobe.

λ / nm	$N_{\text{weiße Keramikprobe}}$	$N_{\text{rote Keramikprobe}}$	$N_{\text{blaue Keramikprobe}}$
360	7	5	1
370	109	482	96
380	49	72	83
390	23	98	58
400	22	30	32
410	13	164	459
420	6	8	9
430	0	0	0

Die Auswahl der drei matten, farbigen Keramikproben stellt Materialien mit starken und minder starken Reflexionseigenschaften und somit verschiedenen Werten des Strahldichtefaktors dar. Je besser reflektierend eine Probe ist, desto weniger Messwiederholungen werden benötigt, da durch ein größeres Signal auch eine geringere Standardabweichung der Messwerte einhergeht. Mit Zunahme der Messwiederholungen wirken sich zudem Langzeiteffekte wie Drift, Temperatureinflüsse etc. verstärkt aus, weshalb kurze Messkampagnen, wie sie durch Messung mit Verwendung des LED-SR ermöglicht werden, zu bevorzugen sind.

3.3.1.1 Spektrale Wellenlängenunsicherheit

Während die statistischen Beiträge durch die Verwendung des LED-SR aufgrund seiner höheren verfügbaren Strahlungsleistung und sehr guten zeitlichen Stabilität stark reduziert werden, muss die wellenlängenabhängige Emission dieser Strahlungsquelle, die mit einer endlichen Bandbreite des Monochromators gemessen wird, bei der Unsicherheitsbetrachtung besonders berücksichtigt werden. Aufgrund seines strukturierten Spektrums, bestehend aus drei Emissionsmaxima mit ansteigenden und abfallenden Flanken, wird eine gewisse bandbreitenabhängige Wellenlängenunsicherheit eingeführt. Dieser Bandbreiteneinfluss auf die Wellenlängengenauigkeit wirkt sich bei glatten, sanft ansteigenden Spektren wie dem des Halogen-SR nur gering aus. Dagegen beeinflusst ein Spektrum wie das des LED-SR die resultierende Wellenlängenunsicherheitskomponente als Funktion der Bandbreite des Monochromators die erreichbare Gesamtunsicherheit in höherem Maße. Wie in Abschnitt 3.2.1 erwähnt, erfolgt die Korrektur der Wellenlängengenauigkeit durch Anwendung des Taylorreihenansatzes, unter der Annahme einer dreieckigen Bandpassfunktion und der Einbeziehung der verwendeten spektralen Bandbreite $\Delta\lambda_b$ der Messung. Die sich durch Anwendung des Korrekturfaktors f_{bi} auf das LED-SR-Signal S_i ergebende Photostromdifferenz zwischen gemessenem und f_{bi} -korrigiertem Signal ist in Abbildung 35 für verschiedene spektrale Bandbreiten $\Delta\lambda$ dargestellt. Diese können zur Korrektur des Signals verwendet werden (Abschnitt 3.2.1).

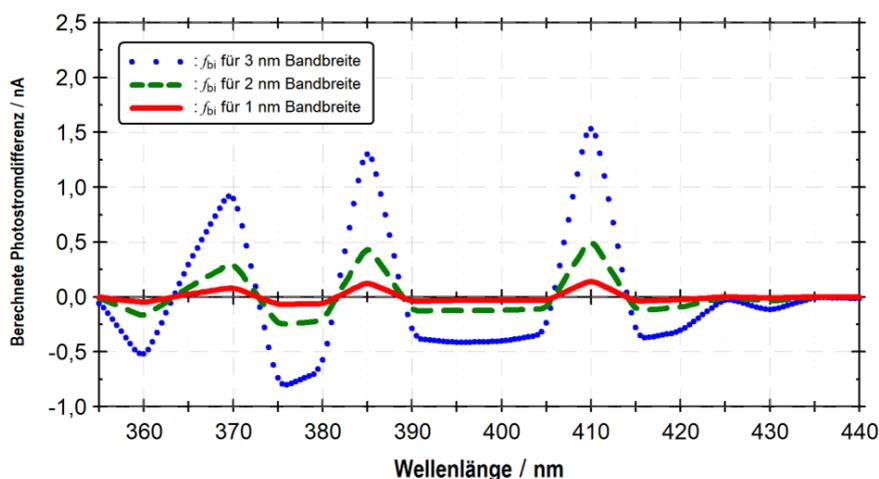


Abbildung 35: Berechnete Photostromdifferenz zwischen gemessenem und f_{bi} -korrigiertem Signal S_i des LED-SR für verschiedene spektrale Bandbreiten $\Delta\lambda$ 3 nm, 2 nm und 1 nm.

Es ist offensichtlich, dass der Korrekturfaktor f_{bi} mit größerer Bandbreite des Monochromators zunimmt. Die Extrempunkte der Korrektur korrelieren mit der zweiten Ableitung, d.h. mit der Krümmung des ermittelten SRF. Die Verwendung einer kleinen Bandbreite wäre von Vorteil, da daraus ein kleinerer Korrekturfaktor resultieren würde. Da eine kleinere Bandbreite jedoch mit einer Verringerung der Effizienz verbunden ist, führt dies auch zu einer Verringerung des gemessenen Photostroms und zu einer entsprechenden Erhöhung seiner Standardabweichung. Bei einem auf Unsicherheit optimierten Ansatz kann die optimale Kombination aus Dauer der Messungen (maßgeblich

bestimmt durch die Anzahl an Wiederholungen) und Bandbreite bestimmt und genutzt werden. Im Gonioreflektometer ist jedoch die Bandbreite vorgegeben und es kann keine Optimierung vorgenommen werden.

Die Genauigkeit des Korrekturalgorithmus, d.h. wie nah das bandbreitenkorrigierte Spektrum am „wahren“ Spektrum liegt, wurde unter Verwendung der in [109] vorgeschlagenen CIE-Methoden betrachtet. Als Maß für die Qualität der Korrektur kann die Differenz zwischen dem bandbreitenkorrigierten Spektrum und einem über die verwendete Bandbreite entfaltetem gemessenen Spektrum genutzt werden. Der Unsicherheitsbeitrag der verwendeten Bandbreitenkorrektur auf die SRF-Messung kann durch die dabei ermittelten relativen Abweichungen abgeschätzt werden. Während viele der systematischen Beiträge für beide Strahlungsquellen als gleich angenommen werden können, ist die Wellenlängengenauigkeit mit spektraler Bandbreite $\Delta\lambda_b$ des LED-SR und ihre Korrektur f_{bi} von besonderer Bedeutung, da sie nur für den LED-SR einen großen Unsicherheitsbeitrag liefert. Für eine Bandbreite von 3 nm sind die gesamten systematischen Unsicherheiten für beide Strahler in Abbildung 33 aufgetragen.

Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass selbst eine Messung mit 3 nm Bandbreite einschließlich der notwendigen Wellenlängengenauigkeitskorrektur und deren Unsicherheitsbeitrag die systematischen Unsicherheiten im betrachteten Spektralbereich für den LED-SR nur geringfügig höher sind als für den Halogen-SR. Der Einfluss der Wellenlänge auf die systematische Unsicherheit ist umgekehrt proportional zum Reflexionsvermögen der Probe und nimmt unterhalb von 370 nm zu. Dieser Einfluss wird in der kombinierten Messunsicherheitsbetrachtung durch die resultierenden geringeren statistischen Effekte des LED-SR kompensiert. Die kombinierte Messunsicherheit für die untersuchten Proben ist in Abbildung 31 dargestellt.

3.3.2 Weiterführende Untersuchungen und alternative Messaufgaben für den Einsatz des LED-SR

Die Intensität des LED-SR im UV/VIS-Grenzbereich (Abschnitt 3.1.2.1) ermöglicht vielfältige Einsatzmöglichkeiten für alternative Messaufgaben zur Reflexionsmessung, die zuvor nicht durchgeführt werden konnten. Hierzu zählen unter anderem die bereits in Abschnitt 3.2 erläuterte Fluoreszenzbetrachtung von Proben sowie spezifische Polarisationsuntersuchungen. Zudem können die Messungen mithilfe des LED-SR auch weiterentwickelt werden. So bieten LEDs prinzipiell die Möglichkeit, gepulst betrieben zu werden. Dieser Ansatz wurde in Kombination mit einem Lock-In Verstärker untersucht. Auch ermöglicht die modulare Bauweise des LED-SR, dass dieser mit anderen bzw. weiteren Platinen ausgestattet wird und somit weitere Spektralbereiche erschlossen werden. Dieser Abschnitt soll einen kurzen Einblick in weiterführende Möglichkeiten für den Einsatz des LED-SR geben.

3.3.2.1 *Fluoreszenzbetrachtung*

Einige Reflexionsstandards, z. B. Opalgläser und Keramikproben, weisen eine geringe, aber messbare Fluoreszenz auf. Bei der hier betrachteten matten, weißen Keramikprobe tritt die Fluoreszenz in Wellenlängenbereichen von 500 nm bis 600 nm sowie von 630 nm bis 850 nm auf, wenn sie mit Wellenlängen unter 450 nm bestrahlt wird [99]. Eine qualitative Aufnahme des Fluoreszenzverhaltens einiger Materialien von Reflexionsstandards ist in Abbildung 36 dargestellt. Diese wurden mit einer handelsüblichen CCD-Fotokamera aufgenommen, während die Proben zum einen mit breitbandigem Weißlicht und zum anderen mit einer Quecksilber-Schwarzlichtlampe bei 365 nm und 254 nm bestrahlt wurden. Es ist zu erkennen, dass das gesinterte PTFE keine Fluoreszenz zeigt, wohingegen bei der weißen, matten Keramikprobe eine grüne Fluoreszenz auftritt, welche von der Anregungswellenlänge abhängt und bei der Bestrahlung mit 365 nm stärker erscheint als bei einer Anregung mit 254 nm (Abbildung 36). Der Eindruck ergibt sich aus der tatsächlichen Fluoreszenz durch die Anregungswellenlänge der Quelle und der reduzierten Rot-Empfindlichkeit der Kamera, welche für die Aufnahme in Abbildung 36 verwendet wurde. Dieser Fotos dienen lediglich einer ersten schnellen qualitativen Probeneinschätzung des Fluoreszenzbeitrags. Zudem zeigt Abbildung 36 eine exemplarische Auswahl an Reflexionsnormalen, so existieren z.B. auch Opalgläser, die eine deutliche rötliche Fluoreszenz zeigen und hier nicht aufgeführt sind.

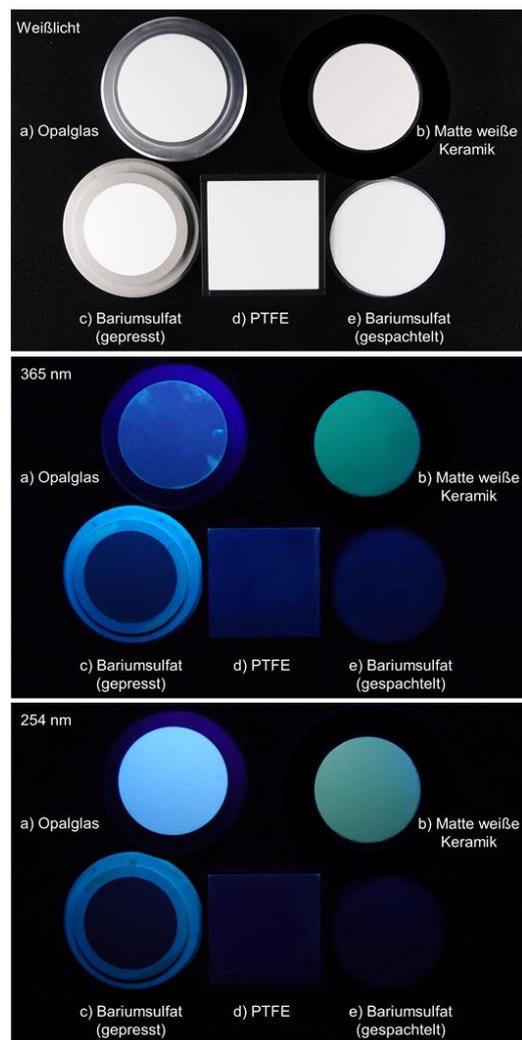


Abbildung 36: Aufnahme von fünf Reflexionsstandards unter Bestrahlung mit Weißlicht (oben) und einer UV-Lampe mit 365 nm (Mitte) und 254 nm (unten). a) Opalglas b) Matte weiße Keramik, c) Bariumsulfat (gepresst), d) PTFE, e) Bariumsulfat (gespachtelt). Aufgenommen mit einer CCD-Kamera.

Der LED-SR ist geeignet genauere Informationen über die auftretende Fluoreszenz zu erhalten, da er eine hohe Leistung in dem Spektralbereich liefert, der für die Anregung von Fluoreszenz relevant ist [119]. Obwohl prinzipiell auch der Halogen-SR Fluoreszenz erzeugt, ist der Einsatz des LED-SR vorteilhaft, da dieser bei Wellenlängen oberhalb von etwa 450 nm nicht emittiert und somit die gesamte detektierte Strahlung in dem VIS-Bereich der auftretenden Fluoreszenz der Probe zugeordnet werden kann. Zur Bestimmung der Fluoreszenz von Proben können zwei Ansätze verfolgt werden: Ein relativer [11] und ein absoluter Ansatz [12]. Eine relative Messung der Gesamt-Fluoreszenz erfolgt gegen einen gesinterten PTFE-Standard, denn es wurde gezeigt [99, 114], dass gesintertes PTFE keine fluoreszierenden Eigenschaften besitzt. Beide Proben werden nacheinander in der $45^\circ:0^\circ$ -Geometrie mit dem LED-SR gemessen und die reflektierte Strahlung mit einem Spektrometer mit CCD-Detektor aufgenommen. Die gemessenen Spektren werden um die spektrale Empfindlichkeit des Detektors korrigiert und auf die Anregungswellenlänge normiert. Da der LED-SR kein Signal oberhalb von 450 nm aufweist und der PTFE-Standard als nicht fluoreszierend angesehen wird [99, 114], kann der

beobachtete Signalunterschied der relativen Messung zwischen dem PTFE-Standard und der Probe in diesem Spektralbereich auf die Fluoreszenz der Probe zurückgeführt werden. Damit ergibt sich die Fluoreszenz der Probe durch Subtraktion des korrigierten und normierten PTFE-Spektrums von dem Spektrum der untersuchten Probe. Dieser relative Ansatz ist für die weiße matte Keramikprobe durchgeführt worden und ist in Abbildung 37 dargestellt. Das beobachtete Fluoreszenzspektrum stimmt mit den Ergebnissen von [99] überein und zeigt ebenfalls eine deutliche Emission im roten Spektralbereich (ab 650 nm).

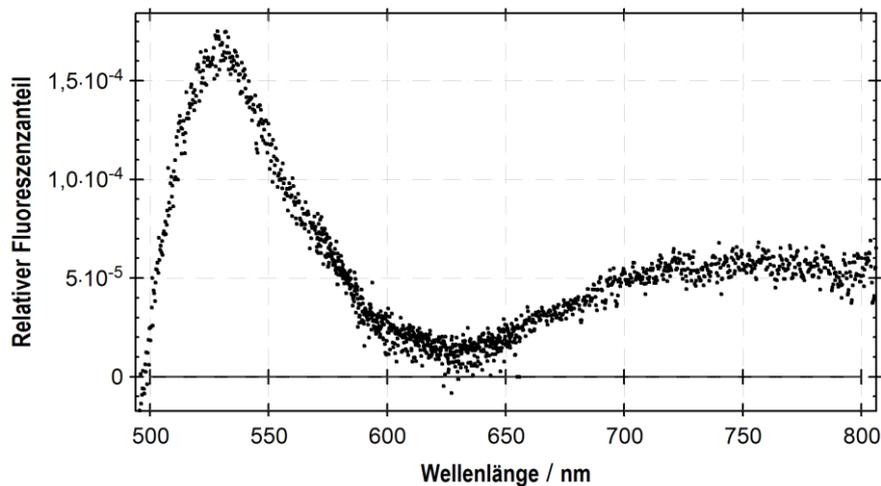


Abbildung 37: Relative Fluoreszenz einer matten weißen Keramikprobe, bestimmt im Vergleich zu einem gesinterten PTFE-Standard und unter Verwendung des LED-SR als Strahlungsquelle [11, 120].

Dieser relative Ansatz resultiert aus der breitbandigen Anregung mit dem LED-SR und zeigt den relativen Gesamt-Fluoreszenzanteil. Eine absolute auf den SRF bezogene Fluoreszenzuntersuchung ist ausführlich in Abschnitt 3.2.1 beschrieben. Sie basiert darauf, dass der LED-SR in Kombination mit Interferenzfiltern verwendet wird und einzelne Wellenlängenbereiche der breitbandigen Strahlung die Fluoreszenz der Probe bei bestimmten Wellenlängen und Intensitäten anregen. Die Fluoreszenz der Probe wird anschließend abhängig von den Anregungswellenlängen mit einem empfindlichkeitskorrigierten CCD-Sensor aufgenommen. Es entsteht eine auf die jeweilige Anregungswellenlänge normierte probenspezifische Fluoreszenzkurve als Funktion der Anregungswellenlänge und -intensität. Diese muss zur Bestimmung der absoluten Fluoreszenz in Relation zu der jeweiligen für die Messung verwendeten Anregungswellenlänge gesetzt werden, um auf die entsprechenden Photostromwerte schließen zu können. Auch müssen für eine absolute Betrachtung des Fluoreszenzeinflusses der Erzeugungsmechanismus und seine doppelte Auswirkung auf die Messung berücksichtigt werden (Abschnitt 3.2.1). Denn zum einen muss der Fluoreszenzanteil in dem Spektralbereich, in dem die Fluoreszenz detektiert wurde, von dem gemessenen diffusen Reflexionssignal der Probe subtrahiert werden. Zum anderen muss die gemessene Fluoreszenz bei jeder Anregungswellenlänge integriert und zu dem entsprechenden Messsignal der Anregungswellenlänge addiert werden.

Die ermittelte relative, auf die jeweilige Anregungswellenlänge im Spektralbereich von 360 nm bis 430 nm normierte Fluoreszenz ist beispielhaft für die weiße, matte Keramikprobe in Abbildung 26 (Abschnitt 3.2.1) aufgeführt. Der sich daraus ergebene Fluoreszenzeffekt ist für beide verwendeten Ansätze - den relativen und den absoluten- im Verlauf und gezeigten Fluoreszenzbeitrag der Probe vergleichbar. Es zeigt sich, dass der LED-SR eine geeignete Strahlungsquelle für Fluoreszenzuntersuchungen an Reflexionsproben darstellt.

3.3.2.2 *Polarisationsuntersuchungen.*

Polarisationseffekte spielen eine wichtige Rolle bei Messungen der diffusen Reflexion. Sogar für matte, quasi-lambert'sche Reflexionsproben wie Keramiken zeigen Untersuchungen im VIS-Spektralbereich, dass das Reflexionsvermögen polarisationsabhängig ist [89]. Der LED-SR eröffnet die Möglichkeit, ähnliche Untersuchungen im VIS- bis UV-A-Spektralbereich durchzuführen. Dies war bisher aufgrund der niedrigen Signalintensität des Halogen-SR und damit einem kleinen Signal-zu-Rausch-Verhältnis bei kürzeren Wellenlängen auch mit langen Messzeiten nicht möglich. Nachfolgend wird das Vorgehen am Beispiel einer Messung der Polarisationseigenschaften mit dem LED-SR erläutert [11, 121]. Diese Untersuchungen basieren auf der Bestimmung der Stokes Parameter, welche eine vollständige quantitative Charakterisierung der Polarisationseigenschaften von elektromagnetischen Wellen ermöglichen. Sie beschreiben den Polarisationszustand in vier Komponenten: Gesamtintensität I der Strahlung unabhängig von der Polarisation, lineare Polarisation in horizontaler/vertikaler Richtung ($0^\circ/90^\circ$ -Ausrichtung) M_0 , lineare Polarisation in diagonaler Richtung ($\pm 45^\circ$ -Ausrichtung zur Streuebene) C_0 und zirkulare Polarisation S_0 . Dabei weist der angegebene Index 0 darauf hin, dass die Werte auf die Intensität normiert und in Prozent angegeben sind. Der Polarisationsgrad (*Degree of Polarisation*, DOP) ergibt sich aus der Formel (21).

$$DOP = \sqrt{M_0^2 + C_0^2 + S_0^2} \quad (21)$$

Zunächst wurden die Polarisationseigenschaften des LED-SR selbst bestimmt. Aus vorherigen Untersuchungen ist zwar bekannt, dass der ebenfalls auf dem Kugelstrahlerprinzip basierende Halogen-SR als unpolarisiert betrachtet werden kann [89], weshalb es auch für den LED-SR angenommen wird. Der Vollständigkeit halber sollte dies jedoch auch für den LED-SR überprüft und die Stokes-Parameter bestimmt werden. Hierzu wurde der Messaufbau um einen speziellen Polarisationsanalysator im Detektionspfad der Apparatur erweitert (Abbildung 7). Wie in Abschnitt 3.2.1 unter Polarisationseffekte beschrieben besteht er aus einer Viertel-Wellenplatte, die senkrecht zum Strahlengang in $\Delta\vartheta = \frac{\pi}{8}$ -Schritten gedreht werden kann und einem in Bezug auf das nachfolgende Detektionssystem festen linearen Polarisator ($\varphi = 0$). Mit Hilfe einer 8-Schritt-Technik [112, 113] können die normierten Stokes-Parameter für den einfallenden und reflektierten Strahl bei jeder Geometrie und jeder Wellenlänge bestimmt werden [89]. Das Ergebnis für den LED-SR ist in

Abbildung 38 dargestellt. Er kann als zufällig polarisiert angesehen werden, da alle Stokes-Parameter innerhalb der ihnen zugeschriebenen Unsicherheit mit einem Erweiterungsfaktor von $k = 2$ als Null betrachtet werden können. Bei einer vollständig unpolarisierten Strahlungsquelle kann somit die gemessene Polarisation auf die Probe zurückgeführt werden.

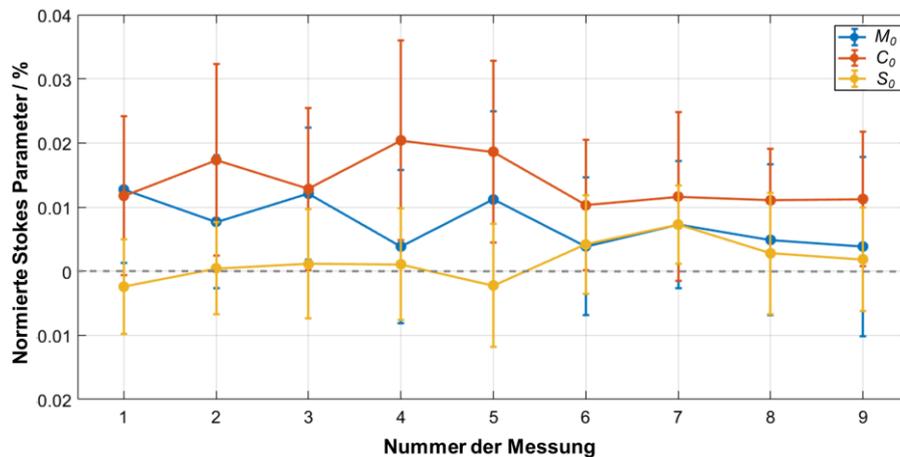


Abbildung 38: Stokes-Parameter des LED-SR. Da alle Werte innerhalb ihrer Standardmessunsicherheiten als Null angesehen werden können, kann der LED-SR als zufällig polarisiert betrachtet werden [11].

Da aus vorherigen Untersuchungen bekannt ist, dass die schwach reflektierende blaue Keramikprobe (siehe Abbildung 29) die größte Polarisationsabhängigkeit von den unterschiedlich gefärbten Keramikproben aufweist (vergleiche vorangegangene Polarisationsuntersuchungen in [89]), wurde genau diese als herausfordernde exemplarische Probe für Polarisationsmessungen mit dem LED-SR ausgewählt.

Für in-plane Geometrien in der Probenebene ist bekannt, dass nur die hauptachsenbezogene lineare Polarisationskomponente M_0 entscheidend ist, sodass die Betrachtung von s- und p-Polarisation beim SRF (β_s, β_p) und deren Verhältnis ($\beta_{\text{ratio}} = \frac{\beta_s}{\beta_p}$) ausreichend ist. Diese Messungen wurden bei verschiedenen Wellenlängen im Spektralbereich des LED-SR durchgeführt. Um auch den Geometrieinfluss zu untersuchen, wurde der SRF entweder mit einem konstanten Einstrahlwinkel von $\theta_i = 0^\circ$ und einer schrittweisen 15° -Änderung vom Reflexionswinkel θ_r , im Bereich von -60° bis 60° oder umgekehrt aufgenommen. Beide Variationsverhalten lieferten ähnliche Ergebnisse. Die Messungen für variable Einstrahlwinkel sind in Abbildung 39 dargestellt. Es ist zu beobachten, dass die Polarisationseffekte bei größeren Einstrahlwinkeln stärker ausgeprägt sind, da hier der Betrag von M_0 stark zunimmt und die reflektierte Strahlung nennenswert und vorzugsweise s-polarisiert ist. Dies wird auch durch das Verhältnis β_{ratio} bestätigt, welches bei Einfallswinkeln von -20° bis 20° bei nahe eins liegt und bei größeren Einfallswinkeln eine bevorzugte s-Polarisation zeigt. Diese Ergebnisse stimmen mit den Beobachtungen im sichtbaren Spektralbereich überein [89].

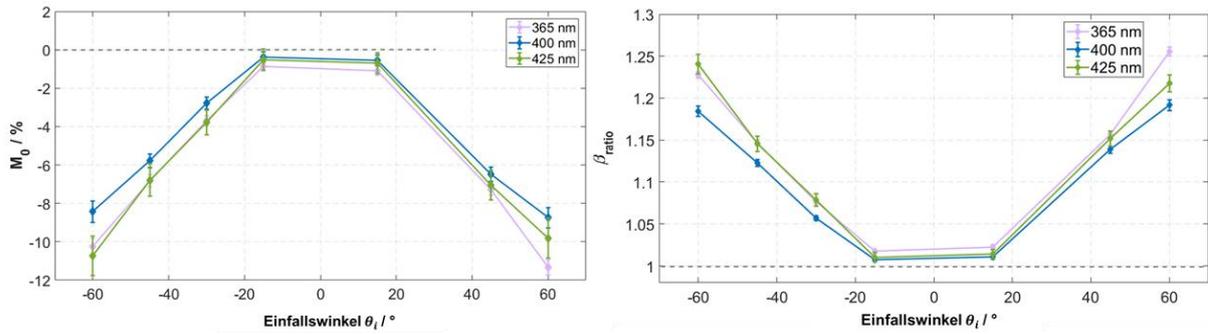


Abbildung 39: Stokes-Parameter M_0 (links) und das SRF-Verhältnis (rechts) für variable Einstrahlwinkel bei 365 nm, 400 nm und 425 nm der blauen polarisationsabhängigen Keramikprobe [11].

Eine Übersicht über die Beziehung zwischen dem Polarisationsgrad (DOP) und dem Gesamreflexionsvermögen ist in Abbildung 40 anhand von Daten aus Messungen mit dem LED-SR und dem Halogen-SR aufgeführt.

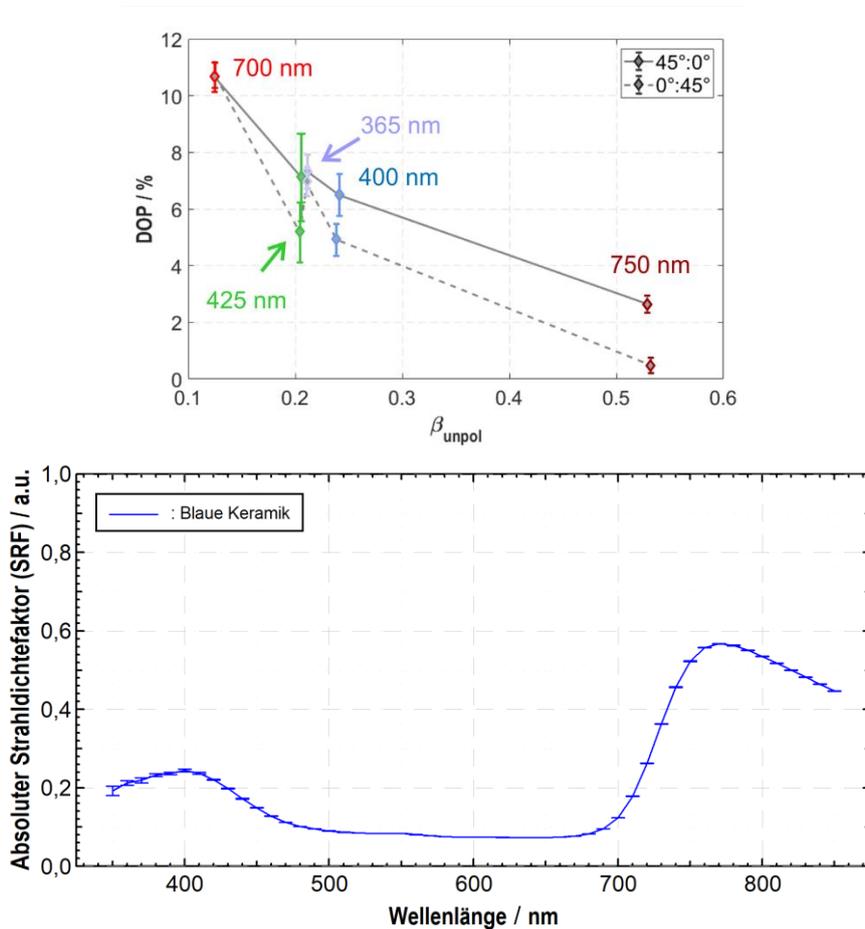


Abbildung 40: Oben: Verhältnis zwischen DOP und Gesamreflexionsvermögen der blauen polarisationsabhängigen Keramikprobe [11]. Messungen mit dem LED-SR bei 365 nm, 400 nm und 425 nm. Messungen mit dem Halogen-SR bei 700 nm und 750 nm. Beschriftung angepasst an Spektralfarben. Unten: Strahldichtefaktor der betrachteten blauen Keramikprobe.

Je niedriger der Gesamtreflexionsgrad ist, desto größer ist der DOP und umgekehrt. Dies ist für den gesamten Spektralbereich zu beobachten und ist bei variablem Einstrahlwinkel größer als bei der inversen Geometrie. Es bestätigt, dass der Grad der Polarisation vom Strahldichtefaktor abhängt, da dieser die räumliche und spektrale Verteilung der Strahlungsintensität bestimmt und somit die resultierende Polarisation beeinflusst.

Anhand dieser exemplarischen Messung konnte gezeigt werden, dass aufgrund des vorteilhaften Signal-zu-Rausch-Verhältnisses des LED-SR weiterführende Untersuchungen des Einflusses der Polarisation ermöglicht wurden.

3.3.2.3 *Strahlungssensitive Proben*

Der LED-SR reduziert im VIS-UV-Grenzbereich durch sein verbessertes Signal-zu-Rausch-Verhältnis die Messunsicherheit (Abbildung 17, Abschnitt 3.3.1), während zugleich dieser Grenzbereich und seine Weiterführung zu kurzwelligeren Wellenlängen zur sog. UV-Alterung vieler Materialien führt. Dies gilt insbesondere für organische Materialien und Kunststoffe, welche ihre optischen und mechanischen Eigenschaften verändern, wenn sie längere Zeit UV-Strahlung ausgesetzt werden [122 bis 125].

Da auch strahlungssensitive Proben der Messung mit dem Gonioreflektometer und somit auch dem LED-SR ausgesetzt werden, sollte nachfolgend geprüft und untersucht werden, inwieweit die Strahlung des LED-SR bereits zu derartigen Alterungsprozessen beiträgt. Hierzu wurden Papierproben mit optischen Aufhellern betrachtet, denn diese stellen strahlungsempfindliche Oberflächen dar, bei denen es leicht zu „Strahlungsschäden“ kommen kann [126, 127]. Druckfarben, Drucke und Papiere weisen häufig eine Violett-Blau-Empfindlichkeit auf, sodass es bereits bei geringer Lichteinwirkung zum Ausbleichen und Vergilben kommen kann. Aufgrund dessen werden sie standardmäßig auf Lichtechtheit bzw. Lichtunbeständigkeit geprüft. Die Lichtechtheit beschreibt dabei die Widerstandsfähigkeit gegen die Einwirkungen von Tageslicht oder dessen Simulation durch z.B. gefilterte Bogenentladungslampen ohne Einfluss der Witterung [128 bis 130]. Der Umfang der Farbveränderung wird anhand einer Einstufung der Lichtechtheit in Stufen zwischen 1 (sehr gering) und 8 (hervorragend) nach der Wollskala (auch Blauskala oder Blaue Wollskala genannt) für Druckfarben ausgedrückt und erfolgt relativ zu Referenzmaterialien mit definierter Lichtechtheit [128]. Die Skala dient der Standardisierung der Farbwiedergabe im Druckbereich und trägt zur Kategorisierung von Farbveränderungen bei. Damit wird die Konsistenz und genaue Wiedergabe von Farben in verschiedenen Druckverfahren und Druckerzeugnissen, wie Plakaten und Verpackungen sowie Fahnen und Straßenschildern sichergestellt. Druckfarben mit einer hohen Lichtechtheit sind widerstandsfähiger gegenüber Strahlung als Farben mit einer geringen Lichtechtheit.

Wie zuvor beschrieben erfolgt die normgerechte Bestimmung der Lichtechtheit (gemäß ISO 12040 [128, 130]) durch den visuellen Vergleich der belichteten Probe mit ebenfalls belichteten Referenzmaterialien. In der praktischen Anwendung hat sich gezeigt, dass etablierte Erfahrungswerte eine präzise und

effiziente Bestimmung der Lichtechtheitsstufen ermöglichen. Diese Werte basieren auf den Bestrahlungsdosen, denen die Materialien während der Prüfung ausgesetzt sind. Sie liefern ebenso genaue Ergebnisse wie die vorgeschriebene visuelle Vergleichsmethode [130]. Die Abschätzung erfolgt oft anhand einer Xenon-Bogenentladungslampe mit einer korrelierten Farbtemperatur zwischen 5.500 K und 6.500 K, die in vielen Anwendungen die Wirkung von natürlichem Sonnenlicht simuliert. Die zur Prüfung verwendete Bestrahlungsstärke im Wellenlängenbereich von 300 nm bis 800 nm beträgt $500 \frac{W}{m^2}$. Basierend auf der spektralen Verteilung des eingesetzten Strahlers entfallen etwa 8 % bis 10 % der Strahlungsintensität auf den Wellenlängenbereich von 300 nm bis 400 nm. Um auf die Lichtechtheitsstufe 3 „mäßig“ zu prüfen, muss die Probe der Bestrahlungsdosis von $43.000 \frac{kJ}{m^2}$ ausgesetzt und somit 1 Tag mit $500 \frac{W}{m^2}$ belichtet werden [128 bis 130]. Im UV-Spektralbereich entspricht dies einer Dosis von ungefähr $4.300 \frac{kJ}{m^2}$.

Diese Prüfbedingungen sollen zur theoretischen Betrachtung des Strahlungseinflusses des LED-SR genutzt werden. Die geschätzte akkumulierten Bestrahlungsstärke, welcher eine Probe bei der Messung mit dem LED-SR ausgesetzt wird, ist mit ca. $2,5 \frac{W}{m^2}$ bzw. $9 \frac{kJ}{h \cdot m^2}$ gegeben. Dieser Wert basiert auf den Messdaten aus Abbildung 17 mit einer gemessenen akkumulierten Bestrahlungsstärke von $1,53 \frac{W}{m^2}$ im Abstand von 1 m und einer Korrektur unter Anwendung des Abstandsgesetzes auf den tatsächlichen Probenabstand R von 0,78266 m (Bestrahlungsstärke nimmt mit dem Quadrat des Abstands ab). Damit wird eine Bestrahlungsdauer von etwa 20 Tagen benötigt, um die Probe der notwendigen Bestrahlungsdosis für das Erreichen der definierten Lichtechtheitsstufe 3 auszusetzen. Für die Lichtechtheitsstufen 2 und 1 entspricht die erforderliche Bestrahlungsdosis und damit die Bestrahlungsdauer jeweils etwa der Hälfte der nächsthöheren Stufe.

Da für Messungen mit dem Gonioreflektometer die Bestrahlungsdauer der Probe unter 1 min pro Wellenlänge liegt, sollte die Probe bei einer herkömmlichen Messung, welche insgesamt ungefähr 3 h dauert, anhand der Abschätzung nicht beeinträchtigt werden (siehe Abschnitt 3.2.1 unter Messdatenerfassung). Dies sollte überprüft und evtl. eintretenden und/oder durch die Messung induzierte Alterungsprozesse und Veränderungen der Proben betrachtet werden.

Die theoretische Betrachtung, dass die Bestrahlung mit dem LED-SR keine Änderungen der Proben bewirken sollte, wurde anhand realer Messungen von zwei Papierproben überprüft. Die untersuchten Papierproben (Abbildung 41) wurden durch das Fogra Forschungsinstitut für Medientechnologien e.V. [131] zur Verfügung gestellt. Sie stellen beide herausfordernde bzw. strahlungssensitive Proben dar, da beide mit „geringer“ Lichtechtheit ausgewiesen sind, welche optische Aufheller (*Optical Brighteners Agent* (OBA), *Fluorescent whitening agents* (FWA)) enthalten. Bei den zunehmend in Papieren und Druckerzeugnissen enthaltenen optischen Aufhellern handelt es sich zumeist um fluoreszierende Stoffe, welche aufgrund ihrer Absorptions- und Fluoreszenzwellenlänge das Papier für das menschliche Auge

heller und weißer erscheinen lassen und somit den Helligkeitseindruck verbessern. Sie absorbieren UV-Strahlung bei ca. 340 nm bis 370 nm und fluoreszieren bei 420 nm bis 470 nm. Die meisten dieser Zusatzstoffe werden dem Papierfaserstoff als Lösung oder Pigmentsuspension im Herstellungsprozess zugegeben. Abhängig von dem Stoff sowie der Intensität und Dauer der Strahlungseinwirkung kommt es oft zu einer Farbveränderung oder Vergilbung, da sie oft instabil und daher nicht lichtecht sind [132]. Probe 1 besitzt einen OBA-Anteil von 11,3 und Probe 2 von 6,6. Dies lässt bei Probe 1 eine höhere Strahlungssensitivität vermuten.

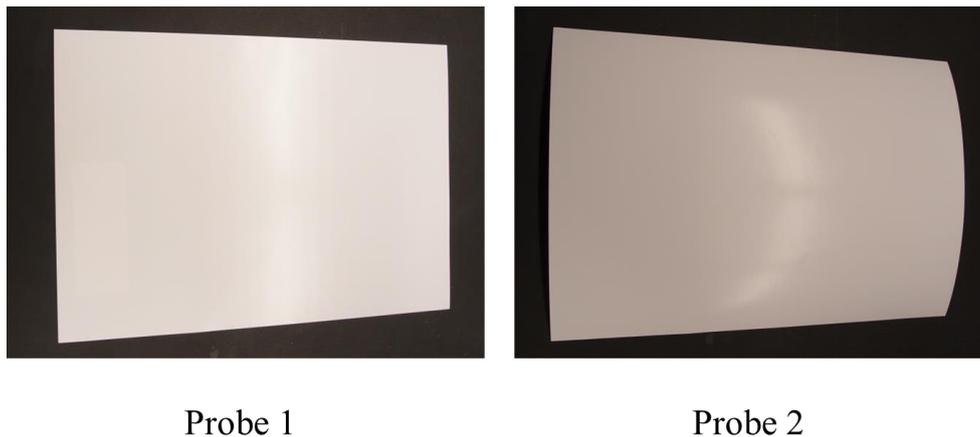


Abbildung 41: Foto der zwei untersuchten Papierproben (Probe 1 links, Probe 2 rechts) mit optischen Aufhellern (OBA) und geringer Lichtechtheit (LE)[128, 130]. Probe 1 besitzt einen Anteil von 11,3 an OBA und Probe 2 von 6,6.

Die Farbänderung der Proben nach einer Prüfung der Lichtechtheitsstufe 3 wurde anhand der CIEDE2000 Formel ermittelt, welche im Jahr 2000 von der International Commission on Illumination (CIE) zur präziseren Ermittlung von Farbabweichungen zwischen zwei Farbmessungen eingeführt wurde [133, 134]. Dabei ergab der ΔE_{00} -Wert, welcher die tatsächliche Farbdifferenz zwischen zwei Farben unter Berücksichtigung der menschlichen Farbwahrnehmung darstellt, für Probe 1 einen Wert von 4,1 und für Probe 2 einen Wert von 2,2. Die Ergebnisse zeigen, dass Probe 1 im Vergleich zu Probe 2 eine signifikant stärkere Farbveränderung nach der Belichtung aufweist. Während der ΔE_{00} -Wert von 2,2 bei Probe 2 laut der Skala und Beschreibung [133, 134] auf eine wahrnehmbare, jedoch noch innerhalb üblicher Toleranzgrenzen liegende Farbabweichung nach der Prüfung auf Lichtechtheit hinweist, deutet der Wert von 4,1 bei Probe 1 auf eine deutlich sichtbare und gegebenenfalls nicht mehr akzeptable Farbänderung hin [133, 134]. Somit weist Probe 1 eine höhere Strahlungssensitivität außerhalb üblicher Akzeptanzgrenzen für solche Proben auf [134].

Die zwei Papierproben wurden jeweils für 32 h mit dem LED-SR bestrahlt und mögliche Änderungen im diffusen Reflexionsverlauf der Proben zu fünf Zeitpunkten $t_1 = 0$ h, $t_2 = 4$ h, $t_3 = 8$ h, $t_4 = 16$ h und $t_5 = 32$ h beobachtet. Dies erfolgte in der Geometrie $45^\circ:0^\circ$ mit dem LED-SR und es wurde ein CCD-Sensor verwendet, um Änderungen schnell im gesamten diffusen Reflexionsverlauf aufnehmen zu können. Die zeitlichen Verläufe der diffusen Reflexionsmessungen sind nachfolgend in

Abbildung 42 zu sehen. Zudem ist jeweils die Differenz zwischen den Messungen t_2 bis t_5 zu t_1 aufgeführt, welche die Stabilität nach der Bestrahlung der beiden Proben mit dem LED-SR zu den jeweiligen Bestrahlungsdauern zeigen. Die ermittelte Abweichung nahm bei beiden Proben jeweils mit der Bestrahlungsdauer zu und lag nach 32 h bei Probe 1 maximal im Bereich von $\pm 6\%$ und bei Probe 2 im Bereich $\pm 1\%$. Da beide Proben eine geringe Lichteuchtigkeit aufweisen, war eine entsprechende Reaktion unter Bestrahlung zu erwarten. Dabei wurde angenommen, dass Probe 1 eine höhere Strahlungssensitivität aufweist, da sie nach der Lichteuchtprüfung eine größere Farbdifferenz aufwies und auch einen größeren Anteil an OBA als Probe 2 besitzt. Diese Annahme lässt sich auch im Rahmen der hier gezeigten Bestrahlung mit dem LED-SR bestätigen.

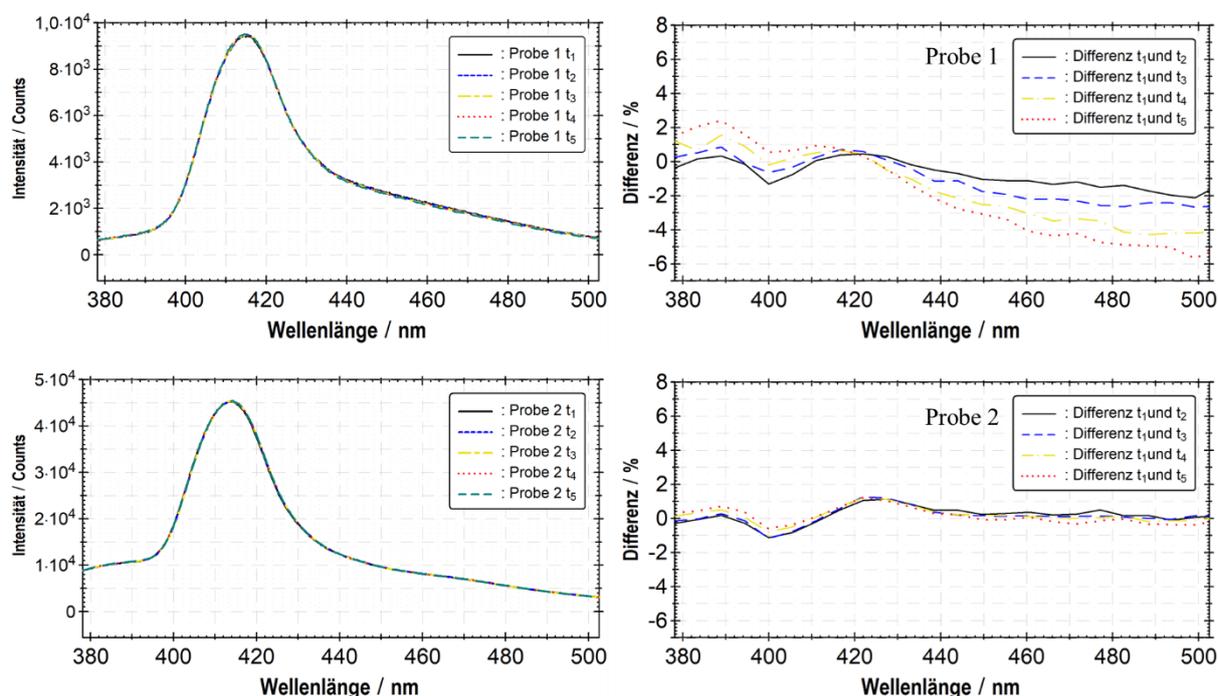


Abbildung 42: Diffuser Reflexionsverlauf und relative Stabilität der zwei untersuchten Papierproben (oben Probe 1, unten Probe 2) aus Abbildung 41 veranschaulicht anhand der Abweichung der Reflexionsverläufe und deren Differenzen nach verschiedenen Bestrahlungzeiten $t_1 = 0$ h, $t_2 = 4$ h, $t_3 = 8$ h, $t_4 = 16$ h und $t_5 = 32$ h mit dem LED-SR.

Bei beiden Proben lässt sich mit zunehmender Bestrahlungsdauer eine verstärkte Differenz der diffusen Reflexionseigenschaften beobachten, was auf eine fortschreitende Degradation der Proben schließen lässt. In diesem Zusammenhang steigt der Anteil der diffusen Reflexion im kurzwelligen Spektralbereich an, während er ab etwa 420 nm abnimmt. Dieses Verhalten weist auf eine Veränderung der enthaltenen optischen Aufheller hin, welche die kurzwellige Strahlung absorbieren und typischerweise im Bereich von 420 nm bis 470 nm fluoreszieren. Durch die Bestrahlung kann es zur Degradation oder strukturellen Veränderung der OBA kommen, welches sich auch auf ihre Eigenschaften als Aufheller auswirkt, indem die Absorptionsfähigkeit und Fluoreszenzeigenschaft abnehmen. Dies äußert sich in einem Anstieg der diffusen Reflexion der Probe im kurzwelligen Spektralbereich und einem Abfall der gemessenen diffusen Reflexion im charakteristischen

Spektralbereich ab 420 nm. Der beschriebene Effekt ist aus Abbildung 42 ersichtlich und nimmt mit der Bestrahlungsdauer für beide Proben zu, wobei er bei Probe 1 stärker ausgeprägt ist.

Im Kontext typischer Messbedingungen mit einer Messdauer von ca. 3 h sind lediglich geringe Veränderung von $\pm 2\%$ bei Probe 1 und im Bereich unter $\pm 1\%$ bei Probe 2 zu erkennen. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass die Bestrahlung der Probe bei einer typischen Messung nicht kontinuierlich erfolgt, sondern weniger als der Hälfte der Gesamtmesszeit entspricht und somit die induzierten Strukturveränderungen noch geringer ausfallen müssten. Deshalb lässt sich sagen, dass anhand der hier dargestellten Messungen von zwei Papierproben mit „geringer“ Lichtechtheit gezeigt werden konnte, dass die typische Messung mit dem LED-SR und somit eine Bestrahlung mit ihm keinen erheblichen Einfluss auf Proben mit ausgeprägter Strahlungssensitivität hat. Falls es dennoch notwendig wird, Proben bei Bestrahlung mit dem LED-SR einer geringeren Dosis auszusetzen, kann dieser auch gepulst betrieben werden, wodurch die Probenbestrahlung verringert werden kann. Dieser Betrieb wird im nachfolgenden Abschnitt 3.3.2.4 beschrieben.

3.3.2.4 Gepulster Betrieb des LED-SR

Die meisten kommerziell erhältlichen LEDs lassen sich nicht nur mit konstantem Gleichstrom betreiben, sondern bieten die Möglichkeit sie auch gepulst zu bedienen. Dies gilt auch für die im LED-SR verwendeten LEDs (Anhang II.ii), sodass dieser in Kombination mit einem Pulsgenerator gepulst betrieben werden kann. Dies reduziert zum einen die Bestrahlungszeit der Probe, wodurch die in Abschnitt 3.3.2.3 beschriebenen strahlungssensitiven Proben zusätzlich geschont werden können. Aber auch messtechnisch ist dies für eine Strahlungsquelle von besonderem Interesse, da sie somit moduliert werden kann. Dadurch kann z.B. die Wirkung eines präzisen Modulators (Lichtzerhackers, „Choppers“) simuliert bzw. ersetzt werden. Die Methode zur Signal-zu-Rausch-Verbesserung mittels eines Lock-In-Verstärkers setzt eine periodische Modulation des Signals voraus [135, 136]. Die elektronische Datenerfassung erreicht theoretisch physikalisch durch die Unschärferelation und technisch, wie bei den meisten Messapparaturen auftretend, durch das Rauschen der Elektronik ihre Grenzen. Rauschen beschreibt die Gesamtheit der Umgebungssignale um das eigentliche Messsignal und umfasst thermisches- oder Widerstandsrauschen, Schrotrauschen und $(1/f)$ -Rauschen, welches auch als Funkel-Rauschen bezeichnet wird. Zudem gibt es umweltbedingtes Rauschen, welches weitestgehend vermieden werden sollte. Es wird durch Umwelteinflüsse wie Strahlung von Monitoren oder Vibrationen von Motoren in der Nähe der Messapparatur erzeugt. Hierzu zählen auch Störungen im Radiofrequenzband und das sogenannte „Netzbrummen“, welches durch die 50 Hz-Stromversorgung einzelner Messbestandteile hervorgerufen wird und auch in höheren harmonischen Frequenzen detektierbar ist [137, 138]. Das Rauschen stellt insbesondere bei der Messung kleiner Messsignale eine Herausforderung dar, da es das Nutzsignal vollständig überlagern kann, wodurch dieses nicht mehr detektierbar ist. Durch die Verwendung eines phasenempfindlichen Messgerätes wie dem Lock-In-Verstärker kann ein periodisch moduliertes Signal gegenüber dem Rauschen abgegrenzt und extrahiert

werden. Dabei fungiert der Lock-In-Verstärker als Frequenzfilter, welcher das statistisch gleichverteilte Rauschen über einen Messzeitraum mittelt und das Nutzsignal ihm gegenüber verstärkt [135, 136]. Zusammengefasst basiert das Funktionsprinzip somit in der Demodulation oder phasempfindlichen Detektion eines zu messenden Signals. Dies besteht wiederum aus der Mischung des gemessenen Signals mit einer Referenzfrequenz (Modulationsfrequenz) und einer Tiefpassfilterung. Mithilfe der Auswahl der Modulationsfrequenz kann das Messsignal von dominanten Rauschquellen entfernt und durch die Filtereinstellungen das SRV weiter verbessert werden [139, 140].

Im ursprünglichen Gonioreflektometeraufbau (Abbildung 7) erschwert die Dimension der Strahlungsfläche eines Kugelstrahlers (40 mm) das Anbringen eines standardmäßig zur Modulation des Signals verwendeten Lichtzackers (Choppers). Zudem befindet sich die Strahlungsquelle auf einem Drehkranz und wird während der Messungen zur Realisierung der jeweiligen Geometrien auf diesem bewegt. Deshalb ist ein Chopper Kreiseffekten und der Drehimpulserhaltung ausgesetzt. Dies hat wiederum Einfluss auf die Frequenzstabilisierung des Choppers und beeinträchtigt diesen und damit die Messung. Durch eine modulierbare Strahlungsquelle, wie den LED-SR im gepulsten Betrieb, können all diese Widrigkeiten umgangen werden. Aufgrund dessen wurde nachfolgend der gepulste Betrieb des LED-SR ebenfalls an der zuvor untersuchten weißen Keramikprobe getestet. Hierzu wurde der Messaufbau (siehe Abschnitt 2.2.1) um einen Pulsgenerator und eine Detektion mit Lock-In-Verstärker erweitert (Abbildung 43).

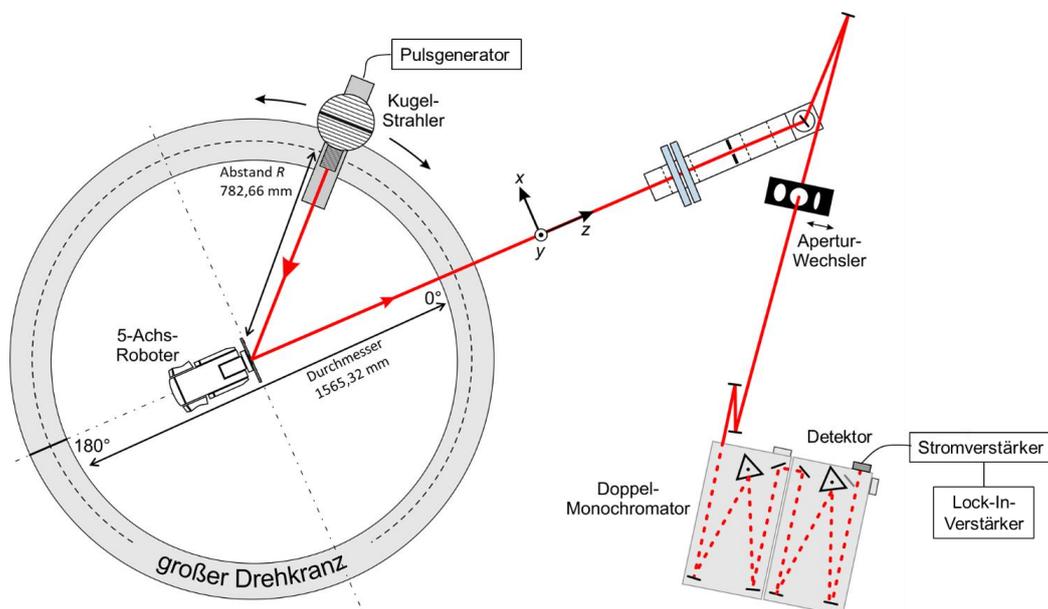


Abbildung 43: Schematische Skizze des Referenz-Gonioreflektometers der PTB (Abbildung 7) erweitert um den gepulsten Betrieb der Kugelstrahlerquelle und eine Lock-In-Verstärker-gestützte Detektion.

Beim gepulsten Betrieb der LEDs werden diese mit Rechteck- oder Impulsspannungen mithilfe eines Pulsgenerators betrieben. Dies wird auch als Pulsweitenmodulation (PWM) der Betriebsspannung bezeichnet und hat den Vorteil, dass höhere Strahlungsleistungen erreicht werden, da größere

Spitzenspannungen aufgrund des kürzeren Zeitfaktors zum Betrieb der LEDs verwendet werden können, ohne die LEDs zu beschädigen [141]. Der mittlere Lichtstrom der LED wird über das Tastverhältnis, also der Pulsdauer $T_{\text{eingeschaltet}}$ zur Periodendauer T eingestellt und auch als *Duty Cycle* bezeichnet. Dabei können zwei gepulste Betriebsarten für LEDs unterschieden werden. Der Quasi-Dauerstrichbetrieb und der Pulsbetrieb. Bei Ersterem wird ein Tastverhältnis von 50 % genutzt, um eine maximale Durchschnittsleistung zu erhalten. Beim Pulsmodus werden kürzere Duty Cycle verwendet, wodurch die maximale Spitzenleistung erzielt werden kann. Zum Pulsen des LED-SR wurde ein Pulsgenerator konstruiert, welcher Pulse bis 20 kHz mit Tastgraden von 0 – 100 % ermöglicht.

Der in dieser Arbeit eingesetzte Lock-In Verstärker ist im Anhang III.i aufgeführt und besitzt die Funktion „Boxcar Averager“ (Boxcar-Mittelung), wodurch auch Signale mit geringeren Tastgraden als 50 % eingesetzt und aufgenommen werden können. Dies ist gerade für gepulste LEDs geeignet, welche im Pulsmodus mit einem Tastverhältnis kleiner 50 % betrieben werden. Dabei wird das Eingangssignal mit einer sogenannten Boxcar-Funktion, einem Rechteckimpuls mit einer Impulsbreite T_{Box} , multipliziert. Auf diese Weise werden Rauschbeiträge außerhalb des Boxcar-Fensters unterdrückt. Eine Signalintegration ergibt pro Periode einen Wert für das Boxcar-Fenster und wird im Laufe der Messung über N -Perioden gemittelt [142].

Nachfolgend ist in Abbildung 44 exemplarisch je eine Messung des spektralen Strahldichtefaktors der weißen Keramikprobe bei Verwendung des LED-SR im gepulsten Betrieb mit 23 Hz und 137 Hz mit einem Tastverhältnis von jeweils 10 % (Informationen zum Pulsbetrieb siehe Anhang 0 und Abbildung A 6) im Vergleich zu der Gleichstrommessung aus Abbildung 29 aufgeführt.

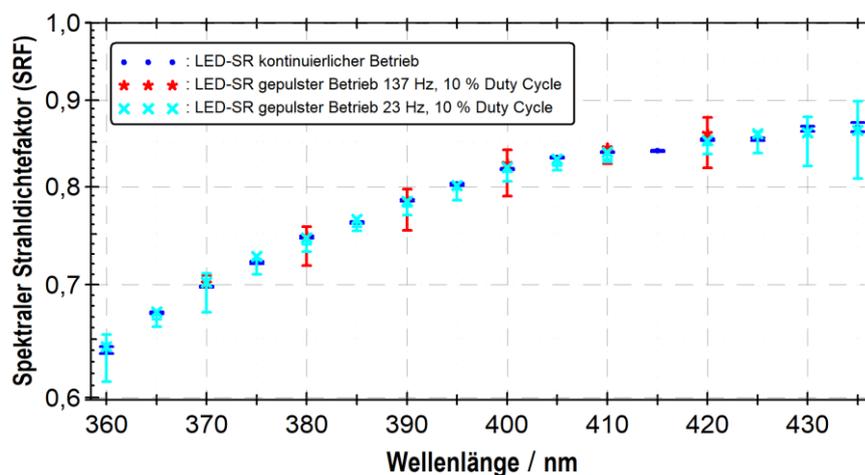


Abbildung 44: SRF einer weißen keramischen Probe mit der kombinierten Standardmessunsicherheit gemessen in einer $45^\circ:0^\circ$ -Geometrie mit dem LED-SR im kontinuierlichen Strombetrieb (dunkelblau) und gepulst betrieben bei 23 Hz (hellblau) und 137 Hz (rot) mit je einem Duty Cycle von 10 %. Zur Detektion wurde eine Silizium-Photodiode (Hamamatsu S1337) verwendet.

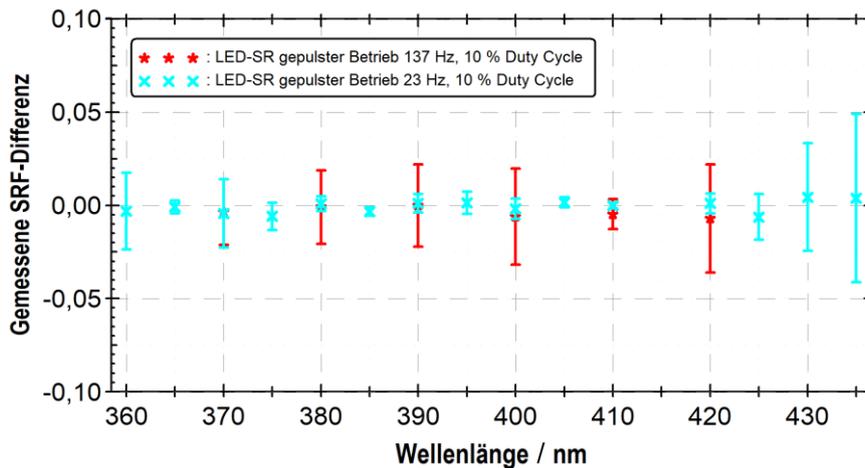


Abbildung 45: Die zu Abbildung 44 ermittelte SRF-Differenz $\beta_{\text{LED-SR im kontinuierlichen Betrieb}} - \beta_{\text{LED-SR gepulst}}$ zwischen kontinuierlichem Betrieb und gepulstem Betrieb mit 23 Hz (hellblau) und 137 Hz (rot) jeweils mit einem Duty Cycle von 10 % für eine weiße keramische Probe. Die angegebenen Unsicherheiten resultieren aus der Unsicherheitsfortpflanzung (Wurzel aus der Summe der Quadrate der Einzelunsicherheiten).

Die Messung des SRF in Abbildung 44 bestätigt die Möglichkeit des Einsatzes des LED-SR im gepulsten Betrieb in Kombination mit einem Lock-In Verstärker, da der ermittelte SRF im Rahmen der Unsicherheiten miteinander übereinstimmt. Dennoch weisen die Messungen im gepulsten Betrieb deutlich größere Unsicherheitsbeiträge auf (Tabelle A 4). Dies liegt zum einen daran, dass für diese Messungen ein Neutraldichtfilter verwendet wurde, um das Signal der Strahlungsquelle S_r abzuschwächen, sodass die beiden gemessenen Signale (detektiertes Signal der Strahlungsquelle S_r und das von der Probe reflektierte Signal S_i) die gleiche Größenordnung besitzen und im selben Detektionsbereich der Elektronik erfasst werden können (siehe Abschnitt 3.2.1 Dynamikbereich des Messsignals). Deshalb muss die Transmission des eingesetzten Neutraldichtfilters T_f in der Messunsicherheitsbetrachtung berücksichtigt werden. Diese trägt im größeren Maße zur Unsicherheit bei als die für die Nichtlinearitätskoeffizienten des Detektionssystems $c_{\text{sens } ij}$, welche für die Auswertung der Messung im kontinuierlichen Betrieb verwendet wurden. Um diesen Einfluss zu verringern und die Messunsicherheit im gepulsten Betrieb zu reduzieren, können in weiterführenden Untersuchungen die Nichtlinearitätskoeffizienten des Detektionssystems mit dem Lock-In Verstärker bestimmt werden.

Zum anderen trägt die Streuung der Messung aufgrund des gepulsten und damit verringerten Signals zur Unsicherheit bei. Zur besseren Vergleichbarkeit und um das Messprinzip und die Methode der Signal-zu-Rausch-Verbesserung mithilfe von LEDs und einem Lock-In Verstärker im Gonioreflektometer robust bei kleinen Messsignalen zu untersuchen, wurde der Strom im gepulsten Betrieb der LEDs nicht hochgesetzt. Dies ist technisch möglich, jedoch sollte in dieser Arbeit zunächst der direkte Vergleich zum kontinuierlichen Betrieb geprüft werden. Daher ist das im gepulsten Betrieb aufgenommene Messsignal im Mittel um 90 % kleiner als das Messsignal im kontinuierlichen Betrieb des LED-SR. Da zur Vergleichbarkeit die Messzeit beibehalten wurde, ist der Einfluss des deutlich kleineren Messsignals im gepulsten Betrieb trotz des verwendeten Lock-In Verstärkers in der Streuung

der Messwerte zu erkennen. Die gepulsten Messsignale und Messsignalgrößen sind vollständigshalber im Anhang 0 aufgeführt. Bei der Optimierung und weiterführenden Verwendung des LED-SR im gepulsten Betrieb stellt die Erhöhung des maximalen Spitzenstroms um fast 30 % im Fall der hier verwendeten LED-SR-Platine (Anhang II.ii) eine Option dar. Jedoch waren die bei dieser Untersuchung beabsichtigten kleinen Messsignale sogar bei Verwendung eines *Duty Cycles* von 10 % detektierbar und die erzielten Messergebnisse stimmen in allen Betriebsmodi des LED-SR mit Berücksichtigung ihrer Unsicherheiten miteinander und mit den Messergebnissen im kontinuierlichen Betrieb überein.

Zusammenfassend zeigt dieser Exkurs, dass der gepulste Betrieb des LED-SR im Gonioreflektometer in Kombination mit der Erweiterung des Messaufbaus um einen Lock-In Verstärker grundsätzlich ein verbessertes SRV erzielt und somit die robuste Detektion kleiner Messsignale ermöglicht. Diese Messaufbauerweiterung kann durch die Wahl der Betriebsparameter des LED-SR sowie der Detektionsparameter und Kalibrierungen des Lock-In Verstärkers zusätzlich optimiert und die daraus resultierende Messunsicherheit weiter reduziert werden. Zudem setzt diese Messdurchführung die Probe einer wesentlich geringeren Probenbestrahlung aus, wenn die Spitzenbestrahlungsleistung nicht erhöht wird und begünstigt, wenn notwendig, auf diese Weise eine Messung von strahlungssensitiven Proben (siehe Abschnitt 3.3.2.3).

3.3.2.5 LED-SR in anderen Spektralbereichen

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass der LED-SR eine geeignete Strahlungsquelle für das Gonioreflektometer in dem gewählten Spektralbereich (360 nm bis 430 nm) darstellt (Abschnitt 3.3.1). Aufgrund des modularen Aufbaus des LED-SR bietet dieser die Möglichkeit, ihn auf weitere Spektralbereiche zu erweitern und auch neue Platinen mit leistungsfähigeren LEDs, welche in Zukunft voraussichtlich auf den Markt kommen werden, zu integrieren.

Exemplarisch sollte dies anhand von drei weiteren Spektralbereichen gezeigt werden. Hierzu wurde eine Platine für einen tieferen UV-Spektralbereich unter Verwendung von zwei LED-Typen mit einem Emissionsmaxima bei 270 nm und 305 nm, eine Weißlicht-Platine basierend auf zwei Varianten von Weißlicht-LEDs mit jeweils einem Emissionsmaximum bei 440 nm und zwei unterschiedlichen Leuchtstoffen zur Lumineszenzkonversion und eine Platine für den IR-Spektralbereich mit einem Emissionsmaximum bei 1700 nm konstruiert. Dabei wurden die zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit kommerziell erhältlichen LEDs mit größtmöglicher optischer Leistung verwendet. Die Datenblätter der eingesetzten LEDs sind im Anhang II.iii aufgeführt und der gemessene Photostrom des LED-SR mit der jeweiligen Platine ist in Abbildung 46 im Vergleich zur „Standard“ LED-SR Platine für den UV-VIS-Spektralbereich dargestellt.

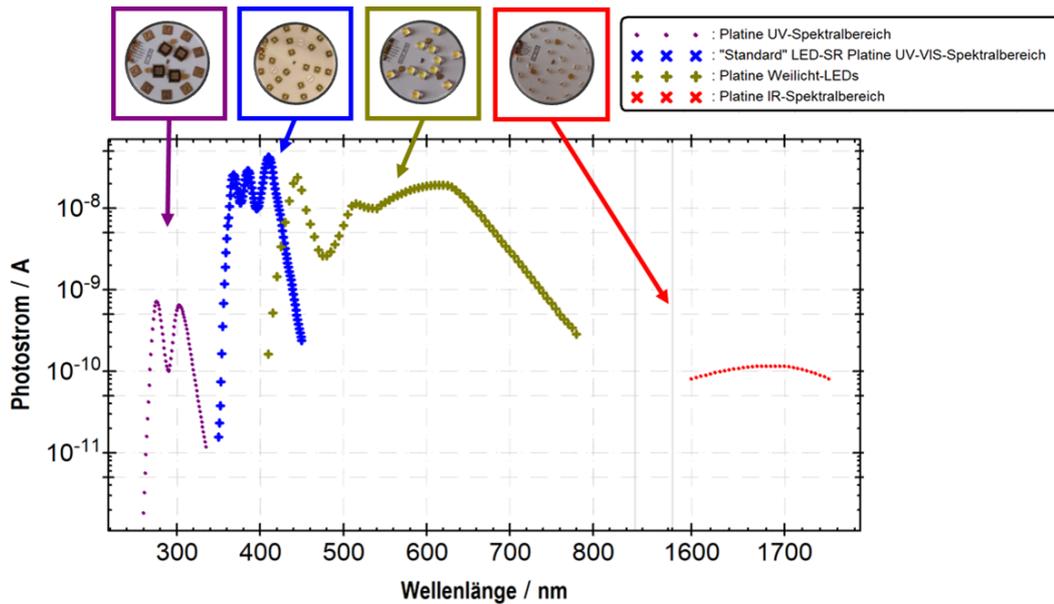


Abbildung 46: Logarithmische Darstellung des gemessenen Photostroms der exemplarischen LED-SR-Platinen für verschiedene Spektralbereiche. Die konstruierte UV-Platine mit zwei LED-Typen ist in Violett (270 nm und 305 nm), die „Standard“-LED-SR Platine für den UV-VIS-Spektralbereich in Blau (siehe Abschnitt 3.1), die Weißlicht-Platine in Ocker (zwei Varianten von Weißlicht LEDs bei 440 nm mit Phosphor) und die IR-Platine (1700 nm) in Rot dargestellt. Datenblätter der verwendeten LEDs sind im Anhang II.iii aufgeführt.

Die Betriebsmodi der konstruierten LED-Platinen unterscheiden sich aufgrund der verwendeten LEDs. So kann die IR-Platine nur im gepulsten Modus betrieben werden, wohingegen die UV-Platine auch im konstanten Strommodus verwendet werden kann. Auch die optische Leistung der einzelnen LED-Typen und dadurch der Platinen unterscheiden sich. Die Informationen können detailliert den zugehörigen Datenblättern entnommen werden (Anhang II.iii). Die Weißlicht-Platine besitzt eine vergleichbare optische Leistung und Signalstärke wie die zuvor in dieser Arbeit beschriebene und untersuchte „Standard“-LED-SR-Platine im UV/VIS-Spektralbereich (Abschnitt 3.1, Abbildung 46). Gleichzeitig zeigt Abbildung 46 deutlich, dass die optische Leistung der UV-Platine in etwa eine Größenordnung und die Leistung der IR-Platine ca. zwei Größenordnungen kleiner ausfällt. In der jetzigen Form wäre ein Einsatz dieser Platinen für Messungen am Gonioreflektometer somit nicht möglich bzw. mit einer deutlichen Zunahme an Messzyklen und Messzeit verbunden. Aufgrund der fortschreitenden Effizienzsteigerung von LEDs ist perspektivisch in naher Zukunft davon auszugehen, dass leistungsstärkere LEDs für diese Spektralbereiche erhältlich sein werden und somit der LED-SR auf diese Spektralbereiche ausgeweitet werden kann.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde eine neu entwickelte LED-Kugelstrahlungsquelle, der LED-SR, für das Gonioreflektometer konstruiert und ausführlich charakterisiert. Es wurde gezeigt, dass der LED-SR geeignete grundlegende Eigenschaften wie die spektrale Abdeckung (360 nm bis 430 nm), sowie Leistung und Stabilität für seinen Einsatzzweck aufweist. Durch seine hochpräzise aktive Temperaturregelung wird eine umgebungstemperaturunabhängige zeitliche Stabilität erreicht, mit einem Photostromdrift von lediglich 0,17 % in 100 h. Auch die Homogenität des Strahlungsfeldes, welche eine entscheidende Voraussetzung für das Messprinzip des Gonioreflektometers darstellt, ist vergleichbar mit dem derzeit verwendeten halogenbasierten Strahlungsquelle, dem Halogen-SR.

Zur Validierung des LED-SR wurden Vergleichsmessungen mit dem Halogen-SR anhand der absoluten Bestimmung des SRF in einer $45^\circ:0^\circ$ -Geometrie für drei Keramikproben mit unterschiedlichen Reflexionseigenschaften durchgeführt. Die Auswertung erfolgte in Kombination mit einer detaillierten Unsicherheitsanalyse für goniometrische absolute SRF-Messungen, wobei der Einfluss und Beitrag der einzelnen identifizierten Unsicherheitsquellen auf die kombinierte Messunsicherheit ausführlich beschrieben wurde. Im Zuge dieser Arbeit wurde der Auswertungsalgorithmus ergänzt, der nun eine flexible Analyse von Messdaten bei Verwendung unterschiedlicher Strahlungsquellen ermöglicht. Dies beinhaltet auch die Berücksichtigung der spezifischen Besonderheiten und Einflüsse der jeweiligen Strahlungsquellen wie z.B. den Einfluss der verwendeten Bandbreite bei der Messung.

Es konnte gezeigt werden, dass die Streuung der Messwerte bei kürzeren Wellenlängen als Effekt der abnehmenden Leistung des Halogen-SR in diesem Spektralbereich den größten Unsicherheitseinfluss zur resultierenden kombinierten Messunsicherheit der gemessenen drei Keramikproben beiträgt. Dieser Einfluss wird durch den LED-SR aufgrund seiner deutlich größeren Leistung in dem Spektralbereich zwischen 360 nm und 425 nm minimiert. Bei einer theoretisch angenommenen unendlichen Anzahl von Messungen entspricht die kombinierte Standardmessunsicherheit in etwa der systematischen Messunsicherheit. In diesem Fall wäre der Halogen-SR wegen seiner überwiegend kleineren systematischen Unsicherheit dem LED-SR vorzuziehen. Bei einer realistischen Anzahl von Messungen ist jedoch die Verwendung des LED-SR in seinem vorgesehenen Spektralbereich vorteilhafter bzw. zeitsparender, da die Messunsicherheit bei gleichbleibender Messzeit deutlich reduziert wird. Dies liegt in einer kleineren statistischen Messunsicherheit begründet, die hauptsächlich von der Standardabweichung der Messwerte dominiert wird. So konnte beispielsweise bei 390 nm die kombinierte Messunsicherheit für die weiße, rote und blaue Keramikprobe um einen Faktor von 3, 9 bzw. 6 im Vergleich zur Verwendung des Halogen-SR reduziert werden (Abbildung 31).

Die Verwendung des LED-SR für die absolute Messung des SRF führt somit zu einer deutlichen Verbesserung hinsichtlich der erreichbaren Messunsicherheit für den UV/VIS-Übergangsspektralbereich bei gleicher Messzeit. Die im Zentrum dieser Arbeit stehende Untersuchung

der Eignung einer LED-basierten Strahlungsquelle für die metrologische Anwendung in der Gonioreflektometrie konnte somit bestätigt werden. Der entwickelte LED-SR stellt in seinem angegebenen Spektralbereich eine wertvolle ergänzende Strahlungsquelle dar und legt damit den Grundstein für den künftigen Einsatz von LEDs in der Gonioreflektometrie und weiteren metrologischen Anwendungen.

Die in Abschnitt 3.3.2 begonnenen „Weiterführende Untersuchungen und alternative Messaufgaben für den Einsatz des LED-SR“ sollten in Zukunft weiter vorangetrieben werden. Durch die Entwicklungen und die Herstellung neuer Halbleiterverbindungen in der LED-Technologie können zudem weitere Spektralbereiche erschlossen werden und dank des modularen Aufbaus des LED-SR in diesen integriert werden. Der Ansatz, den LED-SR um tiefere UV-Spektralbereiche zu erweitern bzw. leistungsstärkere LEDs einzusetzen, ist mit der fortschreitenden Effizienzsteigerung von UV-LEDs in naher Zukunft vorstellbar. Dies gilt zunehmend auch für den IR-Spektralbereich, wenngleich dort die Entwicklung langsamer verläuft. Für den VIS-Spektralbereich sind bereits zahlreiche leistungsstarke LEDs mit einer Vielzahl an Leuchtstoffen bzw. Leuchtstoffmischungen erhältlich. Bei deren Einsatz ist insbesondere die Stabilität und das optische Verhalten der verwendeten Leuchtstoffe ausdrücklich zu prüfen. Denn sie können zu Instabilitäten in der spektralen Verteilung der Strahlungsquelle führen, welche sich erheblich auf die Messung auswirken. Insbesondere kurzzeitige Veränderungen und/oder Degradation der Leuchtstoffe würden bei dem Messprinzip ins Gewicht fallen.

Zur näheren Untersuchung von gonioapparenten bzw. goniochromatischen Eigenschaften von Materialien wie interferometrischen Beschichtungen, Metallic-Lacken und Glanzpigmenten könnten LEDs in einem alternativen Messaufbau eingesetzt werden. Die Messung solcher Proben benötigt oft einen kleineren Bestrahlungswinkel. Daher ist es denkbar, LEDs oder LED-Platinen als intensive Punktlichtquellen einzusetzen und die Strahlung zu parallelisieren.

Darüber hinaus kann der Betrieb von LEDs und dem LED-SR in Kombination mit einem Lock-In-Verstärker in einem gepulsten Modus weitergehend untersucht werden, um die optimalen Betriebsparameter zu erzielen und das Signal-zu-Rausch-Verhältnis zusätzlich zu verbessern und eine geringere Probenbestrahlung zu ermöglichen. Dies würde nicht nur die Messzeit verringern, sondern könnte sogar in Zukunft Messungen von schwach reflektierenden oder besonders strahlungssensitiven Proben erst ermöglichen.

Anhang

I Datenblatt der 400 W-Quarz-Halogenlampe von OSRAM GmbH

Bezeichnung: Xenophot Modell 64663 HLX [143]/64664 HLX [144] von OSRAM

HLX Niedervoltlampe ohne Reflektor, 400W 36V G6.35 EVD

Produktdatenblatt

OSRAM

64663 HLX

Halogen-Niedervoltlampen ohne Reflektor



Anwendungsgebiete

- Lampen für Spezialleuchten
- Medizinische Glasfaser (HLX)

Produktfamilien-Vorteile

- Verglichen mit Standardlampen bis zu 10 % höhere Lichtausbeute (HLX)
- Unmittelbar verfügbares Licht (HLX)

Produktfamilien-Eigenschaften

- Füllgas Xenon anstelle von Krypton (XENOPHOT HLX-Ausführung)
- Bis zu 10 % höherer Lichtstrom bei gleicher Leistungsaufnahme (XENOPHOT HLX-Ausführung)
- HLX Wolfram-Halogen-Niedervoltlampe mit oder ohne Reflektor
- Dimmbar (HLX)



Produktdatenblatt

Technische Daten

Produktinformation

Bestellnummer	64663 HLX
---------------	-----------

Elektrische Daten

Nennspannung	36,0 V
Nennleistung	400,00 W

Photometrische Daten

Farbtemperatur	3250 K
Nennlichtstrom	16200 lm
Farbwiedergabeindex Ra	100

Abmessungen & Gewicht

Durchmesser	15,0 mm
Länge	60,0 mm
Abstand Lichtschwerpunkt (LCL)	36,0 mm
Wendellänge	9,30 mm
Leuchtfeld	9,3*4,9 mm ²
Wendeldurchmesser	4,9 mm

Lebensdauer

Lebensdauer	50 h
-------------	------

Zusätzliche Produktdaten

Socket (Normbezeichnung)	G6.35
Minstdurchmesser des Lampengehäuses	16 mm

Einsatzmöglichkeiten

Brennstellung	s90
Anwendung	Sonstige

Klassifikationen

ANSI-Code	EVD
LIF	A1/239
Bestellnummer	64663 HLX

Umwelt Informationen

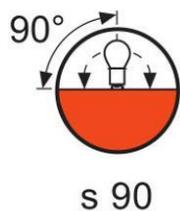
Produktdatenblatt

Informationen gemäß Art. 33 der EU Richtlinie (EC) 1907/2006 (REACH)	
Datum der Deklaration	20-11-2023
Primäre Erzeugnisnummer	4050300900490 4050300006741
Stoff der Kandidatenliste 1	No declarable substances contained
SCIP Deklarationsnummer	In Vorbereitung

Länderspezifische Informationen

EAN	METEL-Code	SEG-Nr.	STK-Nummer	UK Org
4050300006741	OSRH6466340	8327826	4739434	-
4050300006741	OSRH6466340	8327826	4739434	-

Produktdatenblatt



Verpackungsinformationen

Produkt-Code	Produkt-Bezeichnung	Verpackungseinheit (Stück pro Einheit)	Abmessungen (Länge x Breite x Höhe)	Volumen	Gewicht brutto
4050300006741	64663 HLX	Faltschachtel 1	25 mm x 23 mm x 70 mm	0.04 dm ³	2.00 g
4050300890937	64663 HLX	Versandschachtel 40	144 mm x 107 mm x 121 mm	1.86 dm ³	386.00 g

Die genannten Produktnummern beschreiben die kleinste bestellbare Mengeneinheit. Eine Versandeinheit kann mehrere Einzelprodukte beinhalten. Als Bestellmenge verwenden Sie bitte das Ein- oder Mehrfache einer Versandeinheit.

Haftungsausschluss

Änderungen und Irrtümer vorbehalten. Vergewissern Sie sich, dass Sie immer den neuesten Stand verwenden.

Produktdatenblatt

OSRAM**64664 HLX**

Halogen-Niedervoltlampen ohne Reflektor



Anwendungsgebiete

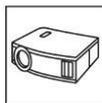
- Lampen für Spezialleuchten
- Medizinische Glasfaser (HLX)

Produktfamilien-Vorteile

- Verglichen mit Standardlampen bis zu 10 % höhere Lichtausbeute (HLX)
- Unmittelbar verfügbares Licht (HLX)

Produktfamilien-Eigenschaften

- Füllgas Xenon anstelle von Krypton (XENOPHOT HLX-Ausführung)
- Bis zu 10 % höherer Lichtstrom bei gleicher Leistungsaufnahme (XENOPHOT HLX-Ausführung)
- HLX Wolfram-Halogen-Niedervoltlampe mit oder ohne Reflektor
- Dimmbar (HLX)



Produktdatenblatt

Technische Daten

Produktinformation

Bestellnummer	64664 HLX
---------------	-----------

Elektrische Daten

Nennspannung	36,0 V
Nennleistung	400,00 W

Photometrische Daten

Farbtemperatur	3500 K
----------------	--------

Abmessungen & Gewicht

Durchmesser	18,0 mm
Länge	57,0 mm
Abstand Lichtschwerpunkt (LCL)	36,0 mm
Wendellänge	10,00 mm
Leuchtfeld	10,0°5,0 mm ² ¹⁾
Wendeldurchmesser	5,0 mm

¹⁾ Rundkern-Doppelwendel

Lebensdauer

Lebensdauer	150 h
-------------	-------

Zusätzliche Produktdaten

Sockel (Normbezeichnung)	G6.35
Minstdurchmesser des Lampengehäuses	15 mm

Einsatzmöglichkeiten

Brennstellung	s105
Anwendung	Sonstige

Klassifikationen

LIF	A1/270
Bestellnummer	64664 HLX

Umwelt Informationen

Informationen gemäß Art. 33 der EU Richtlinie (EC) 1907/2006 (REACH)	
Datum der Deklaration	20-11-2023

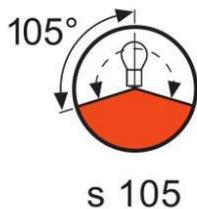
Produktdatenblatt

Primäre Erzeugnisnummer	4008321241474
Stoff der Kandidatenliste 1	No declarable substances contained
SCIP Deklarationsnummer	Kein deklarationspflichtiger Stoff enthalten

Länderspezifische Informationen

EAN	METEL-Code	SEG-No.	STK-Nummer	UK Org
4008321241474	OSRH64664HLX	-	4739418	-
4008321241474	OSRH64664HLX	-	4739418	-

Produktdatenblatt



Verpackungsinformationen

Produkt-Code	Produkt-Bezeichnung	Verpackungseinheit (Stück pro Einheit)	Abmessungen (Länge x Breite x Höhe)	Volumen	Gewicht brutto
4008321241474	64664 HLX	Faltschachtel 1	25 mm x 23 mm x 70 mm	0.04 dm ³	9.00 g
4008321241481	64664 HLX	Versandschachtel 40	144 mm x 107 mm x 121 mm	1.86 dm ³	401.00 g

Die genannten Produktnummern beschreiben die kleinste bestellbare Mengeneinheit. Eine Versandeinheit kann mehrere Einzelprodukte beinhalten. Als Bestellmenge verwenden Sie bitte das Ein- oder Mehrfache einer Versandeinheit.

Haftungsausschluss

Änderungen und Irrtümer vorbehalten. Vergewissern Sie sich, dass Sie immer den neuesten Stand verwenden.

II Datenblätter der verwendeten LEDs

II.i Roithner Laser Technik GmbH und Intelligent LED Solutions und LedEngin Inc

Die nachfolgend aufgeführten LEDs wurden testweise für die Prüfung und Konstruktion der Testversion und der ersten vollständigen Version des LED-SR bestellt und verwendet.

Roithner Laser Technik GmbH [145]

- Bezeichnung: HIGH POWER MULTI CHIP LEDS, TO PACKAGE
High power LED array, TO-66 package, containing 16 power LED chips
Flat glass window and guard ring, 4 x 4 LED matrix, Wavelengths: 365 nm
- Bezeichnung: HIGH POWER MULTI CHIP LEDS, TO PACKAGE
High power LED array, TO-66 package, containing 16 power LED chips
Flat glass window and guard ring, 4 x 4 LED matrix, Wavelengths: 395 nm


ROITHNER LASERTECHNIK GmbH

 WIEDNER HAUPTSTRASSE 76 IO40 VIENNA AUSTRIA
 TEL. +43 1 586 52 43 -0. FAX. -44 OFFICE@ROITHNER-LASER.COM


LED365-66-60-110

Rev. 2.0, 03.05.2019

- UV High Power LED Array
- 365 nm, 130 mW
- Chip: 350x350 μm , 60 pcs., AlGaN
- TO-66 Package, Flat Glass Cap
- Viewing Angle: 102°



Description

LED365-66-60-110 is a wide viewing and extremely high output power illuminator containing an array of 60 pcs. AlGaN chip dies, mounted on a metal stem TO-66 and covered with a flat glass cap. On forward bias a power radiation of typical 130 mW is given at a peak wavelength of 365 nm.

Maximum Ratings ($T_{\text{CASE}}=25^{\circ}\text{C}$)

Parameter	Symbol	Values		Unit
		Min.	Max.	
Power Dissipation	P_D		12	W
Forward Current	I_F		600	mA
Reverse Voltage	V_F		25	V
Thermal Resistance	R_{THJA}		2	K/W
Junction Temperature	T_J		120	$^{\circ}\text{C}$
Operating Temperature	T_{CASE}	- 40	+ 85	$^{\circ}\text{C}$
Storage Temperature	T_{STG}	- 40	+ 100	$^{\circ}\text{C}$
Lead Solder Temperature *	T_{SLD}		+ 265	$^{\circ}\text{C}$

* must be completed within 3 seconds

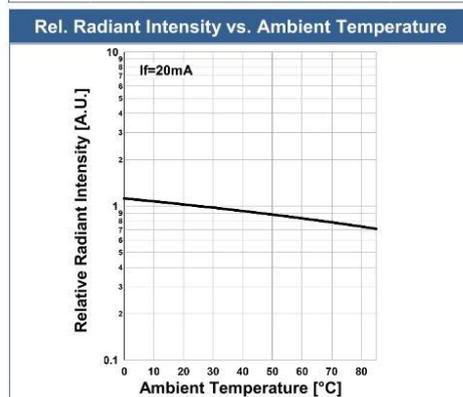
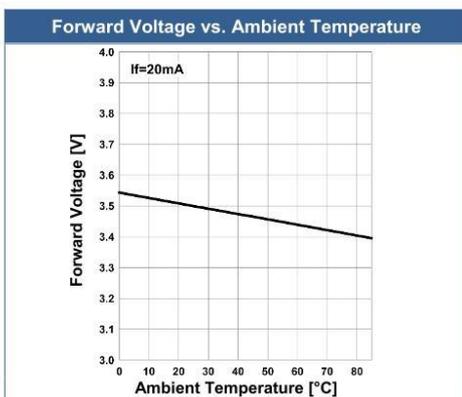
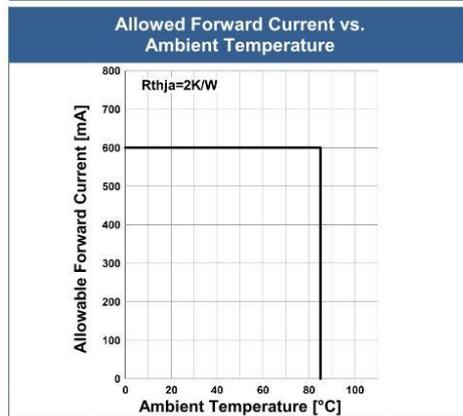
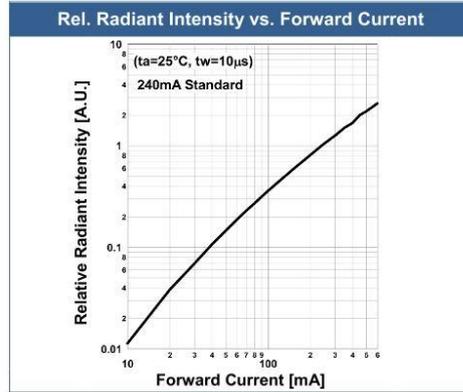
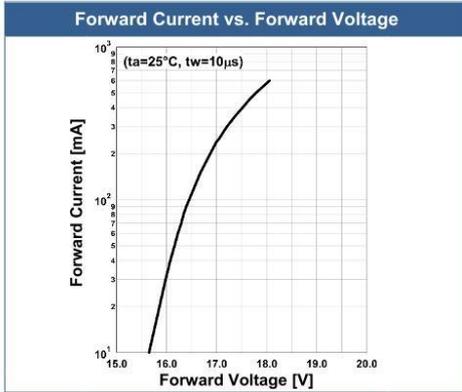
Electro-Optical Characteristics ($T_{\text{CASE}}=25^{\circ}\text{C}$)

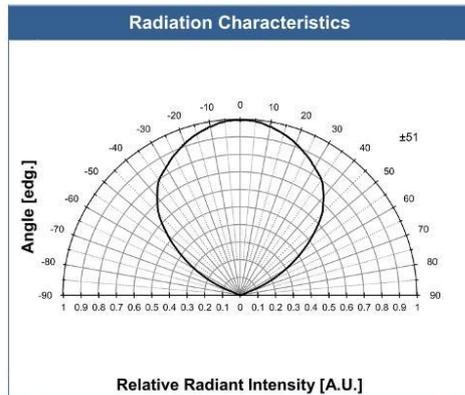
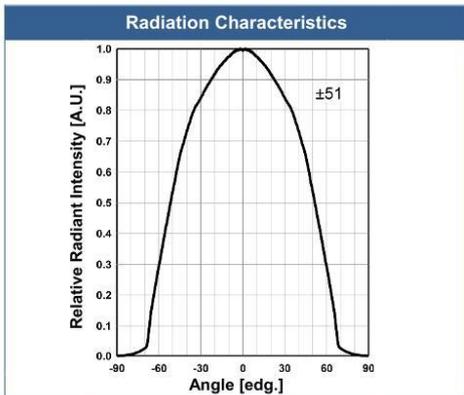
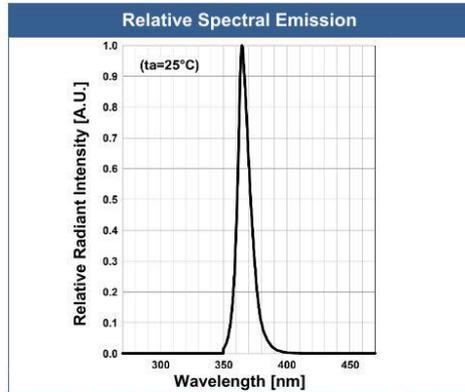
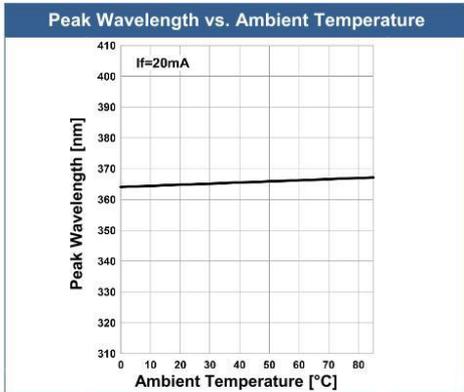
Parameter	Symbol	Conditions	Values			Unit
			Min.	Typ.	Max.	
Peak Wavelength	λ_P	$I_F=240\text{mA}$	360		370	nm
Half Width	$\Delta\lambda$	$I_F=240\text{mA}$		14		nm
Forward Voltage	V_F	$I_F=240\text{mA}$		17	20	V
Radiated Power *	P_O	$I_F=240\text{mA}$		130		mW
Viewing Angle	φ	$I_F=100\text{mA}$		102		deg.
Rise Time	t_r	$I_F=240\text{mA}$		15		ns
Fall Time	t_f	$I_F=240\text{mA}$		15		ns

* measured by S3584-08

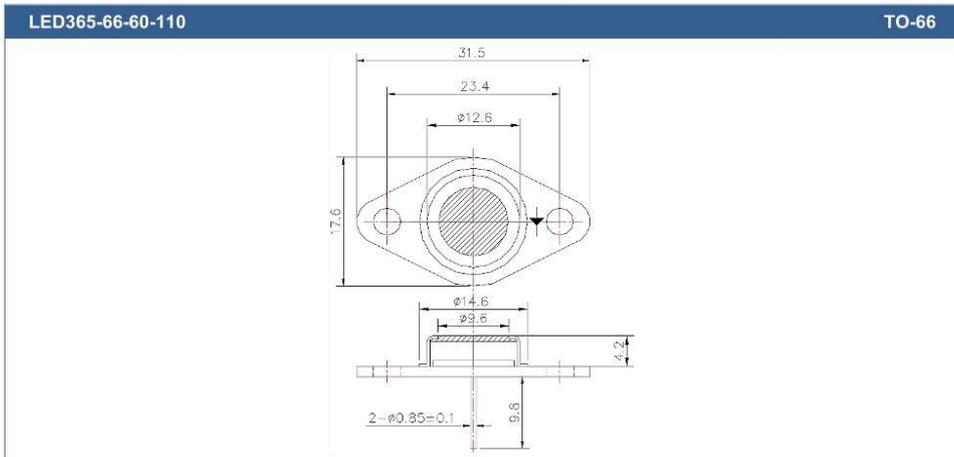


Typical Performance Curves





Outline Dimensions



All Dimensions in mm



Precautions

Cautions:

- This high power LED must be cooled!
- NOT look directly into the emitting area of the LED during operation!

Soldering:

- Do avoid overheating of the LED
- Do avoid electrostatic discharge (ESD)
- Do avoid mechanical stress, shock, and vibration
- Do only use non-corrosive flux
- Do not apply current to the LED until it has cooled down to room temperature after soldering

Cleaning:

Cleaning with isopropyl alcohol, propanol, or ethyl alcohol is recommended
DO NOT USE acetone, chloroform, trichloroethylene, or MKS
DO NOT USE ultrasonic cleaners

Static Electricity:

LEDs are sensitive to electrostatic discharge (ESD). Precautions against ESD must be taken when handling or operating these LEDs. Surge voltage or electrostatic discharge can result in complete failure of the device.

Radiation:

During operation these LEDs do emit **high intensity light**, which is hazardous to skin and eyes, and may cause cancer. Do avoid exposure to the emitted light. **Protective glasses are recommended.** It is further advised to attach a warning label on products/systems.

Operation:

Do only operate LEDs with a current source.

Running these LEDs from a voltage source will result in complete failure of the device. Current of a LED is an exponential function of the voltage across it. Usage of current regulated drive circuits is mandatory.

© All Rights Reserved

The above specifications are for reference purpose only and subjected to change without prior notice


ROITHNER LASERTECHNIK GmbH

 WIEDNER HAUPTSTRASSE 76 IO40 VIENNA AUSTRIA
 TEL. +43 1 586 52 43 -O. FAX. -44 OFFICE@ROITHNER-LASER.COM


LED395V-66-16100-110

rev 1.1 22.03.2017

- UV High Power LED Array
- 395 nm, 8 W
- Chip: 1x1 mm, 16 pcs., InGaN
- TO-66 package, Silicone and/or Epoxy resin
- Viewing Angle: 110°



Description

LED395V-66-16100-100 is composed by 16 pcs. of 1 x 1 mm² high current driven InGaN chip dies, mounted on a metal stem TO-66 and covered with epoxy resin or silicon resin.

It is designed for wide viewing and extremely high output power illuminator.

On forward bias, it emits a power radiation of typical **8 W** at a peak wavelength at **395 nm**.

Maximum Ratings ($T_{CASE}=25^{\circ}C$)

Parameter	Symbol	Values		Unit
		Min.	Max.	
Power Dissipation	P_D		32	W
Forward Current	I_F		2	A
Reverse Voltage	V_F		20	V
Operating Temperature	T_{CASE}	- 30	+ 80	°C
Storage Temperature	T_{STG}	- 30	+ 100	°C
Lead Solder Temperature *	T_{SLD}		+ 265	°C

* must be completed within 3 seconds

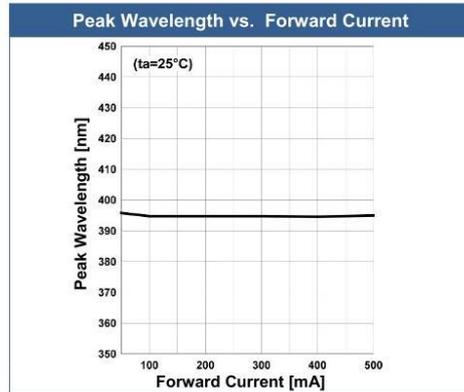
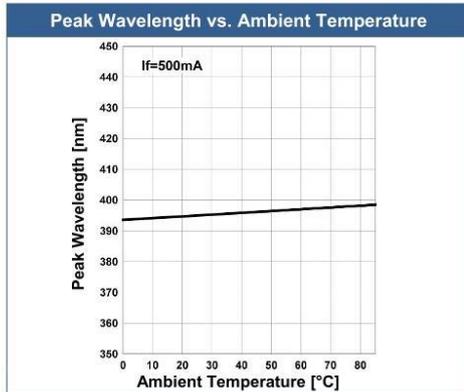
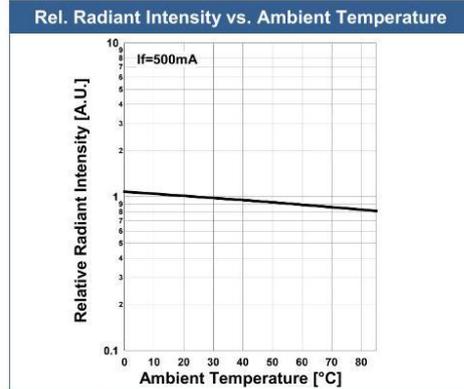
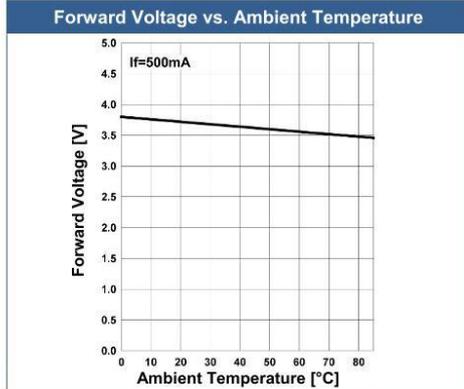
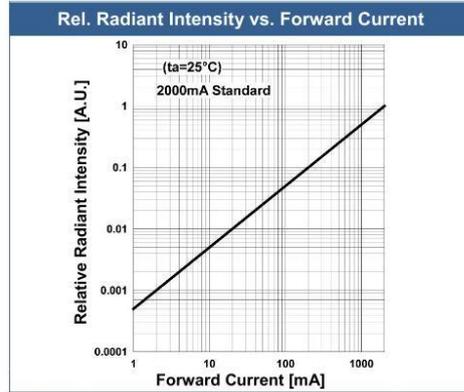
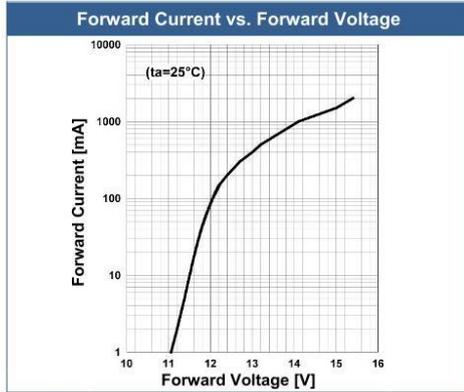
Electro-Optical Characteristics ($T_{CASE}=25^{\circ}C$)

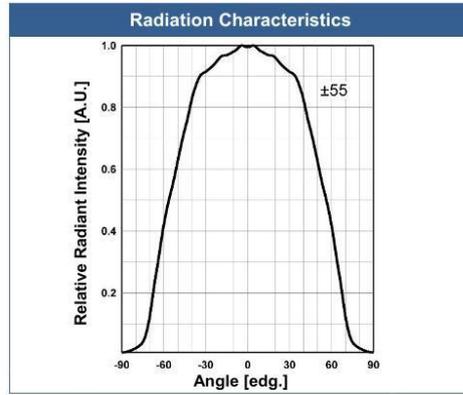
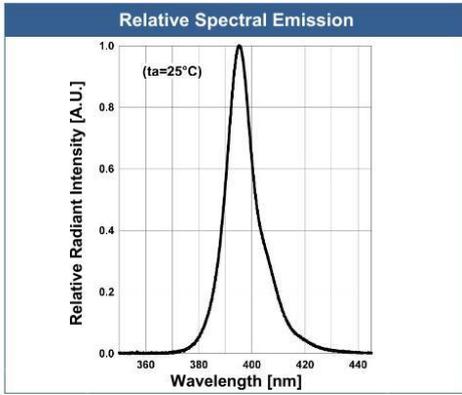
Parameter	Symbol	Conditions	Values			Unit
			Min.	Typ.	Max.	
Peak Wavelength	λ_P	$I_F=2A$	385	395	405	nm
Half Width	$\Delta\lambda$	$I_F=2A$		12		nm
Forward Voltage	V_F	$I_F=2A$		15.5		V
Radiated Power *	P_O	$I_F=2A$		8		W
Viewing Angle	φ	$I_F=100mA$		110		deg.

* measured by S3584-08

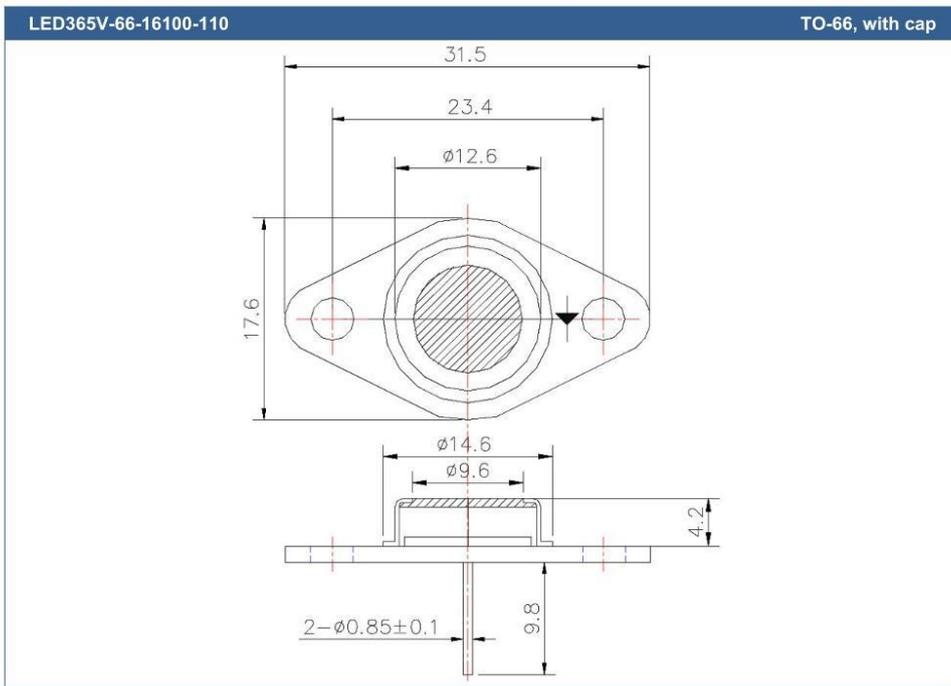


Typical Performance Curves





Outline Dimensions



All Dimensions in mm



Precautions

Cautions:

- This high power LED must be cooled!
- NOT look directly into the emitting area of the LED during operation!

Soldering:

- Do avoid overheating of the LED
- Do avoid electrostatic discharge (ESD)
- Do avoid mechanical stress, shock, and vibration
- Do only use non-corrosive flux
- Do not apply current to the LED until it has cooled down to room temperature after soldering

Cleaning:

Cleaning with isopropyl alcohol, propanol, or ethyl alcohol is recommended
DO NOT USE acetone, chloroform, trichloroethylene, or MKS
DO NOT USE ultrasonic cleaners

Static Electricity:

LEDs are sensitive to electrostatic discharge (ESD). Precautions against ESD must be taken when handling or operating these LEDs. Surge voltage or electrostatic discharge can result in complete failure of the device.

Radiation:

During operation these LEDs do emit **high intensity light**, which is hazardous to skin and eyes, and may cause cancer. Do avoid exposure to the emitted light. **Protective glasses are recommended.** It is further advised to attach a warning label on products/systems.

Operation:

Do only operate LEDs with a current source.

Running these LEDs from a voltage source will result in complete failure of the device. Current of a LED is an exponential function of the voltage across it. Usage of current regulated drive circuits is mandatory.

© All Rights Reserved

The above specifications are for reference purpose only and subjected to change without prior notice

Intelligent LED Solutions (ILS) [146]

- Bezeichnung: Intelligent LED Solutions UV PowerStar, Serie ILH-Xx01-Sxxx-SC211-WIR200
Intelligent LED SMD UV-LED 390nm / 5500 → 6500mW, Dom 140° 4 Pin
ILH-XU01-S380-SC211-WIR200, Wavelength: 390 nm
- Bezeichnung: Intelligent LED Solutions UV PowerStar, Serie ILH-Xx01-Sxxx-SC211-WIR200
Intelligent LED SMD UV-LED 420nm / 5500 → 6500mW, Dom 140° 4 Pin
ILH-XU01-S410-SC211-WIR200, Wavelength 420 nm



U9090 1 Power Star UV

ILH-XU01-Sxxx-SC211-WIR200 Series

Product Overview

At the heart of each UV PowerStar product is a compact, high quality and reliable TSLC U9090 12-chip UV LED, with a primary 140 degree lens, featuring high radiometric power density and design flexibility. The UV Power Star range is suited to demanding industrial applications, and features a vertical chip structure on a patented metal alloy substrate, offering advances in optical output and high thermal conductivity. PowerStars are compact, powerful LED light sources built on aluminium substrates for optimal thermal management. Available with 200mm wires as standard.



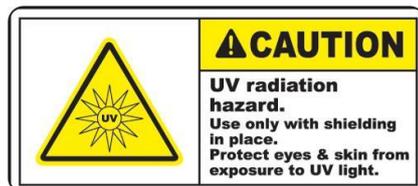
Applications

- Polymer Curing
- Ink Curing
- Counterfeit Detection
- Aquarium Lighting
- Medical and DNA Sequencing
- Inspection Equipment

Technical Features

- U9090 1 PowerStar contains a 12-chip UV LED with integral 140 degree silicon resin lens
- Mounting holes using M3 screws allows easy installation
- Size (L x W x H) : 20mm x 20mm x 4.67mm
- Available with 200mm connecting wires
- Suitable Heat Sinks available – check options in Heat Sink section
- Matching Power Supply available - check options in Power Supply section
- PowerStars can be linked together to produce longer chains
- Current up to 700mA

*This datasheet should be read in conjunction with the relevant TSLC data on the LED used



These products generate UVA radiation which can cause skin damage and conjunctivitis to humans and animals within a short time. The skin and eyes must be fully protected against exposure. You should be aware that UVA radiation does not eliminate harmful non-degradable substances such as heavy metals or pesticides. Assume IEC62471 Risk Group 3

www.i-led.co.uk

Important Information and Precautions

- The PowerStar's LED, when powered up, is very bright. Thus it is advised that you do not look directly at it. Turn the PowerStar away from you and do not shine into the eyes of others.
- These devices emit high intensity UV/NUV light. Necessary precautions must be taken during operation. Do not look directly into the light or look through the optical system when in operation. Protective eyewear should be worn at all times during operation.
- Lens discolouration may occur with prolonged exposure to UV/NUV light. Lens material will need to be tested for UV/NUV light compatibility and durability.
- PowerStars will overheat in operation if not attached to a suitable Heat Sink. Overheating can cause failure or irreparable damage.
- Do not operate PowerStars with a Power Supply with unlimited current. Connection to constant voltage Power Supplies that are not current limited may cause the PowerStar to consume current above the specified maximum and cause failure or irreparable damage.
- PowerStars, when operated, can reach high temperatures thus there is risk of injury if they are touched.
- DO NOT HOT PLUG ON LED SIDE OF POWER SUPPLY.
- DO NOT TOUCH or PUSH on the LED as this can cause irreparable damage.

Product Options

ILS PART NUMBER	Peak Wavelength *		Typical Wattage at 700mA	Forward Voltage *	Minimum Radiometric Power (mW) at 700mA *	Radiance Angle	Relevant TSLC led data
	min λ_p	max λ_p					
ILH-XU01-S380-SC211-WIR200.	380nm	390nm	37.8W	33.6-44.4V	9900mW	140° ($\pm 70^\circ$)	T9090U-UNL1
ILH-XU01-S390-SC211-WIR200.	390nm	400nm	37.8W	33.6-44.4V	9900mW	140° ($\pm 70^\circ$)	T9090U-UNL1
ILH-XU01-S400-SC211-WIR200.	400nm	410nm	37.8W	33.6-44.4V	9900mW	140° ($\pm 70^\circ$)	T9090U-UNL1
ILH-XU01-S410-SC211-WIR200.	410nm	420nm	37.8W	33.6-44.4V	9900mW	140° ($\pm 70^\circ$)	T9090U-UNL1

*Radiometric power is measured with an accuracy of $\pm 10\%$

*The forward voltage is measured with an accuracy of $\pm 0.2V$

*The peak/dominant wavelength is measured with an accuracy of $\pm 1nm$

Minimum and Maximum Ratings

ILS PART NUMBER	Operating Temperature at Tc-Point [$^{\circ}C$]*	Storage Temperature [$^{\circ}C$]*	Forward Current per chip [mA]*	Reverse Voltage [Vdc]*
ILH-XU01-S380-SC211-WIR200.	70 $^{\circ}C$ max	-40 $^{\circ}C$ ~ 125 $^{\circ}C$	700 mA max	Not designed to be driven in reverse bias
ILH-XU01-S390-SC211-WIR200.	70 $^{\circ}C$ max	-40 $^{\circ}C$ ~ 125 $^{\circ}C$	700 mA max	Not designed to be driven in reverse bias
ILH-XU01-S400-SC211-WIR200.	70 $^{\circ}C$ max	-40 $^{\circ}C$ ~ 125 $^{\circ}C$	700 mA max	Not designed to be driven in reverse bias
ILH-XU01-S410-SC211-WIR200.	70 $^{\circ}C$ max	-40 $^{\circ}C$ ~ 125 $^{\circ}C$	700 mA max	Not designed to be driven in reverse bias

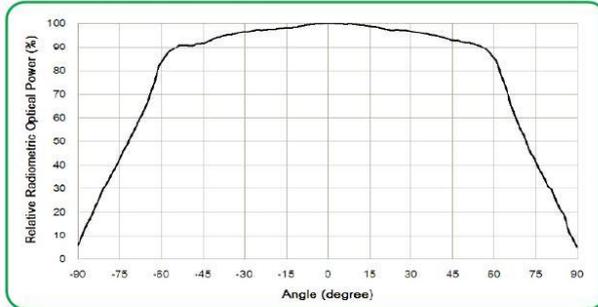
* Exceeding maximum ratings for operating and storage temperature will reduce expected life time or destroy the LED module.

Exceeding maximum ratings for operating voltage will cause hazardous overload and will likely destroy the LED module.

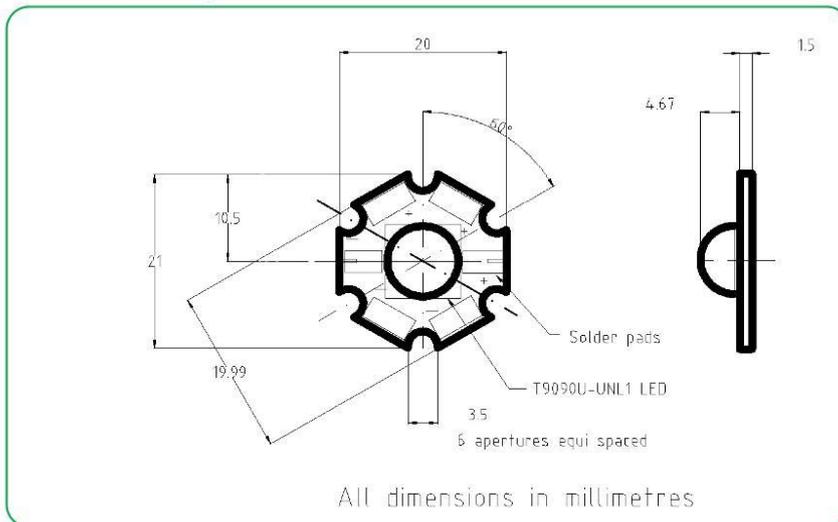
The temperature of the LED module must be measured at the Tc-Point according to EN60598-1 in a thermally constant status with a temperature sensor or a temperature sensitive label.

www.i-led.co.uk

Radiation of single LED



Technical Drawing



3D drawing files are available on request from ILS. Please call or email

Lens and Reflector Options

LEDIL precision-engineered Lenses and Reflectors allow for rapid deployment of all types of light fixtures, including street lights, wall-wash, high-bay, sconces, emergency beacons, parking garage/low-bay, MR and AR down lights, and dock lights. Precision-engineered for maximum efficiency and durability, LEDIL Lenses and Reflectors are released alongside the latest product releases from our LED suppliers. You select the best LED for the application; choose LEDIL and you're selecting the best optical solution as well.



No Lenses or Reflectors for this product are available at the current moment. When lenses do become available for this board we will update this datasheet.



www.i-led.co.uk

Heat Sink Options

ILS has introduced a series of Aluminium Alloy Heat Sinks to be used with our standard range of PowerStars and PowerClusters. These Heat Sinks are supplied with fixing screws for the light engine and for fixing to a base plate. They also come with Thermal Interface Material (TIM) attached to the top surface. More versions will be introduced over the coming months and we are happy to manufacture custom Heat Sinks to your request.

ILS Product		No Heat Sink, in free air	ILA-HSINK-STAR-50X20MM.	ILA-HSINK-STAR-50X40MM.	ILA-HSINK-STAR-50X60MM.	ILA-HSINK-STAR-50X80MM.	ILA-HSINK-CLUSTER-70X70X55MM.	ILA-HSINK-CLUSTER-78X46X25MM.
U9090 1 PowerStar UV	350mA							
	500mA							
	700mA							

Key

- Operates under the recommended ILS junction temperature
- Operates under the recommended LED maximum junction temperature
- Not suitable for use
- Heatsink not designed for use with this product



www.i-led.co.uk

Power Supply Options

ILS has a comprehensive range of standard Power Supplies. The table below shows the total number of ILS products each Power Supply can drive.

Additional Power Supplies are being introduced so please call us or check our website for the latest offering.

ILS Driver Part No.	Rating	Current	U9090 1 PowerStar UV per LED Driver	
IZC070-035F-0067C-SA	35W	700 mA	1	
IZC045-040A-9266C-SA	40W	450 mA dim	1-2	
IZC070-050A-9267C-SA	50W	700 mA dim	1	
IZC050-060F-9067C-QA	60W	500 mA	1	
IZC070-075A-9267C-SA	75W	700 mA dim	1	
IZC050-060F-9067C-QA	60W	500 mA	1-2	
IZC070-075A-9267C-SA	75W	700 mA dim	2	

Thermal Interface Material Options

ILS have produced a range of high-performance, cost effective Thermal Interface Materials to match perfectly their standard products.

Our product fills the air pockets between the two surfaces, forming a continuous layer to conduct heat away from the LED to the Heat Sink.

ILS offer our TIM in three options – Double Sided Adhesive, Single Sided Adhesive and Non-Adhesive.

Product	Non Adhesive	Single Sided Adhesive	Double Sided Adhesive
Star	ILA-TIM-STAR-0A	ILA-TIM-STAR-1A	ILA-TIM-STAR-2A

Other sizes are available, including customised parts.

www.i-led.co.uk

Assembly Information

- The mounting of the U9090 1 PowerStar has to be on a metal Heat Sink.
- In order to optimise the thermal management, the metal surface needs to be clean (dirt and oil free) and planar for the best contact with the LED module. A thermal grease or heat transfer material is highly recommended.

Safety Information

- The LED module itself and all its components must not be mechanically stressed.
- Assembly must not damage or destroy conducting paths on the circuit board.
- The mounting of the module is carried out by attaching it at the mounting holes. Metal mounting screws must be insulated with synthetic washers to prevent circuit board damage and possible short circuiting.
- To avoid mechanical damage to the connecting cables, the boards should be attached securely to the intended substrate. Heavy vibration should be avoided.
- Observe correct polarity!
- Depending on the product, incorrect polarity will lead to emission of red or no light. The module can be destroyed!
- Pay attention to standard ESD precautions when installing the PowerStars.
- The PowerStars, as manufactured, have no conformal coating and therefore offer no inherent protection against corrosion.
- Damage by corrosion will not be accepted as a materials defect claim. It is the users responsibility to provide suitable protection against corrosive agents such as moisture and condensation and other harmful elements.
- For outdoor usage, a housing is definitely required to protect the board against environmental influences. The design of the housing must correspond to the IP standards in the application. It is also the responsibility of the user to ensure any housings or modifications keep the Tc junction temperature to within stated ranges.
- To also ease the luminaire/installation approval, electronic control gear for LED or LED modules should carry the CE mark and be ENEC certified. In Europe the declarations of conformity must include the following standards: CE: EC 61374-2-13, EN 55015, IEC 61547 and IEC 61000-3-2 - ENEC: 61374-2-13 and IEC/EN 62384.
- The evaluation of eye safety occurs according to the standard IEC 62471:2006 ("photobiological safety of lamps and lamp systems"). Within the risk grouping system of this CIE standard, the LED specified in this data sheet falls into the class "moderate risk" (exposure time 0.25s). Under real circumstances (for exposure time, eye pupils, observation distance), it is assumed that no endangerment to the eye exists from these devices. As a matter of principle, however, it should be mentioned that intense light sources have a high secondary exposure potential due to their blinding effect. As is also true when viewing other bright light sources (e.g. headlights), temporary reduction in visual acuity and afterimages can occur, leading to irritation, annoyance, visual impairment and even accidents, depending on the situation.

For further information please contact ILS

The values contained in this data sheet can change due to technical innovations. Any such changes will be made without separate notification.



LedEngin Inc [147]

- Bezeichnung: LZ4 UV-LED-SMD 4-fach LED UV-Array 370nm / 2000 → 3800mW, Rund 110°
8 Pin, LZ4-44UV00-0000, Wavelength 370 nm

365nm UV LED Gen 2 Emitter

LZ4-04UV00

LED ENGIN
BRIGHT LIGHT. TINY PACKAGE.



Key Features

- High flux density 365nm surface mount ceramic package UV LED with integrated flat glass lens
- 2.2 mm x 2.2 mm Light Emitting Surface (LES) in a 7.0mm x 7.0mm emitter footprint
- Ideal for imaging optics with beam angles as narrow as $\pm 3^\circ$
- Very low Thermal Resistance (1.1°C/W)
- Electrically neutral thermal path
- JEDEC Level 1 for Moisture Sensitivity Level
- Lead (Pb) free and RoHS compliant
- Reflow solderable (up to 6 cycles)
- Emitter available on Star MCPCB (optional)

Typical Applications

- Curing
- Printing
- PCB Exposure
- Sterilization
- Medical
- Currency Verification
- Fluorescence Microscopy
- Inspection of dyes, rodent and animal contamination
- Forensics

Description

The LZ4-04UV00 UV LED emitter provides superior radiometric power in the wavelength range specifically required for applications like curing, printing, sterilization, currency verification, and various medical applications. With a 2.2mm x 2.2mm LES, this package provides exceptional optical power density. The flat glass lens facilitates the use of imaging optics to produce extreme narrow beam angle, as well as light pipes and other optics. The high quality materials used in the package are chosen to optimize light output, have excellent UV resistance, and minimize stresses which results in monumental reliability and radiant flux maintenance.



COPYRIGHT © 2015 LED ENGIN. ALL RIGHTS RESERVED.

LZ4-04UV00 (1.0 – 06/03/15)

LED Engin | 651 River Oaks Parkway | San Jose, CA 95134 USA | ph +1 408 922 7200 | fax +1 408 922 0158 | em sales@ledengin.com | www.ledengin.com



Part number options

Base part number

Part number	Description
LZ4-04UV00-xxxx	LZ4 emitter
LZ4-44UV00-xxxx	LZ4 emitter on Standard Star MCPCB

Bin kit option codes

UV, Ultra-Violet (365nm)			
Kit number suffix	Min flux Bin	Color Bin Range	Description
0000	Q	U0	Q minimum flux; wavelength U0 bin only



Radiant Flux Bins

Table 1:

Bin Code	Minimum Radiant Flux (Φ) @ $I_F = 700\text{mA}$ ^[1,2] (W)	Maximum Radiant Flux (Φ) @ $I_F = 700\text{mA}$ ^[1,2] (W)
Q	2.00	2.40
R	2.40	3.00
S	3.00	3.80

Notes for Table 1:

1. Radiant flux performance is measured at 10ms pulse, $T_C = 25^\circ\text{C}$. LED Engin maintains a tolerance of $\pm 10\%$ on flux measurements.

Peak Wavelength Bins

Table 2:

Bin Code	Minimum Peak Wavelength (λ_p) @ $I_F = 700\text{mA}$ ^[1] (nm)	Maximum Peak Wavelength (λ_p) @ $I_F = 700\text{mA}$ ^[1] (nm)
U0	365	370

Notes for Table 2:

1. Peak wavelength is measured at 10ms pulse, $T_C = 25^\circ\text{C}$. LED Engin maintains a tolerance of $\pm 2.0\text{nm}$ on peak wavelength measurements.

Forward Voltage Bins

Table 3:

Bin Code	Minimum Forward Voltage (V_F) @ $I_F = 700\text{mA}$ ^[1] (V)	Maximum Forward Voltage (V_F) @ $I_F = 700\text{mA}$ ^[1] (V)
0	14.0	18.0

Notes for Table 3:

1. Forward voltage is measured at 10ms pulse, $T_C = 25^\circ\text{C}$. LED Engin maintains a tolerance of $\pm 0.04\text{V}$ for forward voltage measurements.



Absolute Maximum Ratings

Table 4:

Parameter	Symbol	Value	Unit
DC Forward Current ^[1]	I_F	1000	mA
Peak Pulsed Forward Current ^[2]	I_{FP}	1000	mA
Reverse Voltage	V_R	See Note 3	V
Storage Temperature	T_{stg}	-40 ~ +150	°C
Junction Temperature	T_j	130	°C
Soldering Temperature ^[4]	T_{sol}	260	°C
Allowable Reflow Cycles		6	
ESD Sensitivity ^[5]		> 2,000 V HBM Class 2 JESD22-A114-D	

Notes for Table 4:

- Maximum DC forward current is determined by the overall thermal resistance and ambient temperature. Follow the curves in Figure 11 for current derating.
- Pulse forward current conditions: Pulse Width \leq 10msec and Duty Cycle \leq 10%.
- LEDs are not designed to be reverse biased.
- Solder conditions per JEDEC 020D. See Reflow Soldering Profile Figure 3.
- LED Engin recommends taking reasonable precautions towards possible ESD damages and handling the LZ4-04UV00 in an electrostatic protected area (EPA). An EPA may be adequately protected by ESD controls as outlined in ANSI/ESD S6.1.

Optical Characteristics @ $T_C = 25^\circ\text{C}$

Table 5:

Parameter	Symbol	Typical	Unit
Radiant Flux (@ $I_F = 700\text{mA}$)	Φ	2.90	W
Radiant Flux (@ $I_F = 1000\text{mA}$)	Φ	4.10	W
Peak Wavelength ^[1]	λ_p	365	nm
Viewing Angle ^[2]	$2\Theta_{1/2}$	110	Degrees
Total Included Angle ^[3]	$\Theta_{0.9V}$	150	Degrees

Notes for Table 5:

- When operating the UV LED, observe IEC 60825-1 class 3B rating. Avoid exposure to the beam.
- Viewing Angle is the off axis angle from emitter centerline where the radiometric power is $\frac{1}{2}$ of the peak value.
- Total Included Angle is the total angle that includes 90% of the total radiant flux.

Electrical Characteristics @ $T_C = 25^\circ\text{C}$

Table 6:

Parameter	Symbol	Typical	Unit
Forward Voltage (@ $I_F = 700\text{mA}$)	V_F	15.2	V
Temperature Coefficient of Forward Voltage	$\Delta V_F / \Delta T_j$	-5.2	mV/°C
Thermal Resistance (Junction to Case)	$R\Theta_{j-c}$	1.1	°C/W



IPC/JEDEC Moisture Sensitivity Level

Table 7 - IPC/JEDEC J-STD-20D.1 MSL Classification:

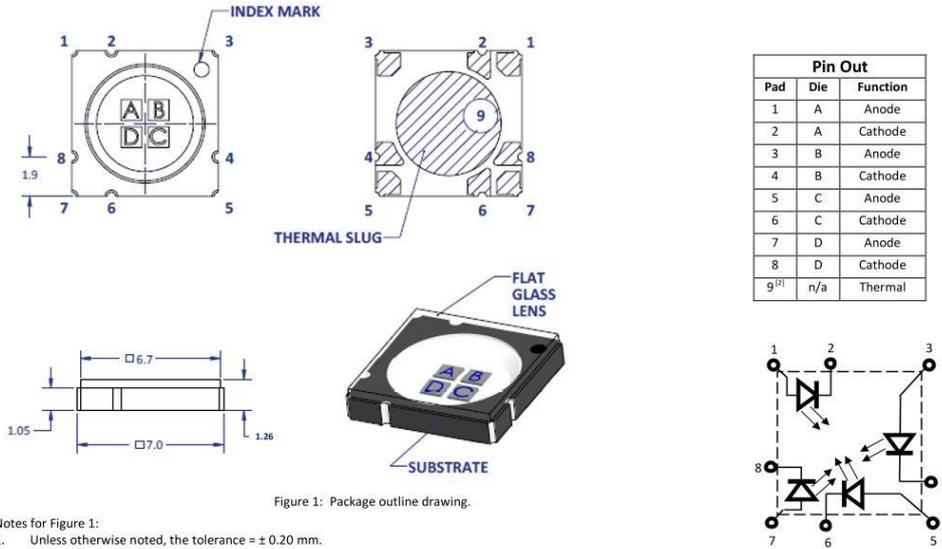
Level	Floor Life		Soak Requirements			
	Time	Conditions	Standard Time (hrs)	Accelerated Conditions	Accelerated Time (hrs)	Accelerated Conditions
1	Unlimited	≤ 30°C/ 85% RH	168 +5/-0	85°C/ 85% RH	n/a	n/a

Notes for Table 7:

- The standard soak time includes a default value of 24 hours for semiconductor manufacturer's exposure time (MET) between bake and bag and includes the maximum time allowed out of the bag at the distributor's facility.



Mechanical Dimensions (mm)



- Notes for Figure 1:
1. Unless otherwise noted, the tolerance = ± 0.20 mm.
 2. Thermal contact, Pad 9, is electrically neutral.

Figure 1: Package outline drawing.

Recommended Solder Pad Layout (mm)

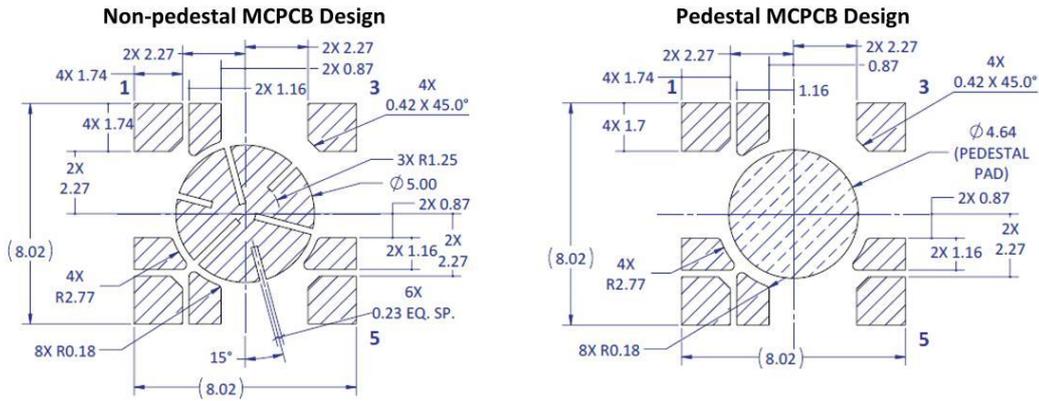


Figure 2a: Recommended solder pad layout for anode, cathode, and thermal pad for non-pedestal and pedestal design

- Note for Figure 2a:
1. Unless otherwise noted, the tolerance = ± 0.20 mm.
 2. Pedestal MCPCB allows the emitter thermal slug to be soldered directly to the metal core of the MCPCB. Such MCPCB eliminate the high thermal resistance dielectric layer that standard MCPCB technologies use in between the emitter thermal slug and the metal core of the MCPCB, thus lowering the overall system thermal resistance.
 3. LED Engin recommends x-ray sample monitoring for solder voids underneath the emitter thermal slug. The total area covered by solder voids should be less than 20% of the total emitter thermal slug area. Excessive solder voids will increase the emitter to MCPCB thermal resistance and may lead to higher failure rates due to thermal over stress.
 4. MCPCBs designed for other LZ4 emitters are compatible for this emitter.



Recommended Solder Mask Layout (mm)

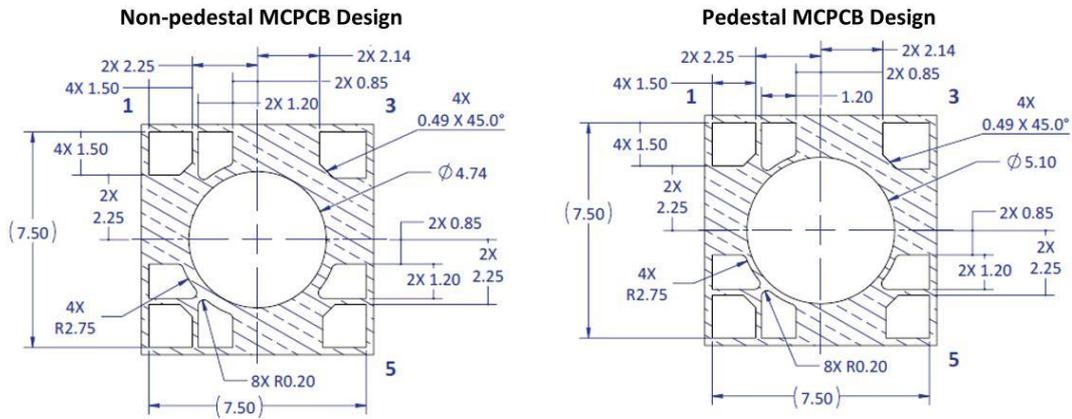


Figure 2b: Recommended solder mask opening for anode, cathode, and thermal pad for non-pedestal and pedestal design

Note for Figure 2b:
1. Unless otherwise noted, the tolerance = ± 0.20 mm.

Recommended 8mil Stencil Apertures Layout (mm)

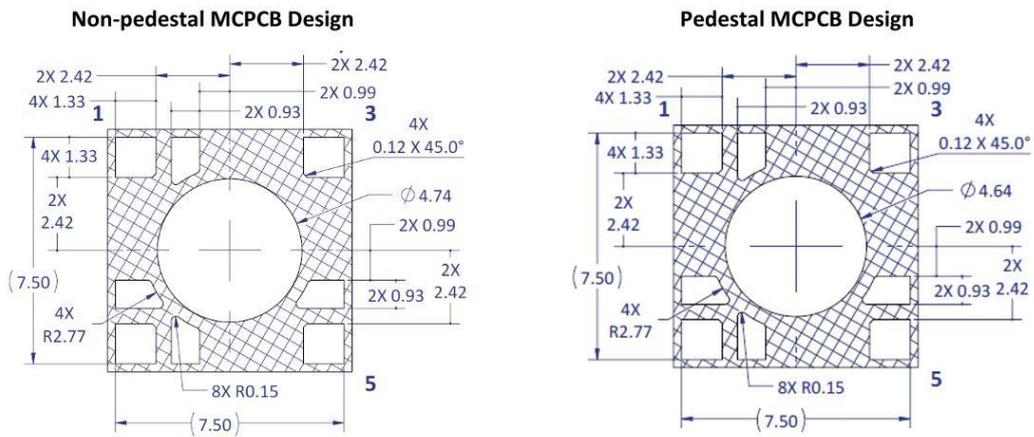


Figure 2c: Recommended solder mask opening for anode, cathode, and thermal pad for non-pedestal and pedestal design

Note for Figure 2c:
1. Unless otherwise noted, the tolerance = ± 0.20 mm.



Reflow Soldering Profile

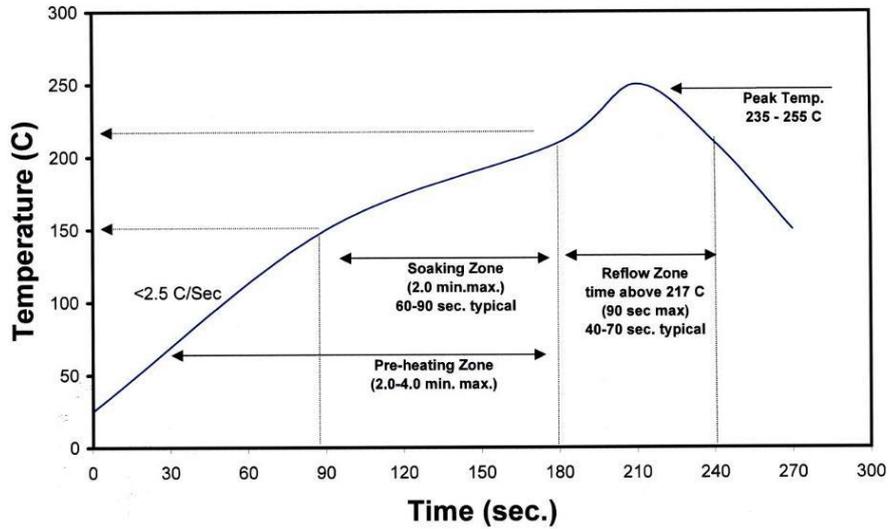


Figure 3: Reflow soldering profile for lead free soldering

Typical Radiation Pattern

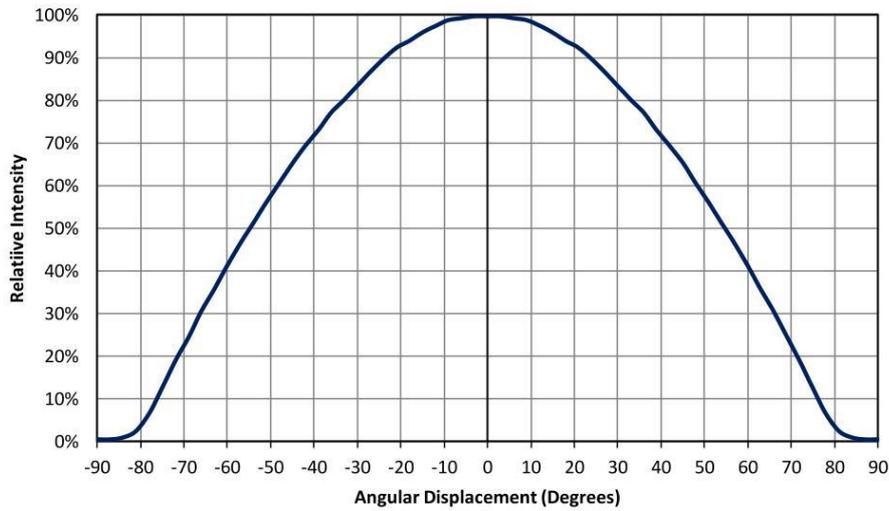


Figure 4: Typical representative spatial radiation pattern



Typical Relative Spectral Power Distribution

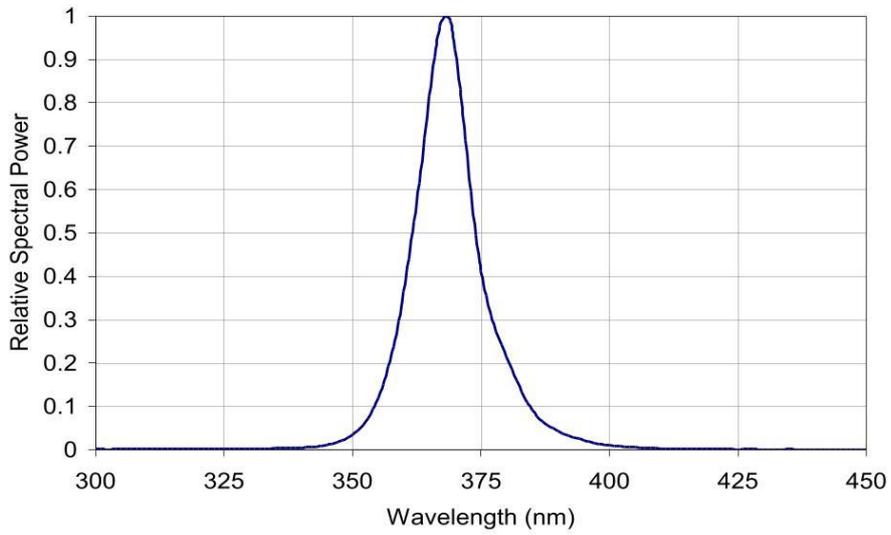


Figure 5: Typical relative spectral power vs. wavelength @ T_c = 25°C

Typical Forward Current Characteristics

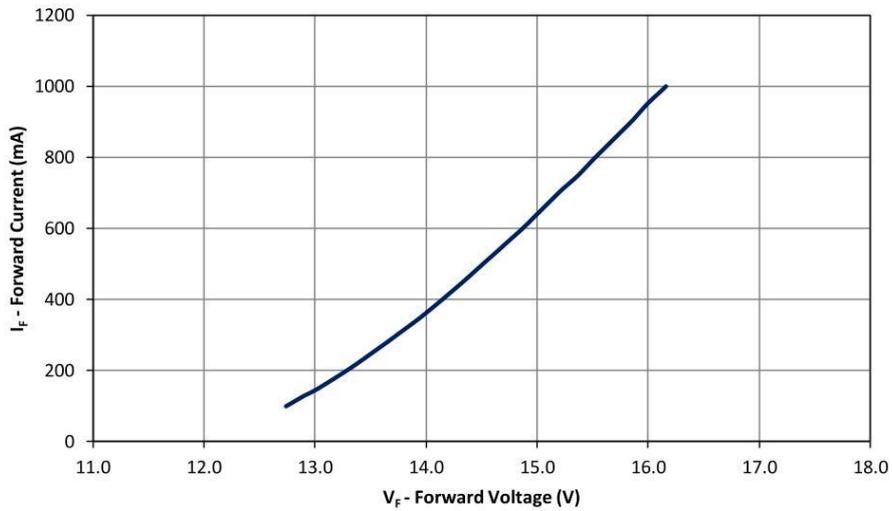


Figure 6: Typical forward current vs. forward voltage @ T_c = 25°C



Typical Normalized Radiant Flux over Current

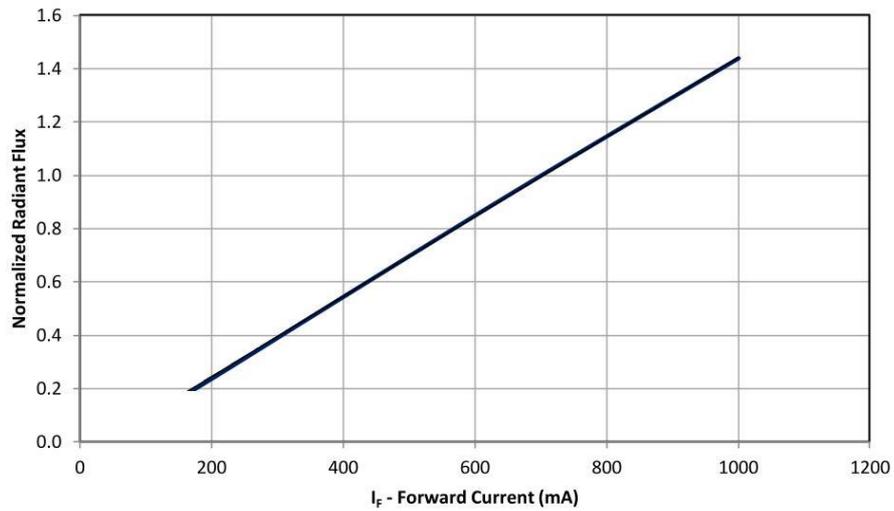


Figure 7: Typical normalized radiant flux vs. forward current @ $T_c = 25^\circ\text{C}$

Typical Normalized Radiant Flux over Temperature

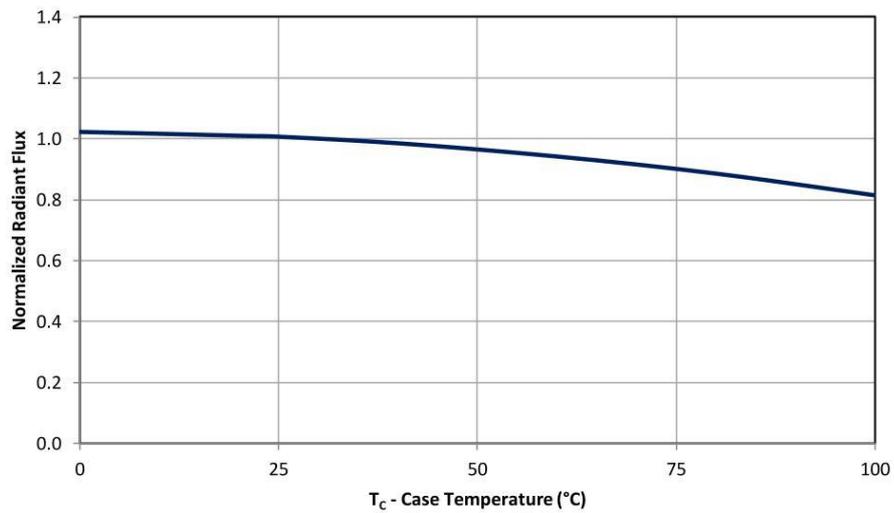


Figure 8: Typical normalized radiant flux vs. case temperature



Typical Peak Wavelength Shift over Current

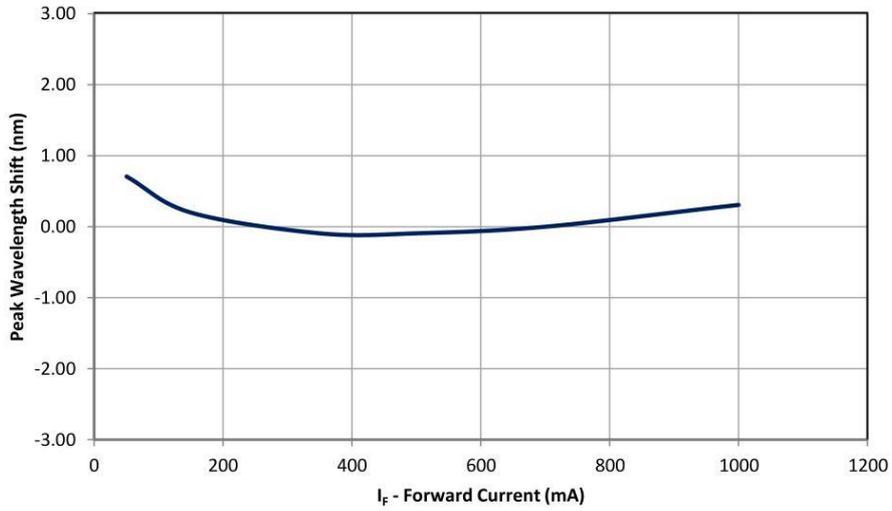


Figure 9: Typical peak wavelength shift vs. forward current @ T_c = 25°C

Typical Peak Wavelength Shift over Temperature

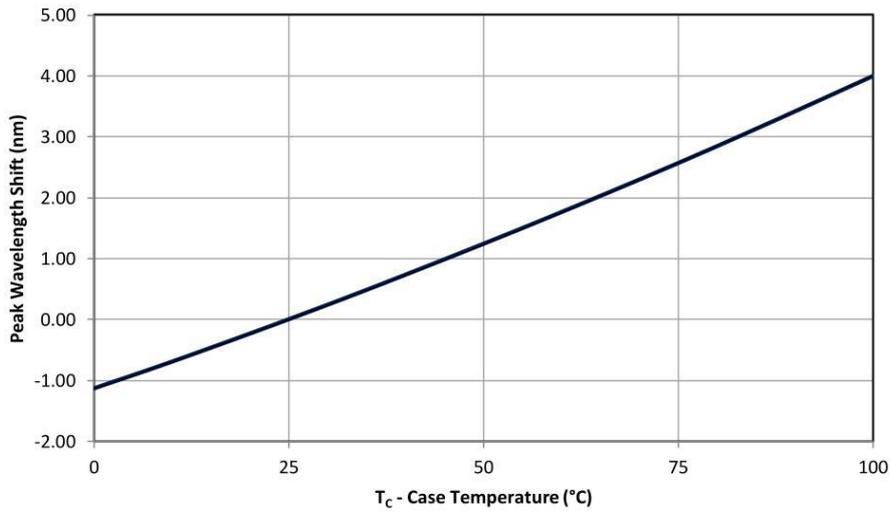


Figure 10: Typical peak wavelength shift vs. case temperature



Current De-rating

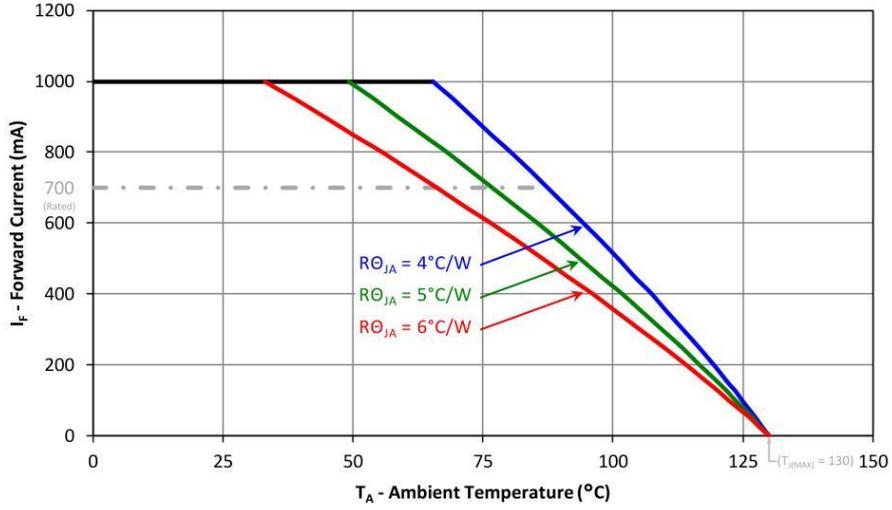


Figure 11: Maximum forward current vs. ambient temperature based on $T_{j(\text{MAX})} = 130^\circ\text{C}$

Notes for Figure 11:

1. $R_{\theta JC}$ [Junction to Case Thermal Resistance] for the LZ4-04UV00 is typically 1.1°C/W .
2. $R_{\theta JA}$ [Junction to Ambient Thermal Resistance] = $R_{\theta JC}$ + $R_{\theta CA}$ [Case to Ambient Thermal Resistance].



Emitter Tape and Reel Specifications (mm)

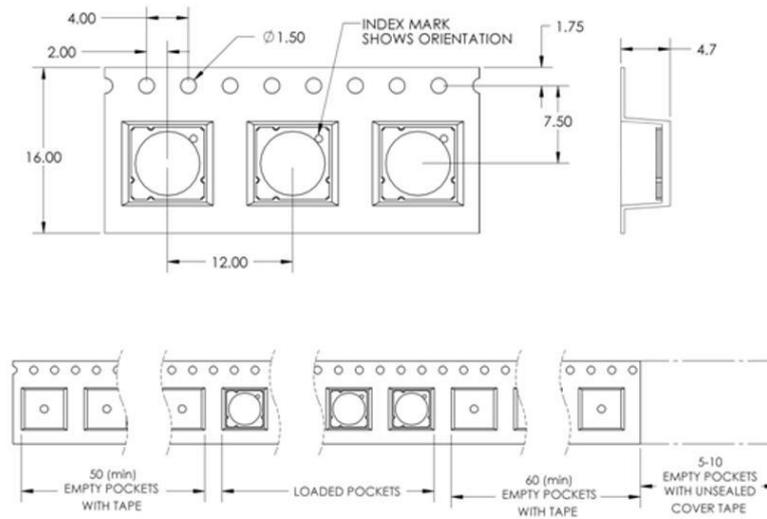


Figure 12: Emitter carrier tape specifications (mm).

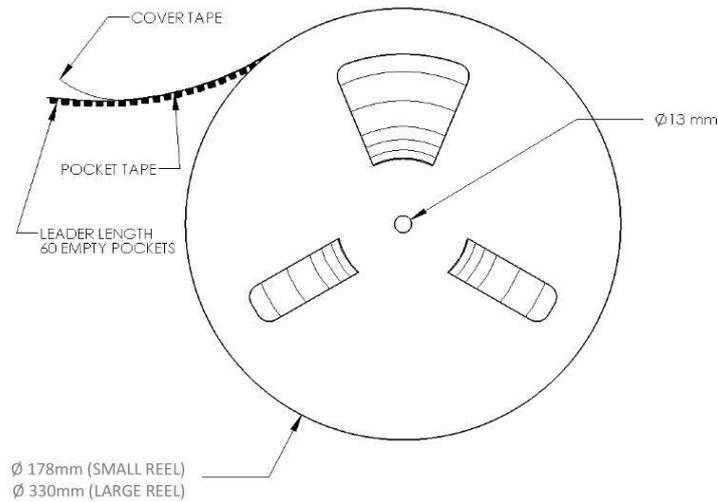


Figure 13: Emitter reel specifications (mm).

- Notes for Figure 13:
1. Small reel quantity: up to 250 emitters
 2. Large reel quantity: 250-1200 emitters.
 3. Single flux bin and single wavelength bin per reel.



LZ4 MCPCB Family

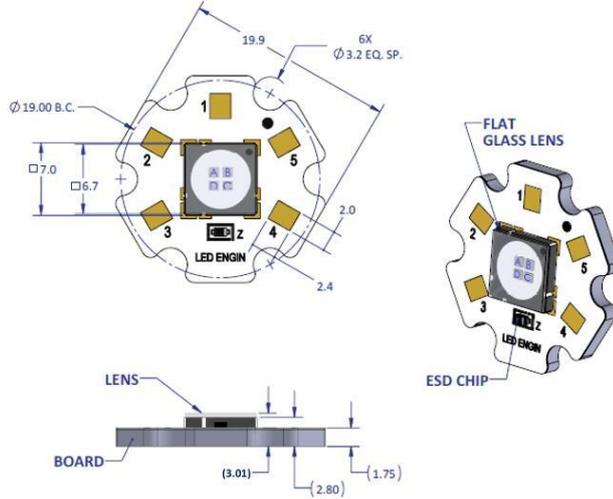
Part number	Type of MCPCB	Diameter (mm)	Emitter + MCPCB Thermal Resistance (°C/W)	Typical V _F (V)	Typical I _F (mA)
LZ4-4xxxxx	1-channel	19.9	1.1 + 1.1 = 2.2	15.2	700

- **Mechanical Mounting of MCPCB**
 - Mechanical stress on the emitter that could be caused by bending the MCPCB should be avoided. The stress can cause the substrate to crack and as a result might lead to cracks in the dies.
 - Therefore special attention needs to be paid to the flatness of the heat sink surface and the torque on the screws. Maximum torque should not exceed 1 Nm (8.9 lbf/in).
 - Care must be taken when securing the board to the heatsink to eliminate bending of the MCPCB. This can be done by tightening the three M3 screws (or #4-40) in steps and not all at once. This is analogous to tightening a wheel of an automobile
 - It is recommended to always use plastic washers in combination with three screws. Two screws could more easily lead to bending of the board.
 - If non taped holes are used with self-tapping screws it is advised to back out the screws slightly after tighten (with controlled torque) and retighten the screws again.
- **Thermal interface material**
 - To properly transfer the heat from the LED to the heatsink a thermally conductive material is required when mounting the MCPCB to the heatsink
 - There are several materials which can be used as thermal interface material, such as thermal paste, thermal pads, phase change materials and thermal epoxies. Each has pro's and con's depending on the application. For our emitter it is critical to verify that the thermal resistance is sufficient for the selected emitter and its environment.
 - To properly transfer the heat from the MCPCB to the heatsink also special attention should be paid to the flatness of the heatsink.
- **Wire soldering**
 - For easy soldering of wires to the MCPCB it is advised to preheat the MCPCB on a hot plate to a maximum of 150°. Subsequently apply the solder and additional heat from the solder iron to initiate a good solder reflow. It is recommended to use a solder iron of more than 60W. We advise to use lead free, no-clean solder. For example SN-96.5 AG-3.0 CU 0.5 #58/275 from Kester (pn: 24-7068-7601)



LZ4-4xxxxx

1 channel, Standard Star MCPCB (1x4) Dimensions (mm)



Notes:

- Unless otherwise noted, the tolerance = ± 0.2 mm.
- Slots in MCPCB are for M3 or #4-40 mounting screws.
- LED Engin recommends plastic washers to electrically insulate screws from solder pads and electrical traces.
- LED Engin recommends thermal interface material when attaching the MCPCB to a heatsink
- The thermal resistance of the MCPCB is: $R\theta_{c\theta}$ 1.1°C/W

Components used

MCPCB: HT04503 (Bergquist)
 ESD chips: BZX585-C30 (NXP, for 4 LED dies in series)

Pad layout			
Ch.	MCPCB Pad	String/die	Function
1	1, 2, 3 4, 5	1/ABCD	Cathode - Anode +



Company Information

LED Engin, Inc., based in California's Silicon Valley, specializes in ultra-bright, ultra compact solid state lighting solutions allowing lighting designers & engineers the freedom to create uncompromised yet energy efficient lighting experiences. The LuxiGen™ Platform — an emitter and lens combination or integrated module solution, delivers superior flexibility in light output, ranging from 3W to 90W, a wide spectrum of available colors, including whites, multi-color and UV, and the ability to deliver upwards of 5,000 high quality lumens to a target. The small size combined with powerful output allows for a previously unobtainable freedom of design wherever high-flux density, directional light is required. LED Engin's packaging technologies lead the industry with products that feature lowest thermal resistance, highest flux density and consummate reliability, enabling compact and efficient solid state lighting solutions.

LED Engin is committed to providing products that conserve natural resources and reduce greenhouse emissions.

LED Engin reserves the right to make changes to improve performance without notice.

Please contact sales@ledengin.com or (408) 922-7200 for more information.

II.ii Nichia Corporation NVSU233-Serie (U 365, U 385, U 405)

Die nachfolgend aufgeführten LEDs wurden in der Hauptplatine der finalen Version des LED-SR verbaut.

Bezeichnung: Nichia NVSU233A UV SMD-LED UV [148]

233 Package, Wellenlängen: 365nm, 385nm, 395nm und 405nm, Risikogruppe 3 (EN 62471), Maße (LxBxH): 3,5x3,5x1,23mm



SPECIFICATIONS

(1) Absolute Maximum Ratings

	Item	Symbol	Absolute Maximum Rating	Unit
U365	Forward Current	I_F	1400	mA
	Pulse Forward Current	I_{FP}	2000	mA
	Power Dissipation	P_D	5.88	W
	Junction Temperature	T_J	130	°C
U385	Forward Current	I_F	1400	mA
	Pulse Forward Current	I_{FP}	2000	mA
	Power Dissipation	P_D	5.88	W
	Junction Temperature	T_J	130	°C
U405	Forward Current	I_F	1400	mA
	Pulse Forward Current	I_{FP}	2000	mA
	Power Dissipation	P_D	5.6	W
	Junction Temperature	T_J	130	°C
Allowable Reverse Current		I_R	85	mA
Operating Temperature		T_{opr}	-10~85	°C
Storage Temperature		T_{stg}	-40~100	°C

* Absolute Maximum Ratings at $T_S=25^\circ\text{C}$.

* I_{FP} conditions with pulse width $\leq 10\text{ms}$ and duty cycle $\leq 10\%$.

(2) Initial Electrical/Optical Characteristics

	Item	Symbol	Condition	Typ	Max	Unit
U365	Forward Voltage	V_F	$I_F=1000\text{mA}$	3.85	-	V
	Radiant Flux	Φ_e	$I_F=1000\text{mA}$	1450	-	mW
	Peak Wavelength	λ_p	$I_F=1000\text{mA}$	365	-	nm
	Spectrum Half Width	$\Delta\lambda$	$I_F=1000\text{mA}$	9.0	-	nm
U385	Forward Voltage	V_F	$I_F=1000\text{mA}$	3.70	-	V
	Radiant Flux	Φ_e	$I_F=1000\text{mA}$	1730	-	mW
	Peak Wavelength	λ_p	$I_F=1000\text{mA}$	385	-	nm
	Spectrum Half Width	$\Delta\lambda$	$I_F=1000\text{mA}$	11	-	nm
U405	Forward Voltage	V_F	$I_F=1000\text{mA}$	3.45	-	V
	Radiant Flux	Φ_e	$I_F=1000\text{mA}$	1400	-	mW
	Peak Wavelength	λ_p	$I_F=1000\text{mA}$	405	-	nm
	Spectrum Half Width	$\Delta\lambda$	$I_F=1000\text{mA}$	12	-	nm
Thermal Resistance		$R_{\theta JS}$	-	3.9	5.7	°C/W

* Characteristics at $T_S=25^\circ\text{C}$.

* Radiant Flux value as per CIE 127:2007 standard.

* $R_{\theta JS}$ is the thermal resistance from the junction to the T_S measurement point.

* It is recommended to operate the LEDs at a current greater than 10% of the sorting current to stabilize the LED characteristics.

RANKS

Item	Rank	Min	Max	Unit
Forward Voltage	H1	4.0	4.2	V
	M	3.6	4.0	
	L	3.2	3.6	
	K	2.8	3.2	
Radiant Flux	P11d22	2060	2240	mW
	P11d21	1900	2060	
	P10d22	1740	1900	
	P10d21	1600	1740	
	P9d22	1460	1600	
	P9d21	1340	1460	
	P8d22	1230	1340	
	P8d21	1130	1230	
	P7d22	1040	1130	
Peak Wavelength	U405	400	410	nm
	U385	380	390	
	U365	360	370	

* Ranking at $T_s=25^{\circ}\text{C}$.

* Forward Voltage Tolerance: $\pm 0.05\text{V}$

* Radiant Flux Tolerance: $\pm 6\%$

* Peak Wavelength Tolerance: $\pm 3\text{nm}$

* LEDs from the above ranks will be shipped. The rank combination ratio per shipment will be decided by Nichia.

Forward Voltage Ranks by Peak Wavelength

Ranking by Peak Wavelength \ Ranking by Forward Voltage	K	L	M	H1
U365				
U385				
U405				

Radiant Flux Ranks by Peak Wavelength

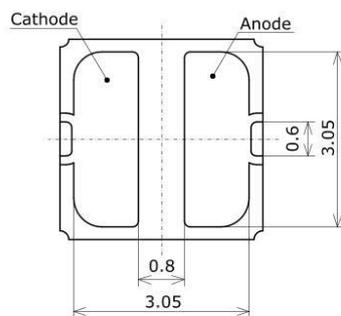
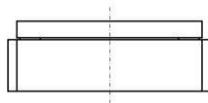
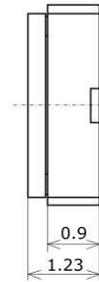
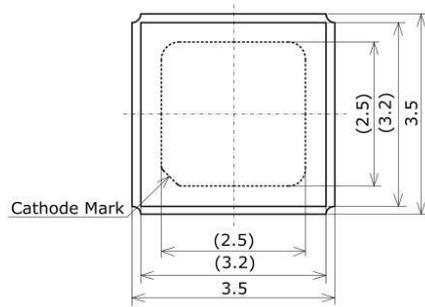
Ranking by Peak Wavelength \ Ranking by Radiant Flux	P7d22	P8d21	P8d22	P9d21	P9d22	P10d21	P10d22	P11d21	P11d22
U365									
U385									
U405									

NICHIA STS-DA1-4890A <Cat.No.171113>

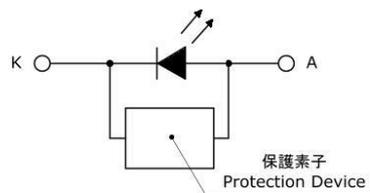
OUTLINE DIMENSIONS

- * 本製品はRoHS指令に適合しております。
This product complies with RoHS Directive.
- * 括弧で囲まれた寸法は参考値です。
The dimension(s) in parentheses are for reference purposes.

NVSU233x
管理番号 No. STS-DA7-5931D
(単位 Unit: mm, 公差 Tolerance: ±0.2)

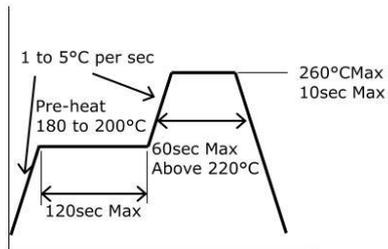


項目 Item	内容 Description
パッケージ材質 Package Materials	セラミックス Ceramics
ガラス窓材質 Glass Materials	硬質ガラス Hard Glass
接着剤材質 Adhesive Materials	シリコーン Silicone Adhesive
電極材質 Electrodes Materials	金メッキ Au-plated
質量 Weight	0.037g(TYP)

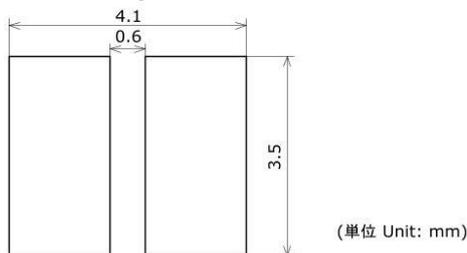


SOLDERING

- Recommended Reflow Soldering Condition(Lead-free Solder)



- Recommended Soldering Pad Pattern



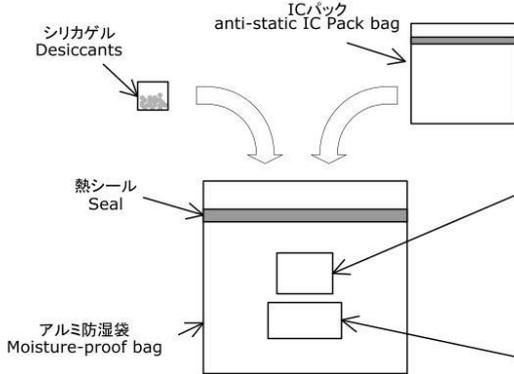
- * This LED is designed to be reflow soldered on to a PCB. If dip soldered or hand soldered, Nichia cannot guarantee its reliability.
- * Reflow soldering must not be performed more than twice.
- * When the LEDs are cooled from the peak reflow temperature, ensure that the cooling is performed very gradually to avoid excessive stress on the LED (e.g. causing cracks in the solder joints). Ensure that sufficient preliminary verification is performed to ensure that there are no issues with the chosen reflow soldering conditions/process.
- * Nitrogen reflow soldering is recommended. Air flow soldering conditions can cause optical degradation, caused by heat and/or atmosphere.
- * Repairing should not be done after the LEDs have been soldered. It should be confirmed beforehand whether the characteristics of the LEDs will or will not be damaged by repairing.
- * When soldering, do not apply stress to the LED while the LED is hot.
- * When using a pick and place machine, choose an appropriate nozzle for this product.
- * The recommended soldering pad pattern is designed for attachment of the LED without problems. When precise mounting accuracy is required, such as high-density mounting, ensure that the size and shape of the pad are suitable for the circuit design.
- * When flux is used, it should be a halogen free flux. Ensure that the manufacturing process is not designed in a manner where the flux will come in contact with the LEDs.
- * Make sure that there are no issues with the type and amount of solder that is being used.

NICHIA STS-DA1-4890A <Cat.No.171113>

PACKAGING - BULK

シリカゲルとともにICパックをアルミ防湿袋に入れ、熱シールにより封じます。
Anti-static IC packs are shipped with desiccants in heat-sealed moisture-proof bags.

Nxxxxxxx
管理番号 No. STS-DA7-11842



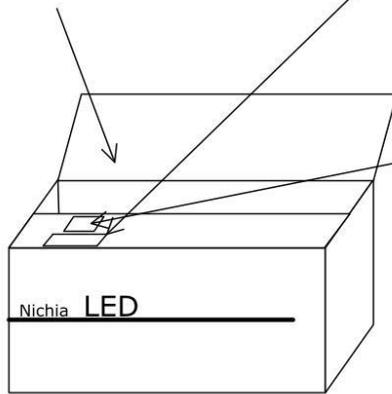
警告ラベル Warning and Explanatory Labels

UV LED

- ・「UV LEDは紫外領域の光(UV光)を発します。」
- ・「UV光は人間の目には見えませんが、光が見えていなくてもUV光により目を傷める可能性があります。」
- ・「UV光を直接目にあてないでください。必ず適切な防護を着用してください。」
- ・「UV LEDを組み込んだ製品には、適切な警告表示をしてください。」

- ・ UV LEDs emit light in the ultraviolet region (UV light).
- ・ UV light is invisible and may be harmful to the human eye.
- ・ Do not expose the eyes directly to the UV light. Wear appropriate protective gear when handling.
- ・ Use appropriate warning signs/labels on devices using the UV LEDs.

アルミ防湿袋を並べて入れ、間隔にはクッション材を詰めます。
Moisture-proof bags are packed in cardboard boxes with shock absorbing materials to fill empty spaces.

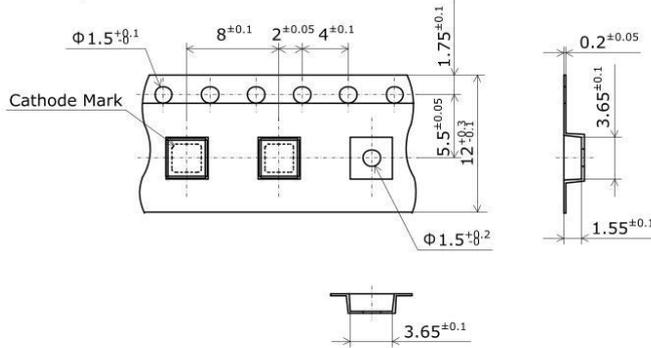


- * 客先型名を*****で示します。
客先型名が設定されていない場合は空白です。
***** is the customer part number.
If not provided, it will not be indicated on the label.
- * ロット表記方法についてはロット番号の項を参照して下さい。
For details, see "LOT NUMBERING CODE" in this document.

- * 本製品はICパックに入れたのち、輸送の衝撃から保護するためダンボールで梱包します。
Products shipped in anti-static IC packs are packed in a moisture-proof bag. They are shipped in cardboard boxes to protect them from external forces during transportation.
- * 取り扱いに際して、落下させたり、強い衝撃を与えたりしますと、製品を損傷させる原因になりますので注意して下さい。
Do not drop or expose the box to external forces as it may damage the products.
- * ダンボールには防水加工がされておりませんので、梱包箱が水に濡れないよう注意して下さい。
Do not expose to water. The box is not water-resistant.
- * 輸送、運搬に際して弊社よりの梱包状態あるいは同等の梱包を行って下さい。
Using the original package material or equivalent in transit is recommended.

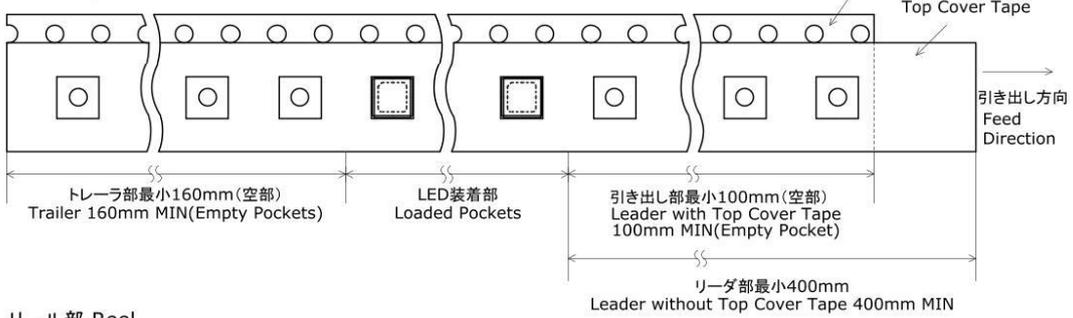
TAPE AND REEL DIMENSIONS

テーピング部 Tape

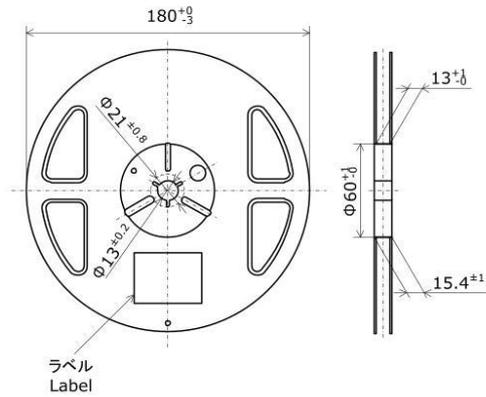


Nxxx233x
 管理番号 No. STS-DA7-12040
 (単位 Unit: mm)

トレーラ部/リーダ部 Trailer and Leader



リール部 Reel



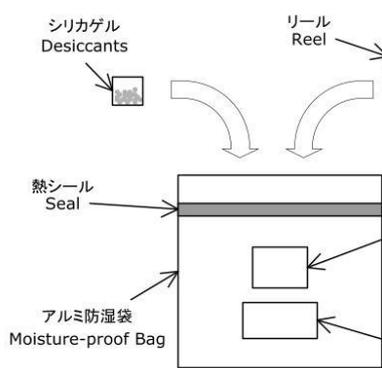
- * 数量は1リールにつき 1400個入りです。
 Reel Size: 1400pcs
- * 実装作業の中断などでエンボスキャリアテープをリールに巻き取る場合、エンボスキャリアテープを強く(10N以上)締めないで下さい。
 LEDがカバーテープに貼り付く可能性があります。
 When the tape is rewound due to work interruptions, no more than 10N should be applied to the embossed carrier tape.
 The LEDs may stick to the top cover tape.
- * JIS C 0806電子部品テーピングに準拠しています。
 The tape packing method complies with JIS C 0806 (Packaging of Electronic Components on Continuous Tapes).

NICHIA STS-DA1-4890A <Cat.No.171113>

PACKAGING - TAPE & REEL

シリカゲルとともにリールをアルミ防湿袋に入れ、熱シールにより封をします。
Reels are shipped with desiccants in heat-sealed moisture-proof bags.

Nxxxxxxx
管理番号 No. STS-DA7-11776



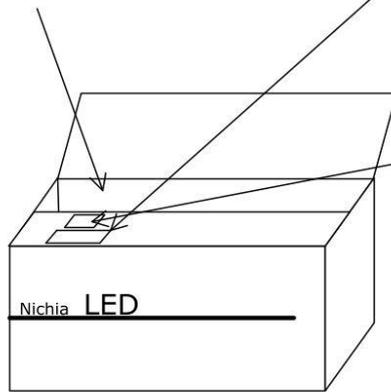
警告ラベル Warning and Explanatory Labels

UV LED

- ・「UV LEDは紫外領域の光(UV光)を発します。」
- ・「UV光は人間の目には見えませんが、光が見えていなくてもUV光により目を傷める可能性があります。」
- ・「UV光を直接目にあててはいけません。必ず適切な防護を常用してください。」
- ・「UV LEDを組み込んだ製品には、適切な警告表示をしてください。」

- ・ UV LEDs emit light in the ultraviolet region (UV light).
- ・ UV light is invisible and may be harmful to the human eye.
- ・ Do not expose the eyes directly to the UV light. Wear appropriate protective gear when handling.
- ・ Use appropriate warning signs/labels on devices using the UV LEDs.

アルミ防湿袋を並べて入れ、ダンボールで仕切ります。
Moisture-proof bags are packed in cardboard boxes with corrugated partitions.



- * 客先型名を*****で示します。客先型名が設定されていない場合は空白です。***** is the customer part number. If not provided, it will not be indicated on the label.
- * ロット表記方法についてはロット番号の項を参照して下さい。For details, see "LOT NUMBERING CODE" in this document.

- * 本製品はテーピングしたのち、輸送の衝撃から保護するためダンボールで梱包します。
Products shipped on tape and reel are packed in a moisture-proof bag. They are shipped in cardboard boxes to protect them from external forces during transportation.
- * 取り扱いに際して、落下させたり、強い衝撃を与えたりすると、製品を損傷させる原因になりますので注意して下さい。
Do not drop or expose the box to external forces as it may damage the products.
- * ダンボールには防水加工がされておりませんので、梱包箱が水に濡れないよう注意して下さい。
Do not expose to water. The box is not water-resistant.
- * 輸送、運搬に際して弊社よりの梱包状態あるいは同等の梱包を行って下さい。
Using the original package material or equivalent in transit is recommended.

LOT NUMBERING CODE

Lot Number is presented by using the following alphanumeric code.

YMxxxx - RRR

Y - Year

Year	Y
2016	G
2017	H
2018	I
2019	J
2020	K
2021	L

M - Month

Month	M	Month	M
1	1	7	7
2	2	8	8
3	3	9	9
4	4	10	A
5	5	11	B
6	6	12	C

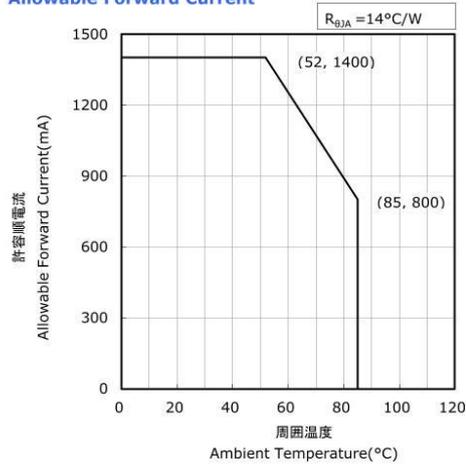
xxxx-Nichia's Product Number

RRR-Ranking by Wavelength, Ranking by Radiant Flux, Ranking by Forward Voltage

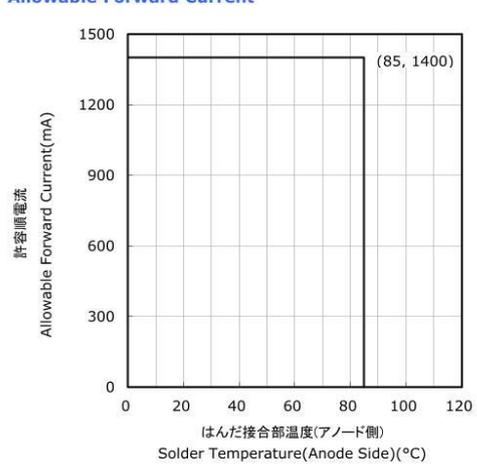
DERATING CHARACTERISTICS

NVSU233x
管理番号 No. STS-DA7-5932B

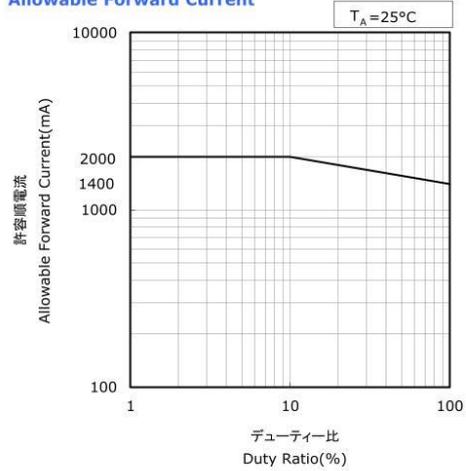
周囲温度-許容順電流特性
Ambient Temperature vs
Allowable Forward Current



はんだ接合部温度(アノード側)-許容順電流特性
Solder Temperature(Anode Side) vs
Allowable Forward Current



デューティ比-許容順電流特性
Duty Ratio vs
Allowable Forward Current



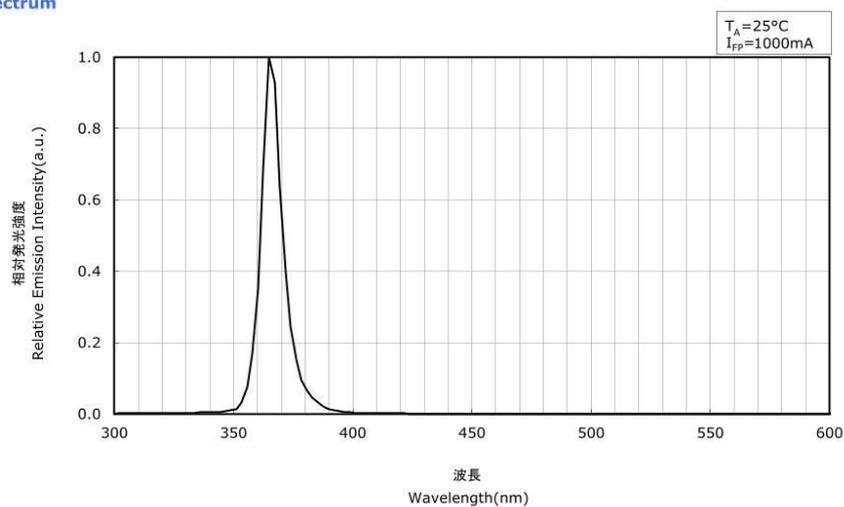
NICHIA STS-DA1-4890A <Cat.No.171113>

OPTICAL CHARACTERISTICS

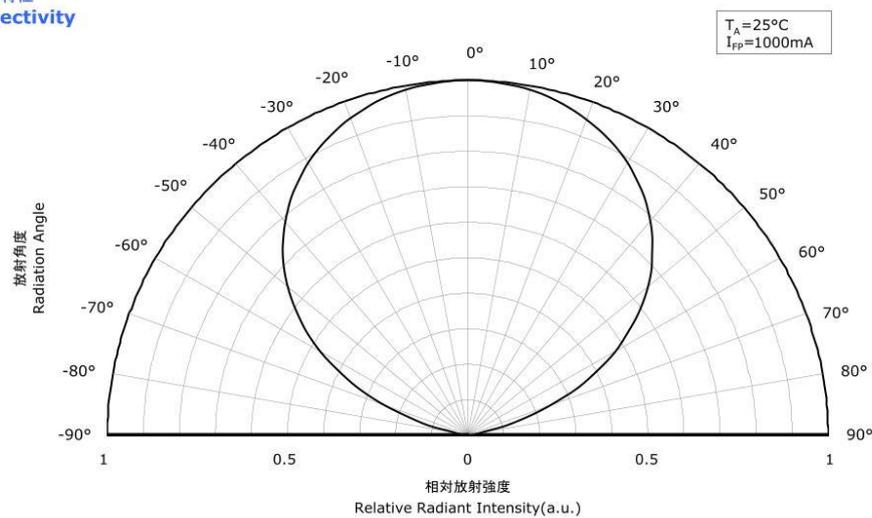
* 本特性は参考です。
All characteristics shown are for reference only and are not guaranteed.

NVSU233B
管理番号 No. STS-DA7-12046

発光スペクトル
Spectrum



指向特性
Directivity



* 本特性はピーク波長ランクU365に対応しています。
The graphs above show the characteristics for U365 LEDs of this product.

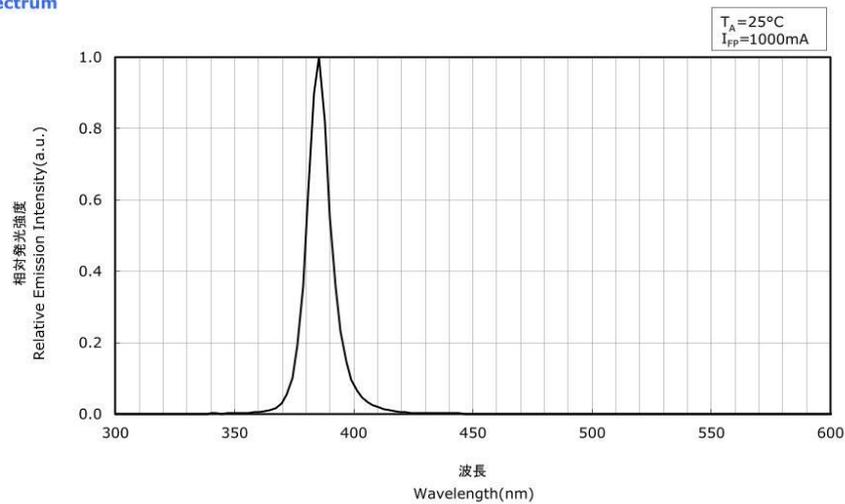
NICHIA STS-DA1-4890A <Cat.No.171113>

OPTICAL CHARACTERISTICS

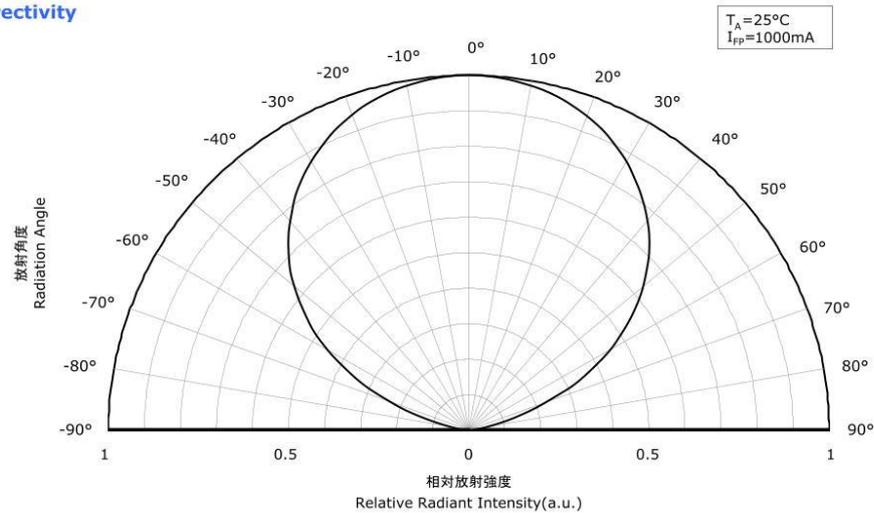
* 本特性は参考です。
All characteristics shown are for reference only and are not guaranteed.

NVSU233B
管理番号 No. STS-DA7-12690

発光スペクトル
Spectrum



指向特性
Directivity



* 本特性はピーク波長ランクU385に対応しています。
The graphs above show the characteristics for U385 LEDs of this product.

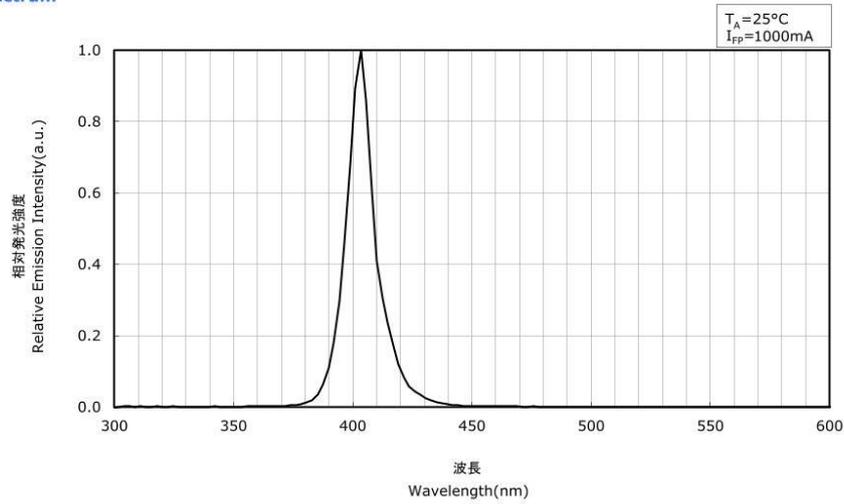
NICHIA STS-DA1-4890A <Cat.No.171113>

OPTICAL CHARACTERISTICS

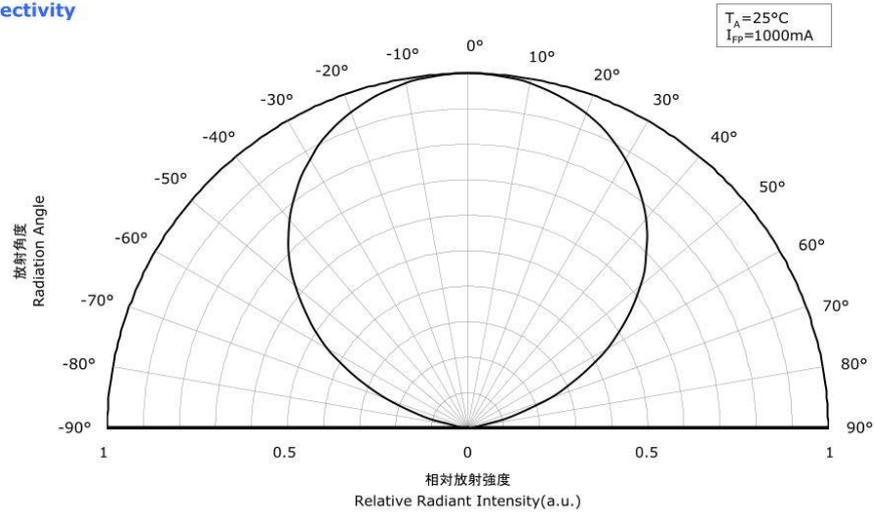
* 本特性は参考です。
All characteristics shown are for reference only and are not guaranteed.

NVSU233B
管理番号 No. STS-DA7-12047

発光スペクトル
Spectrum



指向特性
Directivity



* 本特性はピーク波長ランクU405に対応しています。
The graphs above show the characteristics for U405 LEDs of this product.

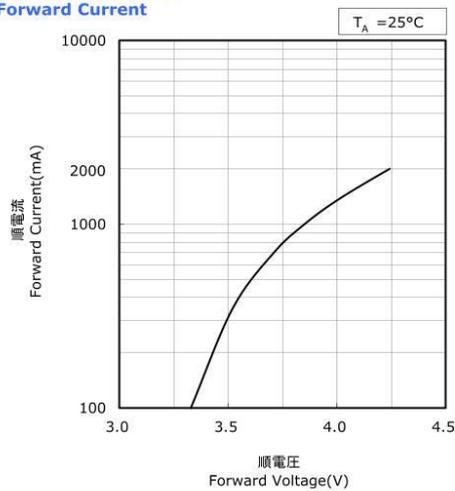
NICHIA STS-DA1-4890A <Cat.No.171113>

FORWARD CURRENT CHARACTERISTICS / TEMPERATURE CHARACTERISTICS

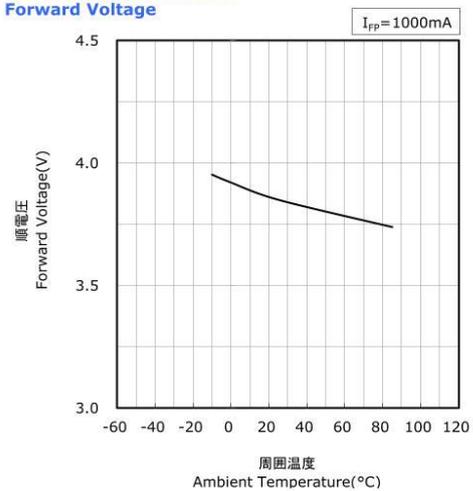
* 本特性は参考です。
All characteristics shown are for reference only and are not guaranteed.

NVSU233B
管理番号 No. STS-DA7-12048

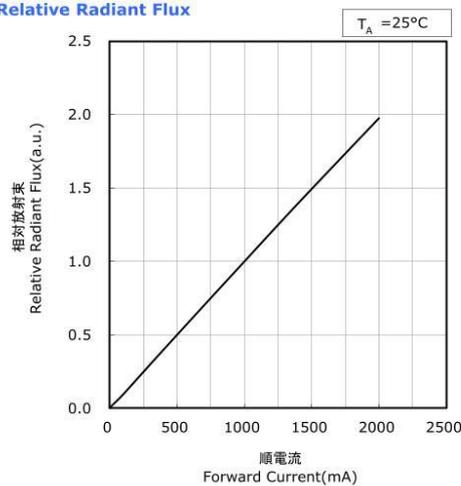
順電圧-順電流特性
Forward Voltage vs
Forward Current



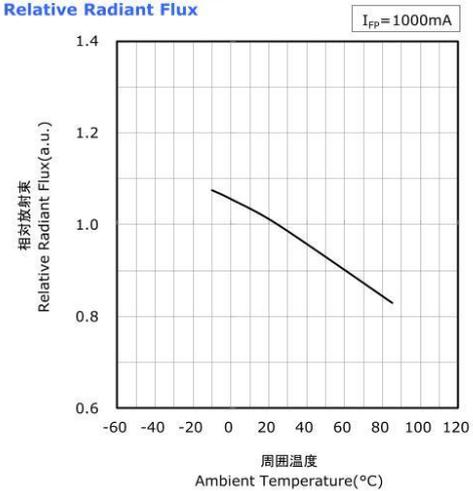
周囲温度-順電圧特性
Ambient Temperature vs
Forward Voltage



順電流-相対放射束特性
Forward Current vs
Relative Radiant Flux



周囲温度-相対放射束特性
Ambient Temperature vs
Relative Radiant Flux



* 本特性はピーク波長ランクU365に対応しています。
The graphs above show the characteristics for U365 LEDs of this product.

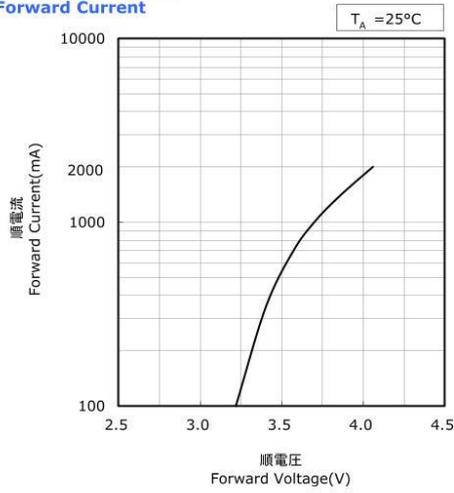
NICHIA STS-DA1-4890A <Cat.No.171113>

FORWARD CURRENT CHARACTERISTICS / TEMPERATURE CHARACTERISTICS

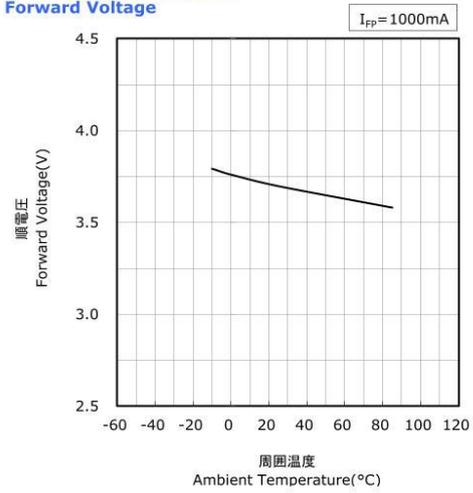
* 本特性は参考です。
All characteristics shown are for reference only and are not guaranteed.

NVSU233B
管理番号 No. STS-DA7-12691

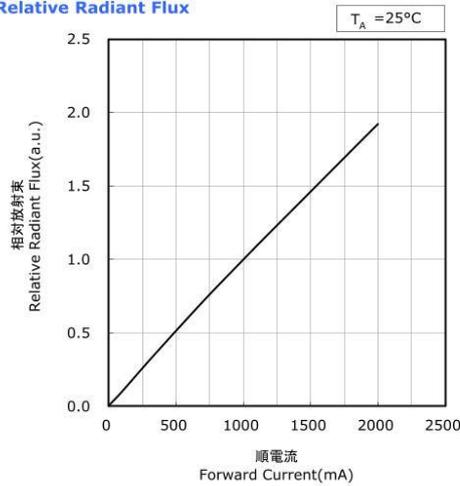
順電圧-順電流特性
Forward Voltage vs
Forward Current



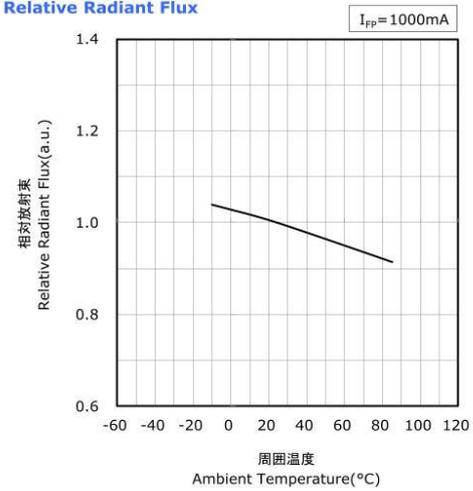
周囲温度-順電圧特性
Ambient Temperature vs
Forward Voltage



順電流-相対放射束特性
Forward Current vs
Relative Radiant Flux



周囲温度-相対放射束特性
Ambient Temperature vs
Relative Radiant Flux



* 本特性はピーク波長ランクU385に対応しています。
The graphs above show the characteristics for U385 LEDs of this product.

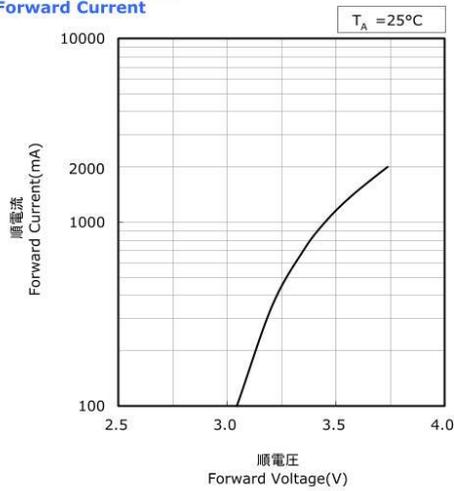
NICHIA STS-DA1-4890A <Cat.No.171113>

FORWARD CURRENT CHARACTERISTICS / TEMPERATURE CHARACTERISTICS

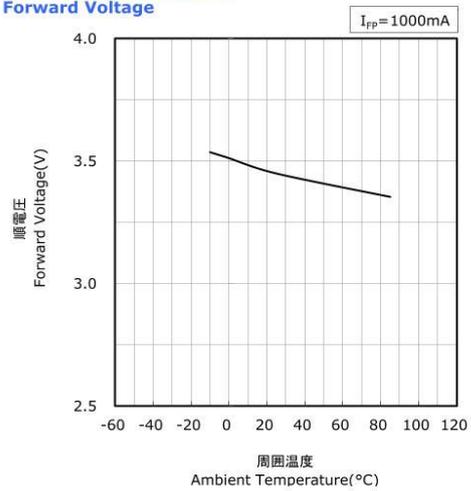
* 本特性は参考です。
All characteristics shown are for reference only and are not guaranteed.

NVSU233B
管理番号 No. STS-DA7-12049

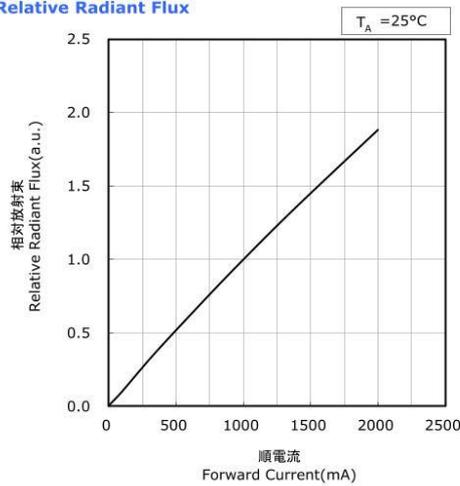
順電圧-順電流特性
Forward Voltage vs
Forward Current



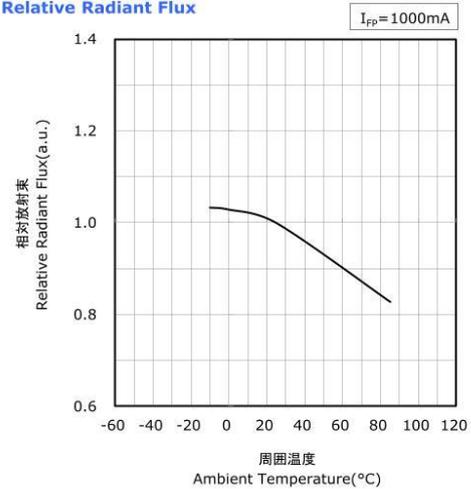
周囲温度-順電圧特性
Ambient Temperature vs
Forward Voltage



順電流-相対放射束特性
Forward Current vs
Relative Radiant Flux



周囲温度-相対放射束特性
Ambient Temperature vs
Relative Radiant Flux



* 本特性はピーク波長ランクU405に対応しています。
The graphs above show the characteristics for U405 LEDs of this product.

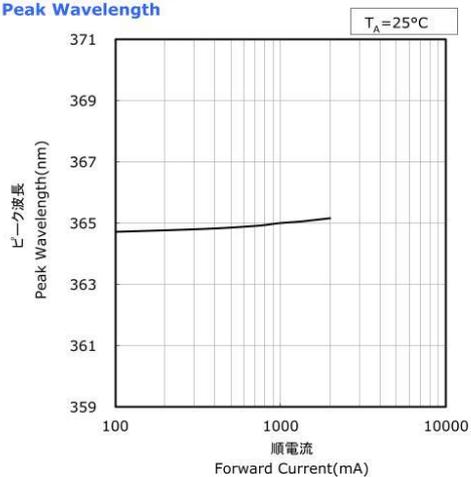
NICHIA STS-DA1-4890A <Cat.No.171113>

FORWARD CURRENT CHARACTERISTICS / TEMPERATURE CHARACTERISTICS

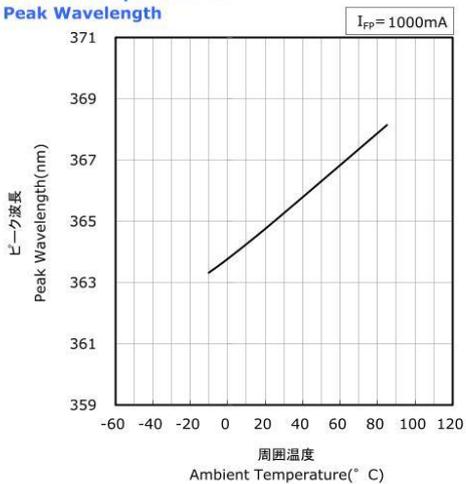
* 本特性は参考です。
All characteristics shown are for reference only and are not guaranteed.

NVSU233B
管理番号 No. STS-DA7-12050

順電流-ピーク波長特性
Forward Current vs
Peak Wavelength



周囲温度-ピーク波長特性
Ambient Temperature vs
Peak Wavelength



* 本特性はピーク波長ランクU365に対応しています。
The graphs above show the characteristics for U365 LEDs of this product.

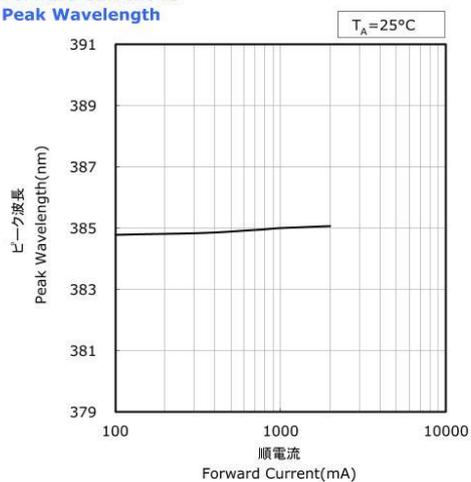
NICHIA STS-DA1-4890A <Cat.No.171113>

FORWARD CURRENT CHARACTERISTICS / TEMPERATURE CHARACTERISTICS

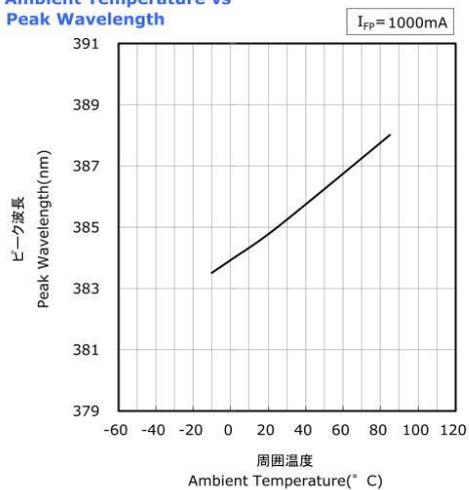
* 本特性は参考です。
All characteristics shown are for reference only and are not guaranteed.

NVSU233B
管理番号 No. STS-DA7-12692

順電流-ピーク波長特性
Forward Current vs
Peak Wavelength



周囲温度-ピーク波長特性
Ambient Temperature vs
Peak Wavelength



* 本特性はピーク波長ランクU385に対応しています。
The graphs above show the characteristics for U385 LEDs of this product.

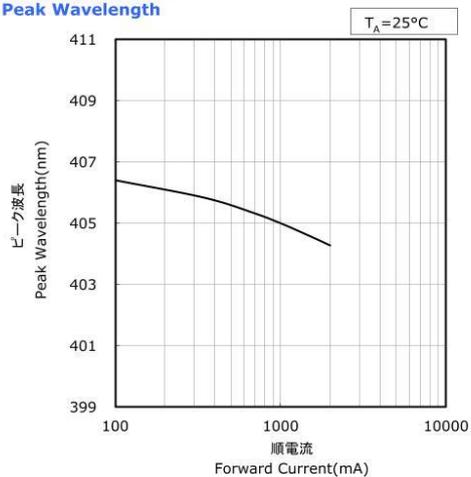
NICHIA STS-DA1-4890A <Cat.No.171113>

FORWARD CURRENT CHARACTERISTICS / TEMPERATURE CHARACTERISTICS

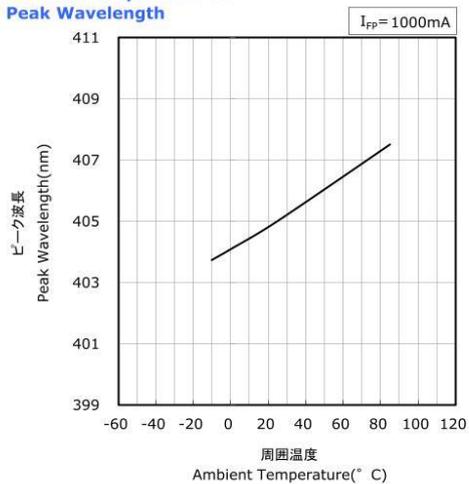
* 本特性は参考です。
All characteristics shown are for reference only and are not guaranteed.

NVSU233B
管理番号 No. STS-DA7-12051

順電流-ピーク波長特性
Forward Current vs
Peak Wavelength



周囲温度-ピーク波長特性
Ambient Temperature vs
Peak Wavelength



* 本特性はピーク波長ランクU405に対応しています。
The graphs above show the characteristics for U405 LEDs of this product.

RELIABILITY

(1) Tests and Results

Test	Reference Standard	Test Conditions	Test Duration	Failure Criteria #	Units Failed/Tested
Resistance to Soldering Heat (Reflow Soldering)	JEITA ED-4701 300 301	$T_{\text{slid}}=260^{\circ}\text{C}$, 10sec, 2reflows, Precondition: 30°C , 70%RH, 168hr		#1	0/10
Thermal Shock		-40°C to 100°C , 15min dwell	100cycles	#1	0/10
High Temperature Storage	JEITA ED-4701 200 201	$T_A=100^{\circ}\text{C}$	1000hours	#1	0/10
Low Temperature Storage	JEITA ED-4701 200 202	$T_A=-40^{\circ}\text{C}$	1000hours	#1	0/10
Room Temperature Operating Life		$T_A=25^{\circ}\text{C}$, $I_F=1400\text{mA}$	1000hours	#1	0/10
High Temperature Operating Life		$T_A=85^{\circ}\text{C}$, $I_F=800\text{mA}$	1000hours	#1	0/10
Temperature Humidity Operating Life		60°C , RH=90%, $I_F=1000\text{mA}$	500hours	#1	0/10
Low Temperature Operating Life		$T_A=-10^{\circ}\text{C}$, $I_F=1000\text{mA}$	1000hours	#1	0/10
Vibration	JEITA ED-4701 400 403	200m/s^2 , 100~2000~100Hz, 4cycles, 4min, each X, Y, Z	48minutes	#1	0/10
Electrostatic Discharges	JEITA ED-4701 300 304	HBM, 2kV, 1.5k Ω , 100pF, 3pulses, alternately positive or negative		#1	0/10

NOTES:

1) $R_{\theta\text{JA}} \approx 14.0^{\circ}\text{C/W}$

2) Measurements are performed after allowing the LEDs to return to room temperature.

(2) Failure Criteria

Criteria #	Items	Conditions	Failure Criteria
#1	Forward Voltage(V_F)	$I_F=1000\text{mA}$	>Initial value $\times 1.1$
	Radiant Flux(Φ_E)	$I_F=1000\text{mA}$	<Initial value $\times 0.7$

CAUTIONS

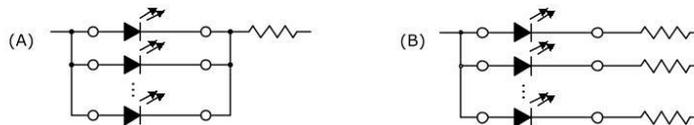
(1) Storage

	Conditions	Temperature	Humidity	Time
Storage	Before Opening Aluminum Bag	≤30°C	≤90%RH	Within 1 Year from Delivery Date
	After Opening Aluminum Bag	≤30°C	≤70%RH	≤168hours
Baking		65±5°C	-	≥24hours

- Product complies with JEDEC MSL 3 or equivalent. See IPC/JEDEC STD-020 for moisture-sensitivity details.
- Absorbed moisture in LED packages can vaporize and expand during soldering, which can cause interface delamination and result in optical performance degradation. Products are packed in moisture-proof aluminum bags to minimize moisture absorption during transportation and storage. Included silica gel desiccants change from blue to red if moisture had penetrated bags.
- After opening the moisture-proof aluminum bag, the products should go through the soldering process within the range of the conditions stated above. Unused remaining LEDs should be stored with silica gel desiccants in a hermetically sealed container, preferably the original moisture-proof bags for storage.
- After the "Period After Opening" storage time has been exceeded or silica gel desiccants are no longer blue, the products should be baked. Baking should only be done once.
- Although the leads or electrode pads (anode and cathode) of the product are plated with gold, prolonged exposure to a corrosive environment might cause the gold plated the leads or electrode pads to tarnish, and thus leading to difficulties in soldering. If unused LEDs remain, they must be stored in a hermetically sealed container. Nichia recommends using the original moisture-proof bag for storage.
- Do not use sulfur-containing materials in commercial products. Some materials, such as seals and adhesives, may contain sulfur. The contaminated plating of LEDs might cause an open circuit. Silicone rubber is recommended as a material for seals. Bear in mind, the use of silicones may lead to silicone contamination of electrical contacts inside the products, caused by low molecular weight volatile siloxane.
- To prevent water condensation, please avoid large temperature and humidity fluctuations for the storage conditions.
- Do not store the LEDs in a dusty environment.
- Do not expose the LEDs to direct sunlight and/or an environment where the temperature is higher than normal room temperature.

(2) Directions for Use

- When designing a circuit, the current through each LED must not exceed the Absolute Maximum Rating. Operating at a constant current per LED is recommended. In case of operating at a constant voltage, Circuit B is recommended. If the LEDs are operated with constant voltage using Circuit A, the current through the LEDs may vary due to the variation in Forward Voltage characteristics of the LEDs.



- This product should be operated using forward current. Ensure that the product is not subjected to either forward or reverse voltage while it is not in use. In particular, subjecting it to continuous reverse voltage may cause migration, which may cause damage to the LED die. When used in displays that are not used for a long time, the main power supply should be switched off for safety.
- It is recommended to operate the LEDs at a current greater than 10% of the sorting current to stabilize the LED characteristics.
- Ensure that excessive voltages such as lightning surges are not applied to the LEDs.
- For outdoor use, necessary measures should be taken to prevent water, moisture and salt air damage.
- This product also emits visible light. If the LEDs are used as a light source in applications such as sensors, etc. take into consideration the emission that is in the visible light spectrum.
- If this product is stored and/or used constantly under high humidity conditions, it may accelerate the deterioration of the die; this may cause the radiant flux to decrease. If the LEDs are stored and/or used under these conditions, sufficient verification must be done prior to use to ensure there are no issues for the chosen application.
- Do not design this LED into applications where condensation may occur. If the LEDs are stored/operated in these environments, it may cause issues (e.g. current leaks that cause the radiant flux to decrease).

(3) Handling Precautions

- Do not handle the LEDs with bare hands as it will contaminate the LED surface and may affect the optical characteristics: it might cause the LED to be deformed and/or the wire to break, which will cause the LED not to illuminate.
- When handling the product with tweezers, be careful not to apply excessive force to the glass. Otherwise, The glass can be cut, chipped, delaminate or deformed, causing wire-bond breaks and catastrophic failures.
- Dropping the product may cause damage.
- Do not stack assembled PCBs together. Failure to comply can cause the glass portion of the product to be cut, chipped, delaminated and/or deformed. It may cause wire to break, leading to catastrophic failures.

(4) Design Consideration

- Although Nichia recommends using a copper PCB for this product, customer is advised to verify the PCB with the products before use. Stress during soldering can cause the glass lens to break and/or the solder joints to crack.
- PCB warpage after mounting the products onto a PCB can cause the package to break. The LED should be placed in a way to minimize the stress on the LEDs due to PCB bow and twist.
- The position and orientation of the LEDs affect how much mechanical stress is exerted on the LEDs placed near the score lines. The LED should be placed in a way to minimize the stress on the LEDs due to board flexing.
- Board separation must be performed using special jigs, not using hands.
- If an aluminum PCB is used, customer is advised to verify the PCB with the products before use. Thermal stress during use can cause the solder joints to crack.

(5) Electrostatic Discharge (ESD)

- The products are sensitive to static electricity or surge voltage. ESD can damage a die and its reliability. When handling the products, the following measures against electrostatic discharge are strongly recommended:
 - Eliminating the charge
 - Grounded wrist strap, ESD footwear, clothes, and floors
 - Grounded workstation equipment and tools
 - ESD table/shelf mat made of conductive materials
- Ensure that tools, jigs and machines that are being used are properly grounded and that proper grounding techniques are used in work areas. For devices/equipment that mount the LEDs, protection against surge voltages should also be used.
- If tools or equipment contain insulating materials such as glass or plastic, the following measures against electrostatic discharge are strongly recommended:
 - Dissipating static charge with conductive materials
 - Preventing charge generation with moisture
 - Neutralizing the charge with ionizers
- The customer is advised to check if the LEDs are damaged by ESD when performing the characteristics inspection of the LEDs in the application. Damage can be detected with a forward voltage measurement at low current ($\leq 1\text{mA}$).
- ESD damaged LEDs may have current flow at a low voltage.
 - Failure Criteria: $V_F < 2.0\text{V}$ at $I_F = 0.5\text{mA}$

(6) Thermal Management

- Proper thermal management is an important when designing products with LEDs. LED die temperature is affected by PCB thermal resistance and LED spacing on the board. Please design products in a way that the LED die temperature does not exceed the maximum Junction Temperature (T_j).
- Drive current should be determined for the surrounding ambient temperature (T_A) to dissipate the heat from the product.
- The following equations can be used to calculate the junction temperature of the products.

$$1) T_j = T_A + R_{\theta JA} \cdot W \quad 2) T_j = T_s + R_{\theta JS} \cdot W$$

* T_j =LED junction temperature: °C

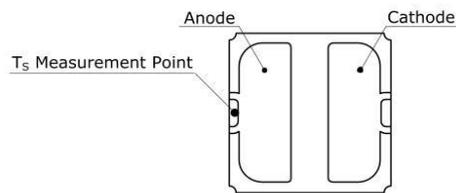
T_A =Ambient temperature: °C

T_s =Soldering temperature (anode side): °C

$R_{\theta JA}$ =Thermal resistance from junction to ambient: °C/W

$R_{\theta JS}$ =Thermal resistance from junction to T_s measurement point: °C/W

W =Input power($I_f \times V_f$): W



(7) Cleaning

- The LEDs should not be cleaned. Other cleaning agents except for Freon solvent should be tested prior to use whether they will not affect the package and the glass. Please note that Freon solvent is prohibited worldwide.
- Ultrasonic cleaning is not recommended since it may have adverse effects on the LEDs depending on the ultrasonic power and how LED is assembled. If ultrasonic cleaning must be used, the customer is advised to make sure the LEDs will not be damaged prior to cleaning.

(8) Eye Safety

- In 2006, the International Electrical Commission (IEC) published IEC 62471:2006 Photobiological safety of lamps and lamp systems, which added LEDs in its scope. On the other hand, the IEC 60825-1:2007 laser safety standard removed LEDs from its scope. However, please be advised that some countries and regions have adopted standards based on the IEC laser safety standard IEC 60825-1:20112001, which still includes LEDs in its scope. Most of Nichia's LEDs can be classified as belonging into either the Exempt Group or Risk Group 1. High-power LEDs, that emit light containing blue wavelengths, may be classified as Risk Group 2. Please proceed with caution when viewing directly any LEDs driven at high current, or viewing LEDs with optical instruments which may greatly increase the damages to your eyes.
- Viewing a flashing light may cause eye discomfort. When incorporating the LED into your product, please be careful to avoid adverse effects on the human body caused by light stimulation.
- The products are UV light LEDs, and radiate intense UV light during operation. Since UV light can be harmful to eyes, do NOT look directly into the UV light, even through an optical instrument. In case of the light reflection, UV protective glasses are required to use in order to avoid damage by the light.
- Ensure that appropriate warning signs/labels are provided both on each of the systems/applications using the UV LEDs, in all necessary documents (e.g. specification, manual, catalogs, etc.), and on the packaging materials.

(9) Miscellaneous

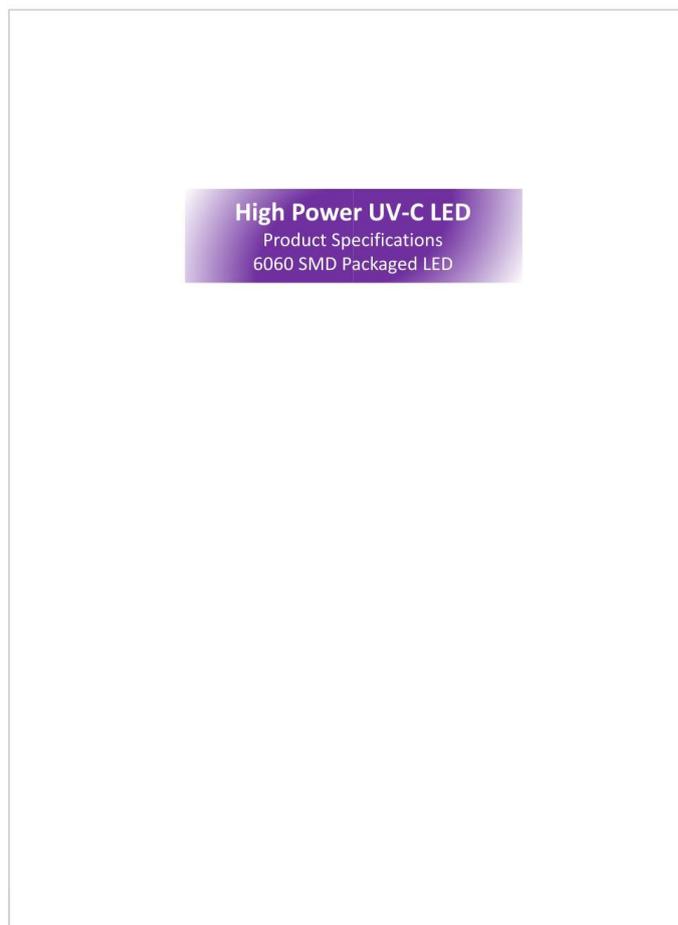
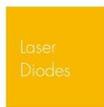
- Nichia warrants that the discrete LEDs will meet the requirements/criteria as detailed in the Reliability section within this specification. If the LEDs are used under conditions/environments deviating from or inconsistent with those described in this specification, the resulting damage and/or injuries will not be covered by this warranty.
- Nichia warrants that the discrete LEDs manufactured and/or supplied by Nichia will meet the requirements/criteria as detailed in the Reliability section within this specification; it is the customer's responsibility to perform sufficient verification prior to use to ensure that the lifetime and other quality characteristics required for the intended use are met.
- The applicable warranty period is one year from the date that the LED is delivered. In the case of any incident that appears to be in breach of this warranty, the local Nichia sales representative should be notified to discuss instructions on how to proceed while ensuring that the LED in question is not disassembled or removed from the PCB if it has been attached to the PCB. If a breach of this warranty is proved, Nichia will provide the replacement for the non-conforming LED or an equivalent item at Nichia's discretion. FOREGOING ARE THE EXCLUSIVE REMEDIES AVAILABLE TO THE CUSTOMER IN RESPECT OF THE BREACH OF THE WARRANTY CONTAINED HEREIN, AND IN NO EVENT SHALL NICHIA BE RESPONSIBLE FOR ANY INDIRECT, INCIDENTAL OR CONSEQUENTIAL LOSSES AND/OR EXPENSES (INCLUDING LOSS OF PROFIT) THAT MAY BE SUFFERED BY THE CUSTOMER ARISING OUT OF A BREACH OF THE WARRANTY.
- NICHIA DISCLAIMS ALL OTHER WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE.
- This LED is intended to be used for general lighting, household appliances, electronic devices (e.g. mobile communication devices); it is not designed or manufactured for use in applications that require safety critical functions (e.g. aircraft, automobiles, combustion equipment, life support systems, nuclear reactor control system, safety devices, spacecraft, submarine repeaters, traffic control equipment, trains, vessels, etc.). If the LEDs are planned to be used for these applications, unless otherwise detailed in the specification, Nichia will neither guarantee that the LED is fit for that purpose nor be responsible for any resulting property damage, injuries and/or loss of life/health. This LED does not comply with ISO/TS 16949 and is not intended for automotive applications.
- The customer will not reverse engineer, disassemble or otherwise attempt to extract knowledge/design information from the LED.
- All copyrights and other intellectual property rights in this specification in any form are reserved by Nichia or the right holders who have granted Nichia permission to use the content. Without prior written permission from Nichia, no part of this specification may be reproduced in any form or by any means.
- Both the customer and Nichia will agree on the official specifications for the supplied LEDs before any programs are officially launched. Without this agreement in writing (i.e. Customer Specific Specification), changes to the content of this specification may occur without notice (e.g. changes to the foregoing specifications and appearance, discontinuation of the LEDs, etc.).

II.iii LEDs für andere Spektralbereiche

Die nachfolgend aufgeführten LEDs wurden testweise für die Prüfung und Konstruktion von LED-Platinen für weitere Spektralbereiche verwendet.

Platine für den tiefen UV-Spektralbereich:

- Insgesamt wurden 13 LEDs verbaut (9 mal 270 nm, 4 mal 305 nm). Lötstelle als Schalter um beide LED-Typen gemeinsam oder getrennt zu betreiben.
- Bezeichnung: Smd6060-uv-c-led-high-power [149], Wellenlänge: 270 nm
- Bezeichnung: leuva77n50ku00_305nm_300mW [150], Wellenlänge: 305 nm



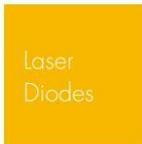
Germany & Other Countries
Laser Components GmbH
Tel: +49 8142 2864-0
Fax: +49 8142 2864-11
info@lasercomponents.com
www.lasercomponents.com

France
Laser Components S.A.S.
Tel: +33 1 39 59 52 25
Fax: +33 1 39 59 53 50
info@lasercomponents.fr
www.lasercomponents.fr

United Kingdom
Laser Components (UK) Ltd.
Tel: +44 1245 491 499
Fax: +44 1245 491 801
info@lasercomponents.co.uk
www.lasercomponents.co.uk

Nordic Countries
Laser Components Nordic AB
Tel: +46 31 703 71 73
Fax: +46 31 703 71 01
info@lasercomponents.se
www.lasercomponents.se

USA
Laser Components USA, Inc.
Tel: +1 603 821-7040
Fax: +1 603 821-7041
info@lasercomponents.com
www.lasercomponents.com



6060 SMD Packaged LED Identification Convention

SMD6060 type package



S6060--Wavelength--Power--Voltage



Emission Peak
+/- 5 nm



mW @ 350mA
+/- 10%



Voltage @ 350mA
+/- 0.5 V

Example:

S6060-W265-P130-V6.0

Interpretation:

Surface Mount type 6.0 x 6.0 mm packaged LED
Peak wavelength = 265 +/- 5nm
Power output @ 350mA = 130 mW (+/-10%)
Forward voltage @ 350mA = 6.0V (+/- 0.5V)

Product specifications subject to change without notice

10/19 / V05 / OSIF / ballb/smd6060-wavelength-power

2

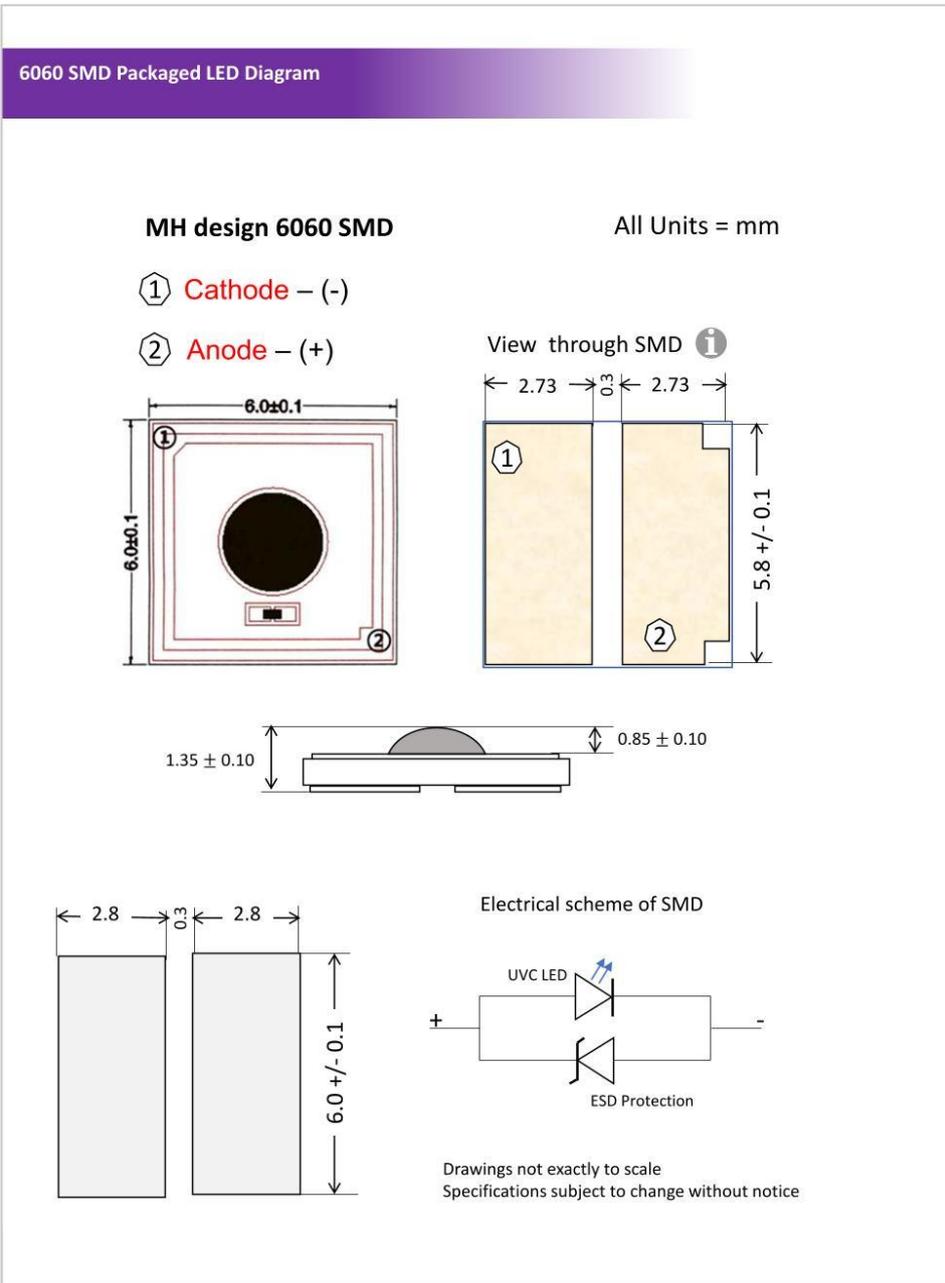
Germany & Other Countries
Laser Components GmbH
Tel: +49 8142 2864 - 0
Fax: +49 8142 2864 - 11
info@lasercomponents.com
www.lasercomponents.com

France
Laser Components S.A.S.
Tel: +33 1 39 59 52 25
Fax: +33 1 39 59 53 50
info@lasercomponents.fr
www.lasercomponents.fr

United Kingdom
Laser Components (UK) Ltd.
Tel: +44 1245 491 499
Fax: +44 1245 491 801
info@lasercomponents.co.uk
www.lasercomponents.co.uk

Nordic Countries
Laser Components Nordic AB
Tel: +46 31 703 71 73
Fax: +46 31 703 71 01
info@lasercomponents.se
www.lasercomponents.se

USA
Laser Components USA, Inc.
Tel: +1 603 821 - 7040
Fax: +1 603 821 - 7041
info@lasercomponents.com
www.lasercomponents.com



10/19 / V05 / OSIF / ballb/smd6060-uvc-led-high-power

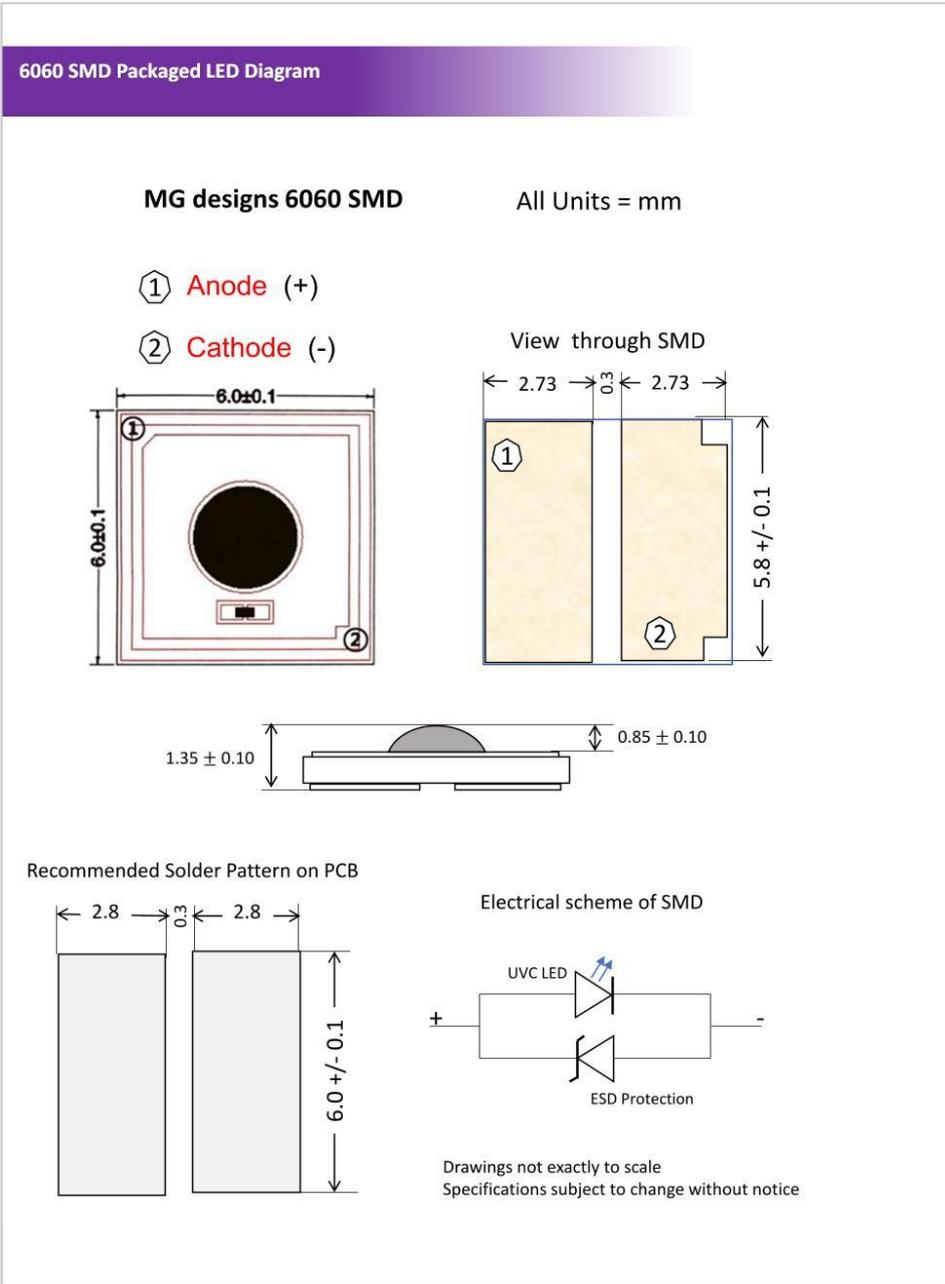
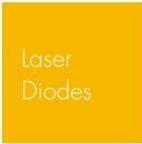
Germany & Other Countries
 Laser Components GmbH
 Tel: +49 8142 2864 - 0
 Fax: +49 8142 2864 - 11
 info@lasercomponents.com
 www.lasercomponents.com

France
 Laser Components S.A.S.
 Tel: +33 1 39 59 52 25
 Fax: +33 1 39 59 53 50
 info@lasercomponents.fr
 www.lasercomponents.fr

United Kingdom
 Laser Components (UK) Ltd.
 Tel: +44 1245 491 499
 Fax: +44 1245 491 801
 info@lasercomponents.co.uk
 www.lasercomponents.co.uk

Nordic Countries
 Laser Components Nordic AB
 Tel: +46 31 703 71 73
 Fax: +46 31 703 71 01
 info@lasercomponents.se
 www.lasercomponents.se

USA
 Laser Components USA, Inc.
 Tel: +1 603 821 - 7040
 Fax: +1 603 821 - 7041
 info@lasercomponents.com
 www.lasercomponents.com



10/19 / V05 / OSIF / ballb/smd6060-uvc-led-high-power

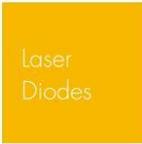
Germany & Other Countries
 Laser Components GmbH
 Tel: +49 8142 2864 - 0
 Fax: +49 8142 2864 - 11
 info@lasercomponents.com
 www.lasercomponents.com

France
 Laser Components S.A.S.
 Tel: +33 1 39 59 52 25
 Fax: +33 1 39 59 53 50
 info@lasercomponents.fr
 www.lasercomponents.fr

United Kingdom
 Laser Components (UK) Ltd.
 Tel: +44 1245 491 499
 Fax: +44 1245 491 801
 info@lasercomponents.co.uk
 www.lasercomponents.co.uk

Nordic Countries
 Laser Components Nordic AB
 Tel: +46 31 703 71 73
 Fax: +46 31 703 71 01
 info@lasercomponents.se
 www.lasercomponents.se

USA
 Laser Components USA, Inc.
 Tel: +1 603 821 - 7040
 Fax: +1 603 821 - 7041
 info@lasercomponents.com
 www.lasercomponents.com



Hex 6060 SMD Packaged LED Diagram

SMD LED on Hex MCPCB

All sizes in mm

Connectors (x2)
0.025" wires (AWG 22 - 25)

Solder pads (x4)
3x3 mm²

BOLB

Attach heatsink here

Product benefits

- Same popular MCPCB format for visible LEDs
- Eliminates reflow soldering
- Plug-n-play with 0.025" wires (AWG 24 or 25)
- Larger contact area for heat extraction
- Nomenclature example:
Hex-S6060-W270-P150-V6.0

10/119 / V05 / OSIF / bolb/smd6060-w270-p150-v6.0

5

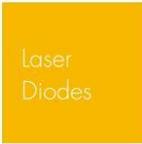
Germany & Other Countries
Laser Components GmbH
Tel: +49 8142 2864 - 0
Fax: +49 8142 2864 - 11
info@lasercomponents.com
www.lasercomponents.com

France
Laser Components S.A.S.
Tel: +33 1 39 59 52 25
Fax: +33 1 39 59 53 50
info@lasercomponents.fr
www.lasercomponents.fr

United Kingdom
Laser Components (UK) Ltd.
Tel: +44 1245 491 499
Fax: +44 1245 491 801
info@lasercomponents.co.uk
www.lasercomponents.co.uk

Nordic Countries
Laser Components Nordic AB
Tel: +46 31 703 71 73
Fax: +46 31 703 71 01
info@lasercomponents.se
www.lasercomponents.se

USA
Laser Components USA, Inc.
Tel: +1 603 821 - 7040
Fax: +1 603 821 - 7041
info@lasercomponents.com
www.lasercomponents.com



UVC LED: Electro-optical parameters

TABLE 1. Performance @ 350 mA forward current (25°C ambient, packaged)

Parameter	Symbol	Unit	Min.	Typ.	Max
Peak Wavelength	λ_p	nm	260	270	275
Radiant Flux	ϕ_e	mW	80	95	110
			130 +/- 20 mW: limited availability		
Forward Voltage	V _F	V	5.5	6.0	7.5
Spectrum Half Width	$\Delta\lambda$	nm		9.5	
View Angle	2 $\theta_{1/2}$	°		150	
Thermal Resistance	R _{J-b}	°C/W		<10 (TBD)	

FIG 1. Forward Current vs. Forward Voltage
Please also check typical value and BIN structure on page 8

FIG 2. Relative Radiant Flux vs. Forward Current
[T_a = 25 °C]

Specifications may subject to change without notice

10/19 / V05 / OSIF / ballb/smd6060-uvc-led-high-power

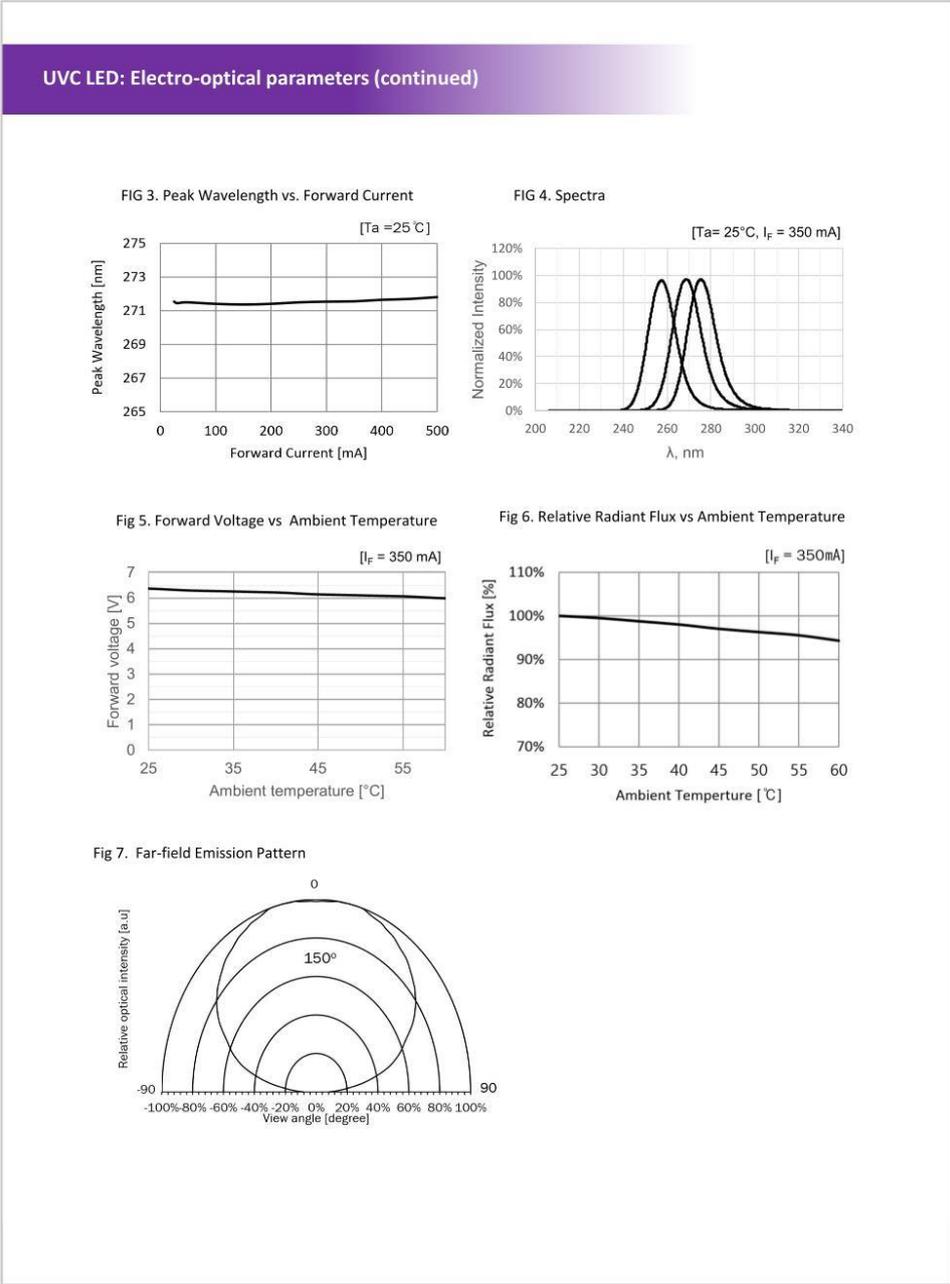
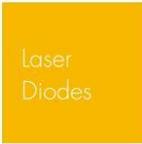
Germany & Other Countries
Laser Components GmbH
Tel: +49 8142 2864 - 0
Fax: +49 8142 2864 - 11
info@lasercomponents.com
www.lasercomponents.com

France
Laser Components S.A.S.
Tel: +33 1 39 59 52 25
Fax: +33 1 39 59 53 50
info@lasercomponents.fr
www.lasercomponents.fr

United Kingdom
Laser Components (UK) Ltd.
Tel: +44 1245 491 499
Fax: +44 1245 491 801
info@lasercomponents.co.uk
www.lasercomponents.co.uk

Nordic Countries
Laser Components Nordic AB
Tel: +46 31 703 71 73
Fax: +46 31 703 71 01
info@lasercomponents.se
www.lasercomponents.se

USA
Laser Components USA, Inc.
Tel: +1 603 821 - 7040
Fax: +1 603 821 - 7041
info@lasercomponents.com
www.lasercomponents.com



10/19 / V05 / OSIF / bolb/smd6060-uvc-led-high-power

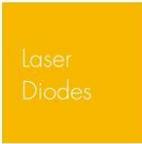
Germany & Other Countries
 Laser Components GmbH
 Tel: +49 8142 2864 - 0
 Fax: +49 8142 2864 - 11
 info@lasercomponents.com
 www.lasercomponents.com

France
 Laser Components S.A.S.
 Tel: +33 1 39 59 52 25
 Fax: +33 1 39 59 53 50
 info@lasercomponents.fr
 www.lasercomponents.fr

United Kingdom
 Laser Components (UK) Ltd.
 Tel: +44 1245 491 499
 Fax: +44 1245 491 801
 info@lasercomponents.co.uk
 www.lasercomponents.co.uk

Nordic Countries
 Laser Components Nordic AB
 Tel: +46 31 703 71 73
 Fax: +46 31 703 71 01
 info@lasercomponents.se
 www.lasercomponents.se

USA
 Laser Components USA, Inc.
 Tel: +1 603 821 - 7040
 Fax: +1 603 821 - 7041
 info@lasercomponents.com
 www.lasercomponents.com



UVC LED: Electro-optical parameters (continued)

TABLE 2. Device lifetime (forward current =350mA, T_J < 55°C)

Parameter	Symbol	Unit	Min.	Typ.	Max
70% Power Lifetime	L70	hours	850*	1000*	2000*
50% Power Lifetime	L50	hours	1200*	3000*	5000*

*Values subject to change: please inquire about latest update

4-hour 65°C water immersion test passed without failure

10/119 / V05 / OSIF / ballb/smd6060-uvc-led-high-power

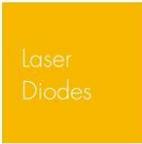
Germany & Other Countries
 Laser Components GmbH
 Tel: +49 8142 2864 – 0
 Fax: +49 8142 2864 – 11
 info@lasercomponents.com
 www.lasercomponents.com

France
 Laser Components S.A.S.
 Tel: +33 1 39 59 52 25
 Fax: +33 1 39 59 53 50
 info@lasercomponents.fr
 www.lasercomponents.fr

United Kingdom
 Laser Components (UK) Ltd.
 Tel: +44 1245 491 499
 Fax: +44 1245 491 801
 info@lasercomponents.co.uk
 www.lasercomponents.co.uk

Nordic Countries
 Laser Components Nordic AB
 Tel: +46 31 703 71 73
 Fax: +46 31 703 71 01
 info@lasercomponents.se
 www.lasercomponents.se

USA
 Laser Components USA, Inc.
 Tel: +1 603 821 – 7040
 Fax: +1 603 821 – 7041
 info@lasercomponents.com
 www.lasercomponents.com



UVC LED: Electro-optical parameters (continued)

TABLE 3. Bin Structures [Ta =25°C, I_f = 350mA]

Designate	Information	Code	Min	Typ.	Max.
W	Peak Wavelength	268	265	268	272
		For other available wavelength bins, please contact info@bolb.co			
P	Radiant Flux (Φ _s)	90	80	90	110
		Emitters with 130 +/- 20 mW are available in limited quantities			
V	Forward Voltage (V)	5.5	5.0	5.5	6.0
		6.5	6.0	6.5	7.0
		7.5	7.0	7.5	8.0
		H	8.0	8.5	9.0

Note: Bin Code method
Bin Code (W-P-V): Peak Wavelength = W ; Radiant Flux = P ; Forward Voltage = V

10/119 / Y05 / OSIF / bolb/smd6060-uvc-led-high-power

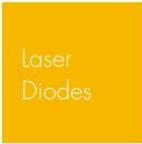
Germany & Other Countries
 Laser Components GmbH
 Tel: +49 8142 2864 – 0
 Fax: +49 8142 2864 – 11
info@lasercomponents.com
www.lasercomponents.com

France
 Laser Components S.A.S.
 Tel: +33 1 39 59 52 25
 Fax: +33 1 39 59 53 50
info@lasercomponents.fr
www.lasercomponents.fr

United Kingdom
 Laser Components (UK) Ltd.
 Tel: +44 1245 491 499
 Fax: +44 1245 491 801
info@lasercomponents.co.uk
www.lasercomponents.co.uk

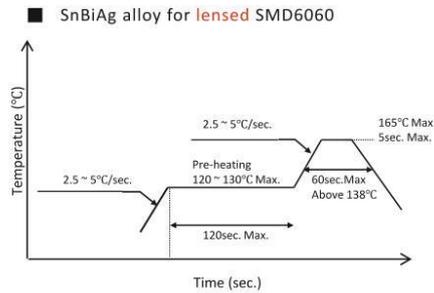
Nordic Countries
 Laser Components Nordic AB
 Tel: +46 31 703 71 73
 Fax: +46 31 703 71 01
info@lasercomponents.se
www.lasercomponents.se

USA
 Laser Components USA, Inc.
 Tel: +1 603 821 – 7040
 Fax: +1 603 821 – 7041
info@lasercomponents.com
www.lasercomponents.com



Soldering conditions of UVC LED

FIG 8. Solder reflow temperature profile



Reflow Soldering Instructions	
SnBiAg alloy (Melting Temperature=138°C)	
Pre-Heating	120 ~ 130°C
Pre-Heat Time	120sec. Max.
Peak Temperature	165°C, 5 sec. Max.
Soldering Time	60 sec. Max. (above 138°C)

- Recommended solder composition: SnBiAg alloy or T3 soldering paste (lead free)
 - Recommended stencil thickness is 60~80um
 - Recommended stencil solder paste area is 60~80%
 - Forming gas (5%-7% H_2 in N_2) ambient recommended for best results
 - After reflow soldering, Rapid cooling should be avoided
 - When soldering, do not use a none calibrated hot plate. A convection type reflow oven is preferred. (Fig 9.)
- Must not use heat gun (blower) for soldering

FIG 9. Do not use a hot plate to mount led-package onto PCB. A reflow oven is recommended.

10/19 / V05 / OSIF / ballb/smd6060-uvc-led-high-power

Germany & Other Countries
 Laser Components GmbH
 Tel: +49 8142 2864 - 0
 Fax: +49 8142 2864 - 11
 info@lasercomponents.com
 www.lasercomponents.com

France
 Laser Components S.A.S.
 Tel: +33 1 39 59 52 25
 Fax: +33 1 39 59 53 50
 info@lasercomponents.fr
 www.lasercomponents.fr

United Kingdom
 Laser Components (UK) Ltd.
 Tel: +44 1245 491 499
 Fax: +44 1245 491 801
 info@lasercomponents.co.uk
 www.lasercomponents.co.uk

Nordic Countries
 Laser Components Nordic AB
 Tel: +46 31 703 71 73
 Fax: +46 31 703 71 01
 info@lasercomponents.se
 www.lasercomponents.se

USA
 Laser Components USA, Inc.
 Tel: +1 603 821 - 7040
 Fax: +1 603 821 - 7041
 info@lasercomponents.com
 www.laser-components.com

Handling Precautions

ESD Protection

Workplace setup should follow the recommendations given in JEDEC standard document JESD625B "Requirements for Handling Electrostatic-Discharge-Sensitive (ESDS) Devices" or IEC 61340-5-1,2 and 3. The operators should be properly trained to handle UVC flipchips according the guidelines listed below:

- Always wear conductive wrist straps that is continuously monitored when working or handling assembled boards containing unprotected chips.
- Use an ion blower to neutralize the static discharge that may build up on the surface of the UVC flipchips during storage and handling.
- Always keep unused UVC flipchips in the protective ESD storage bag. Depending on the final application, it may be necessary to include additional ESD protection, such as a TVS protection diode on the substrate on which UVC flip chip is reflowed. Bolb Inc. includes a TVS chip inside each LED package.
- Use tweezers to pick up UVC LEDs, teflon coated tweezers would be recommended to avoid scratching UVC LEDs.
- Recommend holding the sidewalls of the LEDs (See Fig 10.)

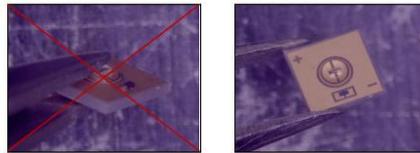
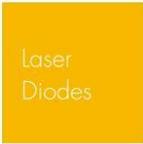
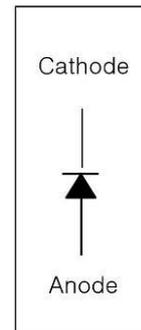
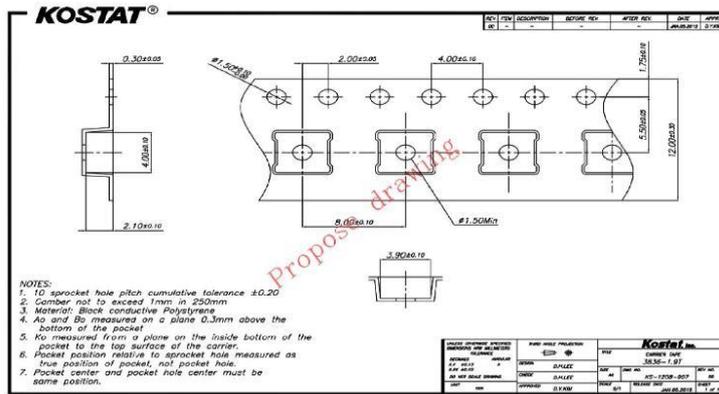


FIG 10. incorrect handling (left) and correct handling (right) of UVC LED Package

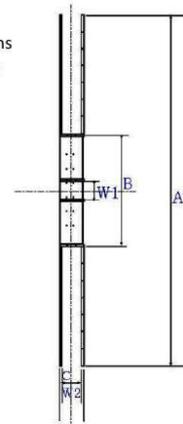
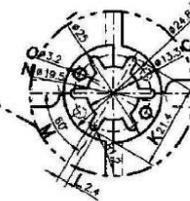
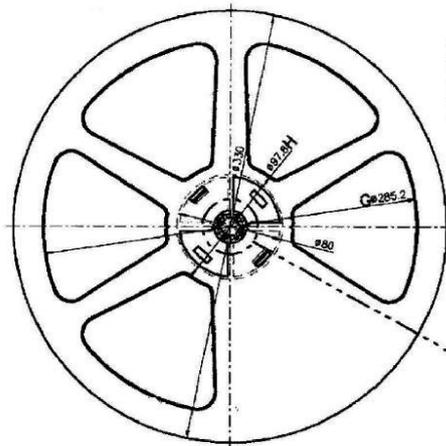


Packing

Carrier Tape & Reel Dimensions (unit = mm)



Quantity < 3,000 units/reel
 Cover tape adhesion < 0.7 Newtons
 Leader tape < 200 empty pockets
 Trailer < 60 empty pockets



10/19 / V05 / OSIF / ballb/smd6060-wc1ech-high-power

Germany & Other Countries
 Laser Components GmbH
 Tel: +49 8142 2864 - 0
 Fax: +49 8142 2864 - 11
 info@lasercomponents.com
 www.lasercomponents.com

France
 Laser Components S.A.S.
 Tel: +33 1 39 59 52 25
 Fax: +33 1 39 59 53 50
 info@lasercomponents.fr
 www.lasercomponents.fr

United Kingdom
 Laser Components (UK) Ltd.
 Tel: +44 1245 491 499
 Fax: +44 1245 491 801
 info@lasercomponents.co.uk
 www.lasercomponents.co.uk

Nordic Countries
 Laser Components Nordic AB
 Tel: +46 31 703 71 73
 Fax: +46 31 703 71 01
 info@lasercomponents.se
 www.lasercomponents.se

USA
 Laser Components USA, Inc.
 Tel: +1 603 821 - 7040
 Fax: +1 603 821 - 7041
 info@lasercomponents.com
 www.lasercomponents.com

Laser
Diodes

General Precautions and UVC Safety



UVC LEDs emit deep ultraviolet radiation, with extremely high intensity near its surface. This allows rapid disinfection but safety precautions must be observed during assembly and testing.

By purchasing the UVC chips (bare dice) or packaged LEDs from the manufacturer, the customer hereby agrees to absolve the manufacturer's responsibility of any bodily harm as a result of failure to observe the precautions, warnings and guidelines contained within this Specifications document.

All assembly workers, operators and bystanders must wear eye and skin protection when the UVC LEDs are energized. Bare-eye observation (including through microscopes) and bare-hand handling of a UVC LED in operation is **PROHIBITED**.

UVC light can be easily absorbed, so any oil or other absorbent liquid or solid substance must **NOT** be allowed to touch the sapphire side of the UVC chip, or the dome lens on a packaged LED.

Do not apply pressure to the dome lens on packaged LED.

10/19 / V05 / OSIF / ballb/smd6060-uvc-led-high-power

13

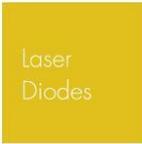
Germany & Other Countries
Laser Components GmbH
Tel: +49 8142 2864 - 0
Fax: +49 8142 2864 - 11
info@lasercomponents.com
www.lasercomponents.com

France
Laser Components S.A.S.
Tel: +33 1 39 59 52 25
Fax: +33 1 39 59 53 50
info@lasercomponents.fr
www.lasercomponents.fr

United Kingdom
Laser Components (UK) Ltd.
Tel: +44 1245 491 499
Fax: +44 1245 491 801
info@lasercomponents.co.uk
www.lasercomponents.co.uk

Nordic Countries
Laser Components Nordic AB
Tel: +46 31 703 71 73
Fax: +46 31 703 71 01
info@lasercomponents.se
www.lasercomponents.se

USA
Laser Components USA, Inc.
Tel: +1 603 821 - 7040
Fax: +1 603 821 - 7041
info@lasercomponents.com
www.lasercomponents.com

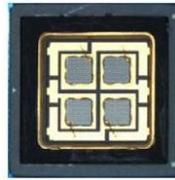


PRELIMINARY

CUSTOMER : _____
DATE : _____
REV : Rev. 0.0 _____

preliminary

SPECIFICATIONS FOR APPROVAL



305nm 300mW 6868 @350mA LED PKG
MODEL NAME : LEUVA77N50KU00

RoHS
Compliant

Halogen
Compliant

APPROVAL	REMARK	APPENDIX

DESIGNED	CHECKED	APPROVED

02/18 / Y02 / F / lg/leuva77n50ku00_305nm_300mW

1

Germany & Other Countries
Laser Components GmbH
Tel: +49 8142 2864 - 0
Fax: +49 8142 2864 - 11
info@lasercomponents.com
www.lasercomponents.com

France
Laser Components S.A.S.
Tel: +33 1 39 59 52 25
Fax: +33 1 39 59 53 50
info@lasercomponents.fr
www.lasercomponents.fr

United Kingdom
Laser Components (UK) Ltd.
Tel: +44 1245 491 499
Fax: +44 1245 491 801
info@lasercomponents.co.uk
www.lasercomponents.co.uk

Nordic Countries
Laser Components Nordic AB
Tel: +46 31 703 71 73
Fax: +46 31 703 71 01
info@lasercomponents.se
www.lasercomponents.se

Laser
Diodes



PRELIMINARY

LGIT Confidential and Proprietary

TALBE OF CONTENTS

1. Features	-----	3
2. Outline Dimensions	-----	3
3. Applications	-----	4
4. Absolute Maximum Ratings	-----	4
5. Electro-Optical Characteristics	-----	4
6. Bin Structures	-----	5
7. Typical Characteristic Curves	-----	6~7
8. Reliability Test Items and Conditions	-----	8
9. Packing and Labeling of Products	-----	8~11
10. Cautions on Use	-----	9~13
11. Disclaimers	-----	14

02./18 / Y02 / F / lg/leiva77n50ku00_305nm_300mW

2

Germany & Other Countries
Laser Components GmbH
Tel: +49 8142 2864 - 0
Fax: +49 8142 2864 - 11
info@lasercomponents.com
www.lasercomponents.com

France
Laser Components S.A.S.
Tel: +33 1 39 59 52 25
Fax: +33 1 39 59 53 50
info@lasercomponents.fr
www.lasercomponents.fr

United Kingdom
Laser Components (UK) Ltd.
Tel: +44 1245 491 499
Fax: +44 1245 491 801
info@lasercomponents.co.uk
www.lasercomponents.co.uk

Nordic Countries
Laser Components Nordic AB
Tel: +46 31 703 71 73
Fax: +46 31 703 71 01
info@lasercomponents.se
www.lasercomponents.se



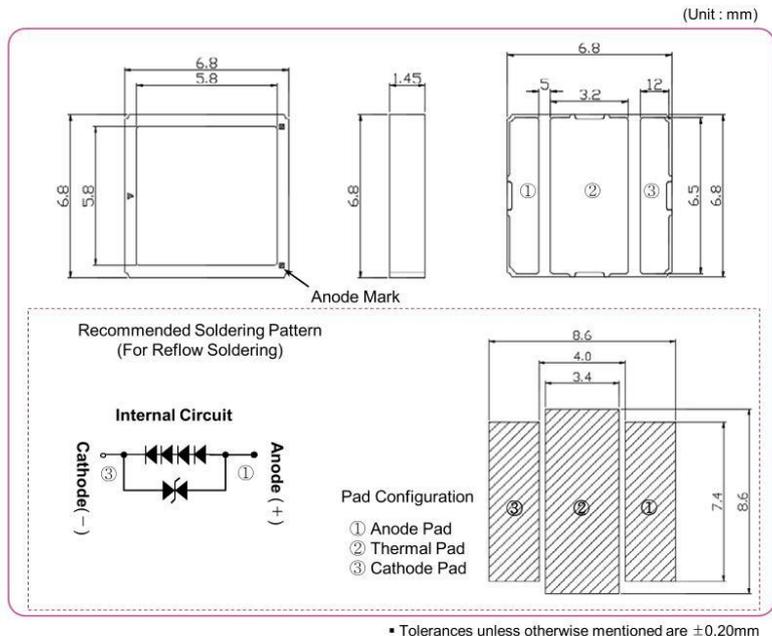
PRELIMINARY

LGIT Confidential and Proprietary

1. Features

- Lighting Color(Peak Wavelength) : 300~315nm
- Surface Mount Type : 6.8×6.8×1.45 (L×W×H) [Unit : mm]
- Viewing Angle(Directivity) : Typical 125°
- Soldering Methods : Reflow Soldering

2. Outline Dimensions



02/18 / Y02 / F / lg/leiva77n50ku00_305mm_300mW

3

Germany & Other Countries
 Laser Components GmbH
 Tel: +49 8142 2864 - 0
 Fax: +49 8142 2864 - 11
 info@lasercomponents.com
 www.lasercomponents.com

France
 Laser Components S.A.S.
 Tel: +33 1 39 59 52 25
 Fax: +33 1 39 59 53 50
 info@lasercomponents.fr
 www.lasercomponents.fr

United Kingdom
 Laser Components (UK) Ltd.
 Tel: +44 1245 491 499
 Fax: +44 1245 491 801
 info@lasercomponents.co.uk
 www.lasercomponents.co.uk

Nordic Countries
 Laser Components Nordic AB
 Tel: +46 31 703 71 73
 Fax: +46 31 703 71 01
 info@lasercomponents.se
 www.lasercomponents.se



PRELIMINARY

LGIT Confidential and Proprietary

3. Applications

- Disinfection, Phototherapy, Fluorescent Spectroscopy, Sensor Light, Bio-Analysis / Detection, Counterfeit Detectors, etc.

4. Absolute Maximum Ratings

(Ta= 25°C)

Items	Symbols	Ratings	Unit
Forward Current	If	TBD	A
Power Dissipation	Pd	TBD	W
Operating Temperature	Topr	-10 ~ +85	°C
Storage Temperature	Tstg	-40 ~ +100	°C
Junction Temperature	Tj	125	°C
Soldering Temperature	JEDEC-J-STD-020D		
ESD Classification	Class 2 (ANSI/ESDA/JEDEC JS-001)		

- * Operating the LED beyond the listed maximum ratings may affect device reliability and cause permanent damage. These or any other conditions beyond those indicated under recommended operating conditions are not implied. The exposure to the absolute maximum rated conditions may affect device reliability.
- * The LEDs are not designed to be driven in reverse bias.

5. Electro-Optical Characteristics

(Ta=25°C)

Items	Symbol	Condition	Target Spec.			Unit
			Min.	Typ.	Max.	
Forward Voltage	Vf	If = 0.35 A	-	-	34	V
Radiant Flux	Φe		-	300	-	mW
Peak Wavelength	λp		300	-	315	nm
Spectrum Half Width	Δλ		-	12.5	-	nm
Viewing Angle	2Θ1/2		-	125	-	deg
Thermal Resistance *1)	Rth j-c		-	TBD	-	°C/W

*1) Rthj-c = Thermal Resistance (Junction – Case)

- * These values are measured by the LG Innotek optical spectrum analyzer within the following tolerances.
 - Forward Voltage(Vf) : ±0.1V
 - Peak Wavelength(λp) : ±3.0nm
 - Radiant Flux(Φv) : ±10%
- * Although all LEDs are tested by LG Innotek equipment, some values may vary slightly depending on the conditions of the test equipment.

02/18 / Y02 / F / lg/leiva77n50ku00_305nm_300mW

Germany & Other Countries
 Laser Components GmbH
 Tel: +49 8142 2864 – 0
 Fax: +49 8142 2864 – 11
 info@lasercomponents.com
 www.lasercomponents.com

France
 Laser Components S.A.S.
 Tel: +33 1 39 59 52 25
 Fax: +33 1 39 59 53 50
 info@lasercomponents.fr
 www.lasercomponents.fr

United Kingdom
 Laser Components (UK) Ltd.
 Tel: +44 1245 491 499
 Fax: +44 1245 491 801
 info@lasercomponents.co.uk
 www.lasercomponents.co.uk

Nordic Countries
 Laser Components Nordic AB
 Tel: +46 31 703 71 73
 Fax: +46 31 703 71 01
 info@lasercomponents.se
 www.lasercomponents.se



PRELIMINARY

LGIT Confidential and Proprietary

6. Bin Structures

Items	Rank	Min.	Max.	Unit
Peak Wavelength	H	300	315	nm
Radiant Flux	TBD	TBD	TBD	mW
Forward Voltage	TBD	-	34	V

- * Forward Current = 0.35A
- * Rank name method : Please refer to the following example

Rank Name : H-HP1-V1
 - Peak Wavelength = H
 - Radiant Flux = HP1
 - Forward Voltage = V1

02/18 / Y02 / F / lg/leuva77n50ku00_305nm_300mW

Germany & Other Countries
 Laser Components GmbH
 Tel: +49 8142 2864 - 0
 Fax: +49 8142 2864 - 11
 info@lasercomponents.com
 www.lasercomponents.com

France
 Laser Components S.A.S.
 Tel: +33 1 39 59 52 25
 Fax: +33 1 39 59 53 50
 info@lasercomponents.fr
 www.lasercomponents.fr

United Kingdom
 Laser Components (UK) Ltd.
 Tel: +44 1245 491 499
 Fax: +44 1245 491 801
 info@lasercomponents.co.uk
 www.lasercomponents.co.uk

Nordic Countries
 Laser Components Nordic AB
 Tel: +46 31 703 71 73
 Fax: +46 31 703 71 01
 info@lasercomponents.se
 www.lasercomponents.se

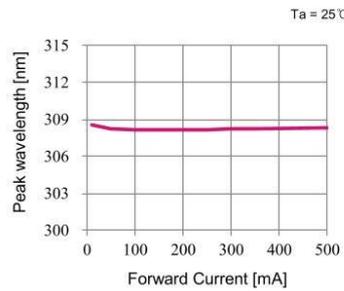


PRELIMINARY

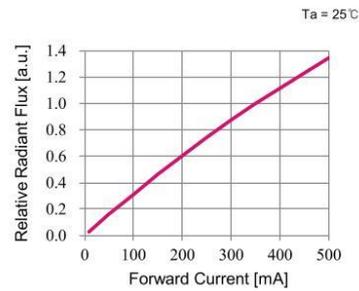
LGIT Confidential and Proprietary

7. Typical Characteristic Curves

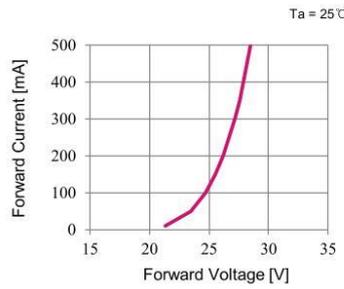
Forward Current vs. Peak Wavelength



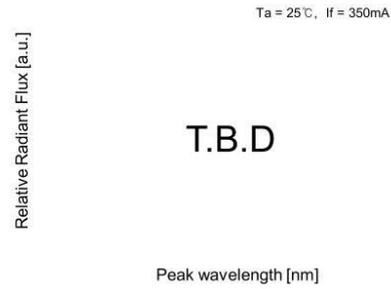
Forward Current vs. Relative Radiant Flux



Forward Voltage vs. Forward Current



Spectrum



Radiation Characteristics (Angle of Beam Spread, Directivity)

Ta = 25°C, If = 350mA

T.B.D

02/18 / V02 / If / lg/leiva77h50ku00_305nm_300mW

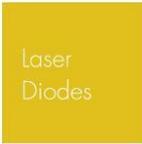


Germany & Other Countries
 Laser Components GmbH
 Tel: +49 8142 2864 - 0
 Fax: +49 8142 2864 - 11
 info@lasercomponents.com
 www.lasercomponents.com

France
 Laser Components S.A.S.
 Tel: +33 1 39 59 52 25
 Fax: +33 1 39 59 53 50
 info@lasercomponents.fr
 www.lasercomponents.fr

United Kingdom
 Laser Components (UK) Ltd.
 Tel: +44 1245 491 499
 Fax: +44 1245 491 801
 info@lasercomponents.co.uk
 www.lasercomponents.co.uk

Nordic Countries
 Laser Components Nordic AB
 Tel: +46 31 703 71 73
 Fax: +46 31 703 71 01
 info@lasercomponents.se
 www.lasercomponents.se

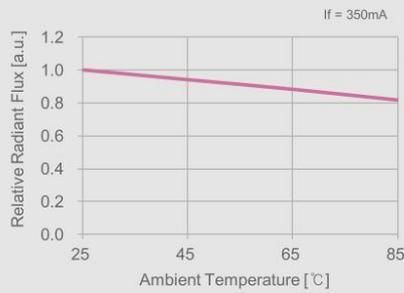


PRELIMINARY

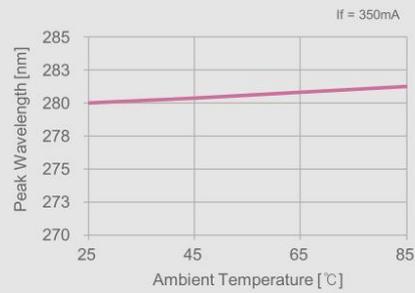
LGIT Confidential and Proprietary

7. Typical Characteristic Curves

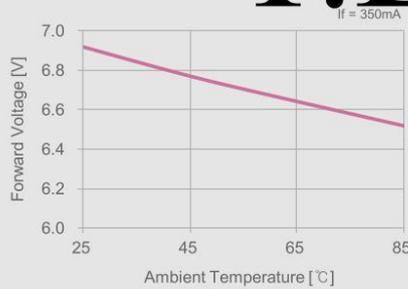
Ambient Temperature vs. Relative Radiant Flux



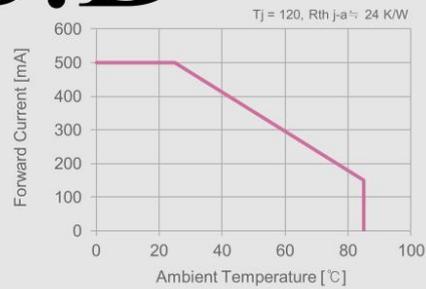
Ambient Temperature vs. Peak Wavelength



Ambient Temperature vs. Forward Voltage



Derating Curve



T.B.D

* The ambient temperature values for each graph are obtained with LG Innotek equipment.

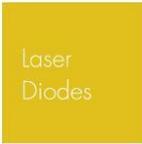
02/18 / Y02 / IF / lg/leuva77h50ku00_305nm_300mW

Germany & Other Countries
 Laser Components GmbH
 Tel: +49 8142 2864 - 0
 Fax: +49 8142 2864 - 11
 info@lasercomponents.com
 www.lasercomponents.com

France
 Laser Components S.A.S.
 Tel: +33 1 39 59 52 25
 Fax: +33 1 39 59 53 50
 info@lasercomponents.fr
 www.lasercomponents.fr

United Kingdom
 Laser Components (UK) Ltd.
 Tel: +44 1245 491 499
 Fax: +44 1245 491 801
 info@lasercomponents.co.uk
 www.lasercomponents.co.uk

Nordic Countries
 Laser Components Nordic AB
 Tel: +46 31 703 71 73
 Fax: +46 31 703 71 01
 info@lasercomponents.se
 www.lasercomponents.se



PRELIMINARY

LGIT Confidential and Proprietary

8. Reliability Test Items and Conditions

8-1. Failure Criteria

Items	Symbols	Test Conditions	Criteria	
			Min.	Max.
Forward Voltage	V _f	I _f = 350mA	-	Initial Value × 1.1
Radiant Flux	Φ _e	I _f = 350mA	Initial Value × 0.7	-

8-2. Reliability Tests

No	Items	Test Conditions	Test Hours /Cycles	Sample Size
1	Room Temperature Operating Life 1 (RTOL)	T _a = 25°C, I _f = 350mA	1,000 Hours	10 pcs
2	Room Temperature Operating Life 2 (RTOL)	T _a = 25°C, I _f = TBD	1,000 Hours	10 pcs
3	High Temperature Operating Life (HTOL)	T _a = 85°C, I _f = TBD	1,000 Hours	10 pcs
4	Low Temperature Operating Life (LTOL)	T _a = -10°C, I _f = 350mA	1,000 Hours	10 pcs
5	High Temperature Storage Life (HTSL)	T _a = 100°C	1,000 Hours	10 pcs
6	Low Temperature Storage Life (LTSL)	T _a = -40°C	1,000 Hours	10 pcs
7	Temperature Cycle (TC)	-40°C(30min) ~ 100°C(30min)	200 Cycles	10 pcs
8	Moisture Sensitivity Level (MSL)	T _{std} = 260°C (Pre treatment 60°C, 60% 168 hours)	3 Times	10 pcs
9	Electrostatic Discharge	R = 1.5kΩ, C = 100pF, Test Voltage = 2kV, H.B.M.(Human Body Model)	3 Times Negative/ Positive	10 pcs
10	Vibration	100~2000~100Hz Sweep 4min. 200m/s ² , 3 directions	48 Minutes	10 pcs

* All samples are tested using LG Innotek Standard Metal PCB (25x25x1.6 mm³(L×W×H)) except MSL test .
 * All samples must pass each test item and all test items must be satisfied.

02/18 / V02 / F / lg/leiva77n50ku00_305nm_300mW

Germany & Other Countries
 Laser Components GmbH
 Tel: +49 8142 2864 - 0
 Fax: +49 8142 2864 - 11
 info@lasercomponents.com
 www.lasercomponents.com

France
 Laser Components S.A.S.
 Tel: +33 1 39 59 52 25
 Fax: +33 1 39 59 53 50
 info@lasercomponents.fr
 www.lasercomponents.fr

United Kingdom
 Laser Components (UK) Ltd.
 Tel: +44 1245 491 499
 Fax: +44 1245 491 801
 info@lasercomponents.co.uk
 www.lasercomponents.co.uk

Nordic Countries
 Laser Components Nordic AB
 Tel: +46 31 703 71 73
 Fax: +46 31 703 71 01
 info@lasercomponents.se
 www.lasercomponents.se

Laser
Diodes

PRELIMINARY

LGIT Confidential and Proprietary

10. Cautions on Use

10-1. Moisture-Proof Package

- The moisture in the SMD package may vaporize and expand during soldering.
- The moisture can damage the optical characteristics of the LEDs due to the encapsulation.

10-2. During Storage

Conditions		Temperature	Humidity	Time
Storage	Before Opening Aluminum Bag	5 °C ~ 30 °C	< 50%RH	Within 1 Year from the Delivery Date
	After Opening Aluminum Bag	5 °C ~ 30 °C	< 60%RH	≤ 672 hours
Baking		65 ± 5 °C	< 10%RH	10 ~ 24 hours

10-3. During Usage

- The LED should avoid direct contact with hazardous materials such as sulfur, chlorine, phthalate, etc.
- The metal parts on the LED can rust when exposed to corrosive gases. Therefore, exposure to corrosive gases must be avoided during operation and storage.
- The silver-plated metal parts also can be affected not only by the corrosive gases emitted inside of the end-products but by the gases penetrated from outside environment.
- Extreme environments such as sudden ambient temperature changes or high humidity that can cause condensation must be avoided.

10-4. Cleaning

- Do not use brushes for cleaning or organic solvents (i.e. Acetone, TCE, etc..) for washing as they may damage the resin of the LEDs.
- Isopropyl Alcohol (IPA) is the recommended solvent for cleaning the LEDs under the following conditions.
Cleaning Condition : IPA, 25 °C max. × 60sec max.
- Ultrasonic cleaning is not recommended.
- Pretests should be conducted with the actual cleaning process to validate that the process will not damage the LEDs.

02/18 / V02 // IF // lg/leiva77n50ku00_305nm_300mW

9

Germany & Other Countries
Laser Components GmbH
Tel: +49 8142 2864 - 0
Fax: +49 8142 2864 - 11
info@lasercomponents.com
www.lasercomponents.com

France
Laser Components S.A.S.
Tel: +33 1 39 59 52 25
Fax: +33 1 39 59 53 50
info@lasercomponents.fr
www.lasercomponents.fr

United Kingdom
Laser Components (UK) Ltd.
Tel: +44 1245 491 499
Fax: +44 1245 491 801
info@lasercomponents.co.uk
www.lasercomponents.co.uk

Nordic Countries
Laser Components Nordic AB
Tel: +46 31 703 71 73
Fax: +46 31 703 71 01
info@lasercomponents.se
www.lasercomponents.se

Laser
Diodes

PRELIMINARY

LGIT Confidential and Proprietary

10. Cautions on Use

10-5. Thermal Management

- The thermal management is the most important thing of the heat dissipation (cooling) performance for the deep UV(UVB) LED Package.
- The thermal design of the product must be seriously considered even from the beginning stage.
- The co-efficiency between the heat generation and the input power is affected by the thermal resistance of the circuit boards and the density of the LED placements together with other components.
- The deep UV(UVB) LED soldered on a metal PCB with a high thermal conductivity.
Or Please combine the deep UV(UVB) LED with a metal PCB and a large volume-Heat Sink(Heat Block), a mini(compact / slim)-air or water cooler, etc.
- Please design the LED module or system in customer that the temperature of the LED Package does not exceed the maximum junction temperature(T_J).

10-6. Electrostatic Discharge (ESD)

- The LEDs are sensitive to static electricity or surge voltage and current.
The Electrostatic Discharge can damage a LED Chip.
Also, It can be affect a reliability belong to the life time of LED package.
When handling LEDs, the following measures against ESD are actively recommended :
 - 1) Please wear a wrist strap, anti-static clothes, foot wear and gloves.
 - 2) Please set up a grounded or anti-static paint floors, a grounded or the ability to surge protection - workstation equipment or power supply, pulse generator, current/voltage driver circuit, etc. and tools. .
 - 3) ESD protection- worktable/bench, mat made of a conductive materials.
- An appropriate grounding is required for all devices, equipment, and machinery used in product assembly. Please apply surge protection after review when designing of commercial products.
- If tools or equipment contain insulating materials such as glass or plastics, the following measures against ESD are strongly recommended :
 - 1) Dissipating static charge with conductive materials
 - 2) Preventing charge generation with moisture
 - 3) Plug in the ionizing blowers(ionizer) for neutralizing the charge
- The customer is advised to check if the LEDs are damaged by ESD when performing the characteristics inspection of the LEDs in the application.
Damage of LED can be detected with a forward voltage checking(measuring) at low current(≤1.0mA).
- ESD damaged LEDs may have a current flow at a low voltage.
* Failure Criteria : $V_f < 16.0V$ at $I_f = 0.5mA$.

02/18 / V02 // F // lg/leiva77n50ku00_305mm_300mW

10

Germany & Other Countries
Laser Components GmbH
Tel: +49 8142 2864 - 0
Fax: +49 8142 2864 - 11
info@lasercomponents.com
www.lasercomponents.com

France
Laser Components S.A.S.
Tel: +33 1 39 59 52 25
Fax: +33 1 39 59 53 50
info@lasercomponents.fr
www.lasercomponents.fr

United Kingdom
Laser Components (UK) Ltd.
Tel: +44 1245 491 499
Fax: +44 1245 491 801
info@lasercomponents.co.uk
www.lasercomponents.co.uk

Nordic Countries
Laser Components Nordic AB
Tel: +46 31 703 71 73
Fax: +46 31 703 71 01
info@lasercomponents.se
www.lasercomponents.se



PRELIMINARY

LGIT Confidential and Proprietary

10. Cautions on Use

10-7. Recommended Circuit

- The driving circuits must be designed and operated by forward bias only so that the LEDs are not to be operated by the reverse voltages while turned off, which can damage the LEDs.
 - Reverse voltage can damage the zener diode and cause destructions.
 - The current through each LED must not exceed the absolute maximum ratings when design the circuits.
 - Customer must apply resistors for a protection, others slight voltage shift will cause a big current change (Burn out will happen. Especially these LEDs are sensitive to surge current.).
 - In general, there can be various forward voltages for LEDs.
- Different forward voltages in parallel via a single resistor can result different forward currents to each LED, which also can output different radiant flux values.
- In the worst case, the currents can exceed the absolute maximum ratings which can stress the LEDs.
- Matrix circuit with a single resistor for each LED is recommended to avoid the radiant flux fluctuations.
- Constant-current operation by driver IC controller is recommended.

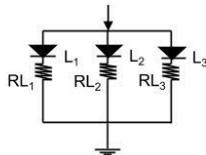


Fig.1. Recommended Circuit in Parallel Mode :
Separate resistors must be used for each LED.

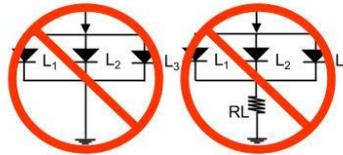


Fig.2. Abnormal Circuit :
Avoid this circuits! The current through the LEDs may vary due to the variation in LED forward voltage.

02/18 / V02 / F / lg/leiva77n50ku00_305nm_300mW

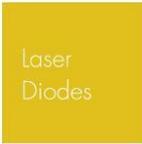
11

Germany & Other Countries
Laser Components GmbH
Tel: +49 8142 2864 - 0
Fax: +49 8142 2864 - 11
info@lasercomponents.com
www.lasercomponents.com

France
Laser Components S.A.S.
Tel: +33 1 39 59 52 25
Fax: +33 1 39 59 53 50
info@lasercomponents.fr
www.lasercomponents.fr

United Kingdom
Laser Components (UK) Ltd.
Tel: +44 1245 491 499
Fax: +44 1245 491 801
info@lasercomponents.co.uk
www.lasercomponents.co.uk

Nordic Countries
Laser Components Nordic AB
Tel: +46 31 703 71 73
Fax: +46 31 703 71 01
info@lasercomponents.se
www.lasercomponents.se



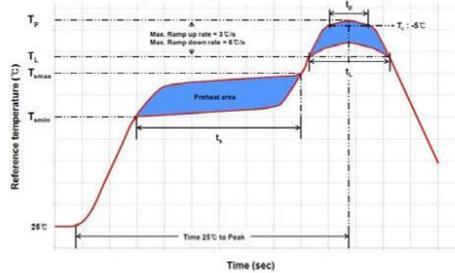
PRELIMINARY

LGIT Confidential and Proprietary

10. Cautions on Use

10-8. Soldering Conditions

- Reflow soldering is the recommended method for assembling LEDs on a circuit board.
- LG Innotek does not guarantee the performance of the LEDs assembled by the dip soldering method.
- Recommended Soldering Profile (according to JEDEC J-STD-020D)



Profile Feature	Pb-Free Assembly	Pb-Based Assembly
Preheat / Soak		
Temperature Min (T_{smin})	150°C	100°C
Temperature Max (T_{smax})	200°C	150°C
Maximum time(t_s) from T_{smin} to T_{smax}	60-120 seconds	60-120 seconds
Ramp-up rate (T_s to T_p)	3°C/ second max.	3°C/ second max.
Liquidus temperature (T_L)	217°C	183°C
Time (t_L) maintained above T_L	60-150 seconds	60-150 seconds
Maximum peak package body temperature (T_p)	260°C	235°C
Time(t_p) within 5°C of the specified temperature (T_c)	30 seconds	20 seconds
Ramp-down rate (T_p to T_L)	6°C/second max.	6°C/second max.
Maximum Time 25°C to peak temperature	8 minutes max.	6 minutes max.

- Although the recommended soldering conditions are specified in the above diagram, reflow or a hand iron dip soldering at the lowest possible temperature is desirable for the LEDs.
 - A rapid-rate process is not recommended for cooling the LEDs down from the peak temperature.
 - Occasionally there is a brightness decrease caused by the influence of heat of ambient atmosphere during air reflow.
- It is recommended that the customer use the nitrogen reflow method.
- The hermetic sealed material of the LEDs is a glass plate.
- Therefore, the LEDs have a soft and very fragile surface on the top of the package. The pressure to the surface will be influence to the reliability of the LEDs. Precautions should be taken to avoid the strong pressure on the encapsulated part. So, when using the chip mounter, the picking up nozzle that does not affect the silicone resin should be used.
- Reflow soldering should not be done more than two times.

02/18 / V02 // F / lg/leuva77n50ku00_305nm_300mW

Germany & Other Countries
 Laser Components GmbH
 Tel: +49 8142 2864 - 0
 Fax: +49 8142 2864 - 11
 info@lasercomponents.com
 www.lasercomponents.com

France
 Laser Components S.A.S.
 Tel: +33 1 39 59 52 25
 Fax: +33 1 39 59 53 50
 info@lasercomponents.fr
 www.lasercomponents.fr

United Kingdom
 Laser Components (UK) Ltd.
 Tel: +44 1245 491 499
 Fax: +44 1245 491 801
 info@lasercomponents.co.uk
 www.lasercomponents.co.uk

Nordic Countries
 Laser Components Nordic AB
 Tel: +46 31 703 71 73
 Fax: +46 31 703 71 01
 info@lasercomponents.se
 www.lasercomponents.se

LGIT Confidential and Proprietary

10. Cautions on Use

10-9. Soldering Iron

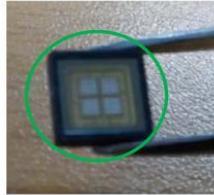
- The recommended condition is less than 5 seconds at 260 °C.
- The time must be shorter for higher temperatures. (+10 °C → -1sec).
- The power dissipation of the soldering iron should be lower than 15W and the surface temperature of the device should be controlled at or under 230 °C.

10-10. Eye Safety Guidelines

- Do not view directly in to the deep UV(UVB) light of UV LED driven at low current or the LED with optical instruments for measuring such as radiant flux, light distribution and spectrum, etc.
- Do not expose to the human body and eyes during the LED light emitting because UV(UVB) light can be bad for human.
- Please wear UV protective products such as UV protective glasses, mask, etc.

10-11. Manual Handling

- Use tweezers to grab these LED products at the ceramic body.
Teflon coated tweezers would be recommended that the LED package is not to scratch .



- During assembly processing, a mechanical stress on the surface should be minimized as much as possible.
Our product consists of fragile ceramic material and glass, etc.
During SMT processing, there are basically no restrictions regarding the form of the pick and place nozzles and tweezers, except that overload a mechanical pressure on the LED package must be prevented.
Also, Do not drop the LED Product.

Laser
Diodes



PRELIMINARY

LGIT Confidential and Proprietary

11. Disclaimers

- LG Innotek is not responsible for any damages or accidents caused if the operating or storage conditions exceed the absolute maximum ratings recommended in this document.
- The LEDs described in this document are intended to be operated by ordinary electronic equipment.
- Consult LG Innotek, sales staff in advance for information on the applications in which exceptional quality and reliability are required, particularly when the failure or malfunction of the LEDs, may directly jeopardize life or health.
- It is recommended to consult with LG Innotek when the environment or the LED operation is non-standard in order to avoid any possible malfunctions or damage to product or risk of life or health.
- Disassembly of the LED products for the purpose of reverse engineering is prohibited without prior written consent from LG Innotek. All defected LEDs must be reported to LG Innotek and are not to be disassembled or analyzed.
- The product information can be modified and upgraded without prior notice.

02/18 / V02 / F / lg/leuca77n50ku00_305nm_300mW

14

Germany & Other Countries
Laser Components GmbH
Tel: +49 8142 2864 - 0
Fax: +49 8142 2864 - 11
info@lasercomponents.com
www.lasercomponents.com

France
Laser Components S.A.S.
Tel: +33 1 39 59 52 25
Fax: +33 1 39 59 53 50
info@lasercomponents.fr
www.lasercomponents.fr

United Kingdom
Laser Components (UK) Ltd.
Tel: +44 1245 491 499
Fax: +44 1245 491 801
info@lasercomponents.co.uk
www.lasercomponents.co.uk

Nordic Countries
Laser Components Nordic AB
Tel: +46 31 703 71 73
Fax: +46 31 703 71 01
info@lasercomponents.se
www.lasercomponents.se

Weißlicht- Platine:

- Insgesamt 12 LEDs verbaut (je 6 vom LED-Typ der Cree® XLamp® XH Family [151]). Lötstelle als Schalter um beide LED-Typen gemeinsam oder getrennt zu betreiben.
- Bezeichnung: XHP50A-01-0000-0D0BJ20CB
- Bezeichnung: XHP50A-01-0000-0D0BJ20E2



CLD-AP147 REV 2E

Cree® XLamp® XH Family LEDs

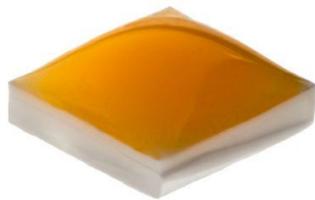


TABLE OF CONTENTS

Introduction 1

Bin and Order-Code Format..... 2

Performance Groups – Luminous Flux..... 2

Performance Groups – Chromaticity..... 3

Cree’s Standard White Chromaticity Regions Plotted on the 1931 CIE Curve..... 6

Cree’s Standard Cool White Kits Plotted on ANSI Standard Chromaticity Regions 8

Cree’s Standard Warm and Neutral White Kits Plotted on ANSI Standard Chromaticity Regions..... 9

Cree’s Standard Chromaticity Kits 11

Standard Order Codes and Bins

 XH-B ANSI Cool White..... 12

 XH-B Neutral White..... 12

 XH-B Warm White..... 13

 XH-G ANSI Cool White..... 14

 XH-G Neutral White 14

 XH-G Warm White..... 15

INTRODUCTION

This document describes the product nomenclature required to select and order Cree’s XLamp® XH Family LEDs. XLamp XH Family LEDs are tested and sorted into bins which are then combined into orderable kits identified by an order code.

All XLamp LEDs are tested and sorted by color and brightness into a unique bin. Each bin contains LEDs from only one color and brightness group and is uniquely identified by a bin code. White XLamp LEDs are sorted by chromaticity (color) and luminous flux (brightness). LEDs are shipped on reels containing LEDs from one bin and are always labeled with the appropriate bin code.

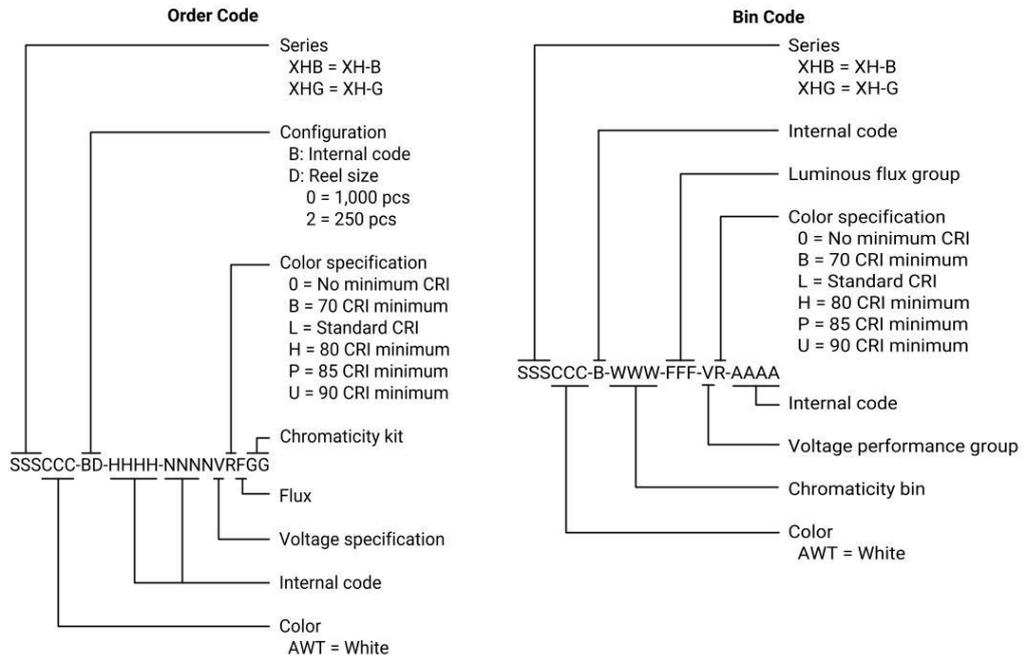
Kits contain LEDs from a number of similar bins and are fully defined by their order codes. A full explanation of the order codes for XLamp XH Family LEDs, as well as a list of standard order codes, is provided in this document.

WWW.CREE.COM/XLAMP



BIN AND ORDER-CODE FORMAT

Bin codes and order codes for XH Family White LEDs are configured in the following manner:



PERFORMANCE GROUPS – LUMINOUS FLUX (T_j = 25 °C)

XLamp XH Family White LEDs are tested for luminous flux and placed into one of the following luminous-flux groups. These group codes, with a 0 appended, are used in the Bin Code “Luminous flux group.”

Group Code	Min. Luminous Flux (lm)	Max. Luminous Flux (lm)
H0	18.1	23.5
J2	23.5	26.8
J3	26.8	30.6
K2	30.6	35.2
K3	35.2	39.8



PERFORMANCE GROUPS – CHROMATICITY

XLamp XH Family White LEDs are tested for luminous flux and placed into one of the following chromaticity groups. These group codes are used in the Bin Code "Chromaticity bin." Two-digit group codes are appended with a 0.

Region	x	y									
0A	0.2950	0.2970	0B	0.2920	0.3060	0C	0.2984	0.3133	0D	0.2984	0.3133
	0.2920	0.3060		0.2895	0.3135		0.2962	0.3220		0.3048	0.3207
	0.2984	0.3133		0.2962	0.3220		0.3028	0.3304		0.3068	0.3113
	0.3009	0.3042		0.2984	0.3133		0.3048	0.3207		0.3009	0.3042
0R	0.2980	0.2880	0S	0.2895	0.3135	0T	0.2962	0.3220	0U	0.3037	0.2937
	0.2950	0.2970		0.2870	0.3210		0.2937	0.3312		0.3009	0.3042
	0.3009	0.3042		0.2937	0.3312		0.3005	0.3415		0.3068	0.3113
	0.3037	0.2937		0.2962	0.3220		0.3028	0.3304		0.3093	0.2993
1A	0.3048	0.3207	1B	0.3028	0.3304	1C	0.3115	0.3391	1D	0.3130	0.3290
	0.3130	0.3290		0.3115	0.3391		0.3205	0.3481		0.3213	0.3373
	0.3144	0.3186		0.3130	0.3290		0.3213	0.3373		0.3221	0.3261
	0.3068	0.3113		0.3048	0.3207		0.3130	0.3290		0.3144	0.3186
1R	0.3068	0.3113	1S	0.3005	0.3415	1T	0.3099	0.3509	1U	0.3144	0.3186
	0.3144	0.3186		0.3099	0.3509		0.3196	0.3602		0.3221	0.3261
	0.3161	0.3059		0.3115	0.3391		0.3205	0.3481		0.3231	0.3120
	0.3093	0.2993		0.3028	0.3304		0.3115	0.3391		0.3161	0.3059
2A	0.3215	0.3350	2B	0.3207	0.3462	2C	0.3290	0.3538	2D	0.3290	0.3417
	0.3290	0.3417		0.3290	0.3538		0.3376	0.3616		0.3371	0.3490
	0.3290	0.3300		0.3290	0.3417		0.3371	0.3490		0.3366	0.3369
	0.3222	0.3243		0.3215	0.3350		0.3290	0.3417		0.3290	0.3300
2R	0.3222	0.3243	2S	0.3196	0.3602	2T	0.3290	0.3690	2U	0.3290	0.3300
	0.3290	0.3300		0.3290	0.3690		0.3381	0.3762		0.3366	0.3369
	0.3290	0.3180		0.3290	0.3538		0.3376	0.3616		0.3361	0.3245
	0.3231	0.3120		0.3207	0.3462		0.3290	0.3538		0.3290	0.3180
3A	0.3371	0.3490	3B	0.3376	0.3616	3C	0.3463	0.3687	3D	0.3451	0.3554
	0.3451	0.3554		0.3463	0.3687		0.3551	0.3760		0.3533	0.3620
	0.3440	0.3427		0.3451	0.3554		0.3533	0.3620		0.3515	0.3487
	0.3366	0.3369		0.3371	0.3490		0.3451	0.3554		0.3440	0.3427
3R	0.3366	0.3369	3S	0.3381	0.3762	3T	0.3480	0.3840	3U	0.3440	0.3428
	0.3440	0.3428		0.3480	0.3840		0.3571	0.3907		0.3515	0.3487
	0.3429	0.3307		0.3463	0.3687		0.3551	0.3760		0.3495	0.3339
	0.3361	0.3245		0.3376	0.3616		0.3463	0.3687		0.3429	0.3307
4A	0.3530	0.3597	4B	0.3548	0.3736	4C	0.3641	0.3804	4D	0.3615	0.3659
	0.3615	0.3659		0.3641	0.3804		0.3736	0.3874		0.3702	0.3722
	0.3590	0.3521		0.3615	0.3659		0.3702	0.3722		0.3670	0.3578
	0.3512	0.3465		0.3530	0.3597		0.3615	0.3659		0.3590	0.3521

Copyright © 2013-2015 Cree, Inc. All rights reserved. The information in this document is subject to change without notice. Cree®, the Cree logo and XLamp® are registered trademarks of Cree, Inc. This document is provided for informational purposes only and is not a warranty or a specification. For product specifications, please see the data sheets available at www.cree.com.



XLAMP® XH FAMILY LED BINNING & LABELING

PERFORMANCE GROUPS – CHROMATICITY (CONTINUED)

Region	x	y									
5A1	0.3670	0.3578	5A2	0.3686	0.3649	5A3	0.3744	0.3685	5A4	0.3726	0.3612
	0.3686	0.3649		0.3702	0.3722		0.3763	0.3760		0.3744	0.3685
	0.3744	0.3685		0.3763	0.3760		0.3825	0.3798		0.3804	0.3721
	0.3726	0.3612		0.3744	0.3685		0.3804	0.3721		0.3783	0.3646
5B1	0.3702	0.3722	5B2	0.3719	0.3797	5B3	0.3782	0.3837	5B4	0.3763	0.3760
	0.3719	0.3797		0.3736	0.3874		0.3802	0.3916		0.3782	0.3837
	0.3782	0.3837		0.3802	0.3916		0.3869	0.3958		0.3847	0.3877
	0.3763	0.3760		0.3782	0.3837		0.3847	0.3877		0.3825	0.3798
5C1	0.3825	0.3798	5C2	0.3847	0.3877	5C3	0.3912	0.3917	5C4	0.3887	0.3836
	0.3847	0.3877		0.3869	0.3958		0.3937	0.4001		0.3912	0.3917
	0.3912	0.3917		0.3937	0.4001		0.4006	0.4044		0.3978	0.3958
	0.3887	0.3836		0.3912	0.3917		0.3978	0.3958		0.3950	0.3875
5D1	0.3783	0.3646	5D2	0.3804	0.3721	5D3	0.3863	0.3758	5D4	0.3840	0.3681
	0.3804	0.3721		0.3825	0.3798		0.3887	0.3836		0.3863	0.3758
	0.3863	0.3758		0.3887	0.3836		0.3950	0.3875		0.3924	0.3794
	0.3840	0.3681		0.3863	0.3758		0.3924	0.3794		0.3898	0.3716
6A1	0.3889	0.3690	6A2	0.3915	0.3768	6A3	0.3981	0.3800	6A4	0.3953	0.3720
	0.3915	0.3768		0.3941	0.3848		0.4010	0.3882		0.3981	0.3800
	0.3981	0.3800		0.4010	0.3882		0.4080	0.3916		0.4048	0.3832
	0.3953	0.3720		0.3981	0.3800		0.4048	0.3832		0.4017	0.3751
6B1	0.3941	0.3848	6B2	0.3968	0.3930	6B3	0.4040	0.3966	6B4	0.4010	0.3882
	0.3968	0.3930		0.3996	0.4015		0.4071	0.4052		0.4040	0.3966
	0.4040	0.3966		0.4071	0.4052		0.4146	0.4089		0.4113	0.4001
	0.4010	0.3882		0.4040	0.3966		0.4113	0.4001		0.4080	0.3916
6C1	0.4080	0.3916	6C2	0.4113	0.4001	6C3	0.4186	0.4037	6C4	0.4150	0.3950
	0.4113	0.4001		0.4146	0.4089		0.4222	0.4127		0.4186	0.4037
	0.4186	0.4037		0.4222	0.4127		0.4299	0.4165		0.4259	0.4073
	0.4150	0.3950		0.4186	0.4037		0.4259	0.4073		0.4221	0.3984
6D1	0.4017	0.3751	6D2	0.4048	0.3832	6D3	0.4116	0.3865	6D4	0.4082	0.3782
	0.4048	0.3832		0.4080	0.3916		0.4150	0.3950		0.4116	0.3865
	0.4116	0.3865		0.4150	0.3950		0.4221	0.3984		0.4183	0.3898
	0.4082	0.3782		0.4116	0.3865		0.4183	0.3898		0.4147	0.3814
7A1	0.4147	0.3814	7A2	0.4183	0.3898	7A3	0.4242	0.3919	7A4	0.4203	0.3833
	0.4183	0.3898		0.4221	0.3984		0.4281	0.4006		0.4242	0.3919
	0.4242	0.3919		0.4281	0.4006		0.4342	0.4028		0.4300	0.3939
	0.4203	0.3833		0.4242	0.3919		0.4300	0.3939		0.4259	0.3853
7B1	0.4221	0.3984	7B2	0.4259	0.4073	7B3	0.4322	0.4096	7B4	0.4281	0.4006
	0.4259	0.4073		0.4299	0.4165		0.4364	0.4188		0.4322	0.4096
	0.4322	0.4096		0.4364	0.4188		0.4430	0.4212		0.4385	0.4119
	0.4281	0.4006		0.4322	0.4096		0.4385	0.4119		0.4342	0.4028

Copyright © 2013-2015 Cree, Inc. All rights reserved. The information in this document is subject to change without notice. Cree®, the Cree logo and XLamp® are registered trademarks of Cree, Inc. This document is provided for informational purposes only and is not a warranty or a specification. For product specifications, please see the data sheets available at www.cree.com.



PERFORMANCE GROUPS – CHROMATICITY (CONTINUED)

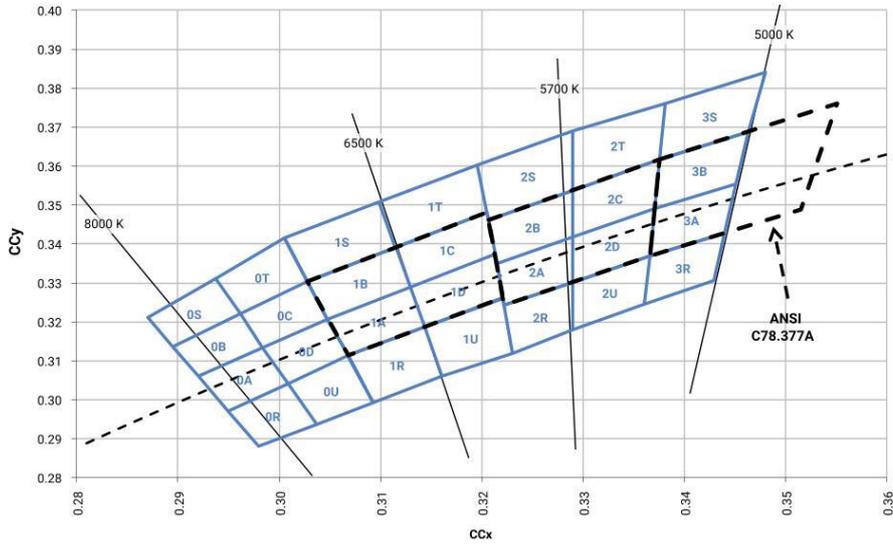
Region	x	y									
7C1	0.4342	0.4028	7C2	0.4385	0.4119	7C3	0.4449	0.4141	7C4	0.4403	0.4049
	0.4385	0.4119		0.4430	0.4212		0.4496	0.4236		0.4449	0.4141
	0.4449	0.4141		0.4496	0.4236		0.4562	0.4260		0.4513	0.4164
	0.4403	0.4049		0.4449	0.4141		0.4513	0.4164		0.4465	0.4071
7D1	0.4259	0.3853	7D2	0.4300	0.3939	7D3	0.4359	0.3960	7D4	0.4316	0.3873
	0.4300	0.3939		0.4342	0.4028		0.4403	0.4049		0.4359	0.3960
	0.4359	0.3960		0.4403	0.4049		0.4465	0.4071		0.4418	0.3981
	0.4316	0.3873		0.4359	0.3960		0.4418	0.3981		0.4373	0.3893
8A1	0.4373	0.3893	8A2	0.4418	0.3981	8A3	0.4475	0.3994	8A4	0.4428	0.3906
	0.4418	0.3981		0.4465	0.4071		0.4523	0.4085		0.4475	0.3994
	0.4475	0.3994		0.4523	0.4085		0.4582	0.4099		0.4532	0.4008
	0.4428	0.3906		0.4475	0.3994		0.4532	0.4008		0.4483	0.3919
8B1	0.4465	0.4071	8B2	0.4513	0.4164	8B3	0.4573	0.4178	8B4	0.4523	0.4085
	0.4513	0.4164		0.4562	0.4260		0.4624	0.4274		0.4573	0.4178
	0.4573	0.4178		0.4624	0.4274		0.4687	0.4289		0.4634	0.4193
	0.4523	0.4085		0.4573	0.4178		0.4634	0.4193		0.4582	0.4099
8C1	0.4582	0.4099	8C2	0.4634	0.4193	8C3	0.4695	0.4207	8C4	0.4641	0.4112
	0.4634	0.4193		0.4687	0.4289		0.4750	0.4304		0.4695	0.4207
	0.4695	0.4207		0.4750	0.4304		0.4813	0.4319		0.4756	0.4221
	0.4641	0.4112		0.4695	0.4207		0.4756	0.4221		0.4700	0.4126
8D1	0.4483	0.3919	8D2	0.4532	0.4008	8D3	0.4589	0.4021	8D4	0.4538	0.3931
	0.4532	0.4008		0.4582	0.4099		0.4641	0.4112		0.4589	0.4021
	0.4589	0.4021		0.4641	0.4112		0.4700	0.4126		0.4646	0.4034
	0.4538	0.3931		0.4589	0.4021		0.4646	0.4034		0.4593	0.3944
AA1	0.4822	0.3973	AA2	0.4884	0.4067	AA3	0.4942	0.4066	AA4	0.4879	0.3972
	0.4884	0.4067		0.4946	0.4162		0.5006	0.4160		0.4942	0.4066
	0.4942	0.4066		0.5006	0.4160		0.5066	0.4158		0.5001	0.4064
	0.4879	0.3972		0.4942	0.4066		0.5001	0.4064		0.4936	0.3970
AB1	0.4946	0.4162	AB2	0.5008	0.4256	AB3	0.5069	0.4254	AB4	0.5006	0.4160
	0.5008	0.4256		0.5070	0.4350		0.5133	0.4348		0.5069	0.4254
	0.5069	0.4254		0.5133	0.4348		0.5196	0.4346		0.5131	0.4252
	0.5006	0.4160		0.5069	0.4254		0.5131	0.4252		0.5066	0.4158
AC1	0.5066	0.4067	AC2	0.5131	0.4252	AC3	0.5192	0.4250	AC4	0.5126	0.4156
	0.5131	0.4162		0.5196	0.4346		0.5258	0.4343		0.5192	0.4250
	0.5192	0.4160		0.5258	0.4343		0.5321	0.4341		0.5253	0.4248
	0.5126	0.4066		0.5192	0.4250		0.5253	0.4248		0.5186	0.4154
AD1	0.4936	0.3970	AD2	0.5001	0.4064	AD3	0.5059	0.4062	AD4	0.4993	0.3969
	0.5001	0.4064		0.5066	0.4158		0.5126	0.4156		0.5059	0.4062
	0.5059	0.4062		0.5126	0.4156		0.5186	0.4154		0.5118	0.4061
	0.4993	0.3969		0.5059	0.4062		0.5118	0.4061		0.5050	0.3967

Copyright © 2013-2015 Cree, Inc. All rights reserved. The information in this document is subject to change without notice. Cree®, the Cree logo and XLamp® are registered trademarks of Cree, Inc. This document is provided for informational purposes only and is not a warranty or a specification. For product specifications, please see the data sheets available at www.cree.com.

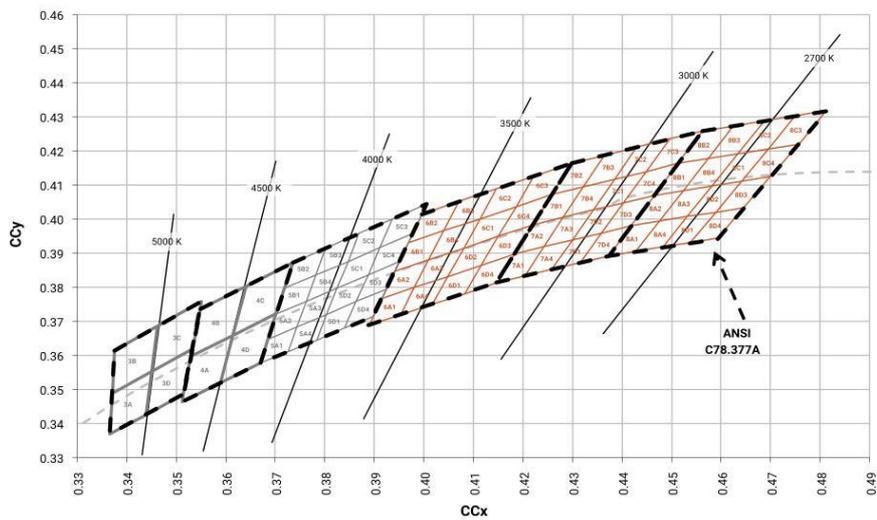


CREE'S STANDARD WHITE CHROMATICITY REGIONS PLOTTED ON THE 1931 CIE CURVE

ANSI Cool White



ANSI Neutral White and ANSI Warm White

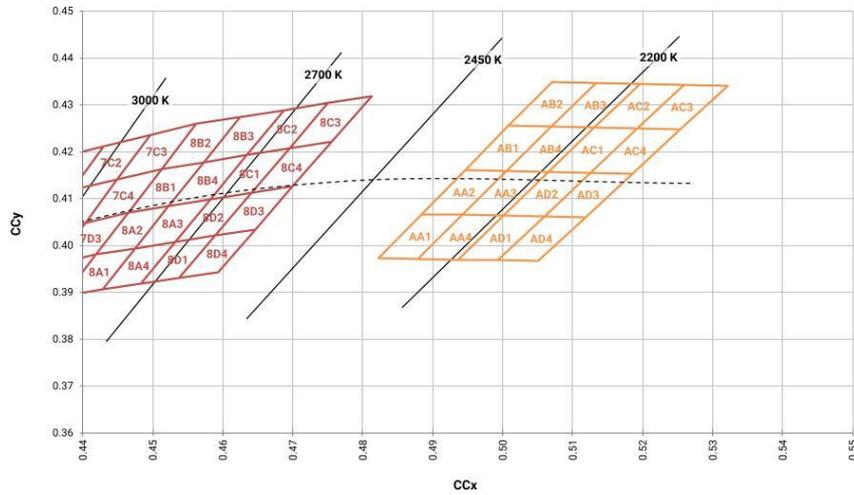


Copyright © 2013-2015 Cree, Inc. All rights reserved. The information in this document is subject to change without notice. Cree®, the Cree logo and XLamp® are registered trademarks of Cree, Inc. This document is provided for informational purposes only and is not a warranty or a specification. For product specifications, please see the data sheets available at www.cree.com.



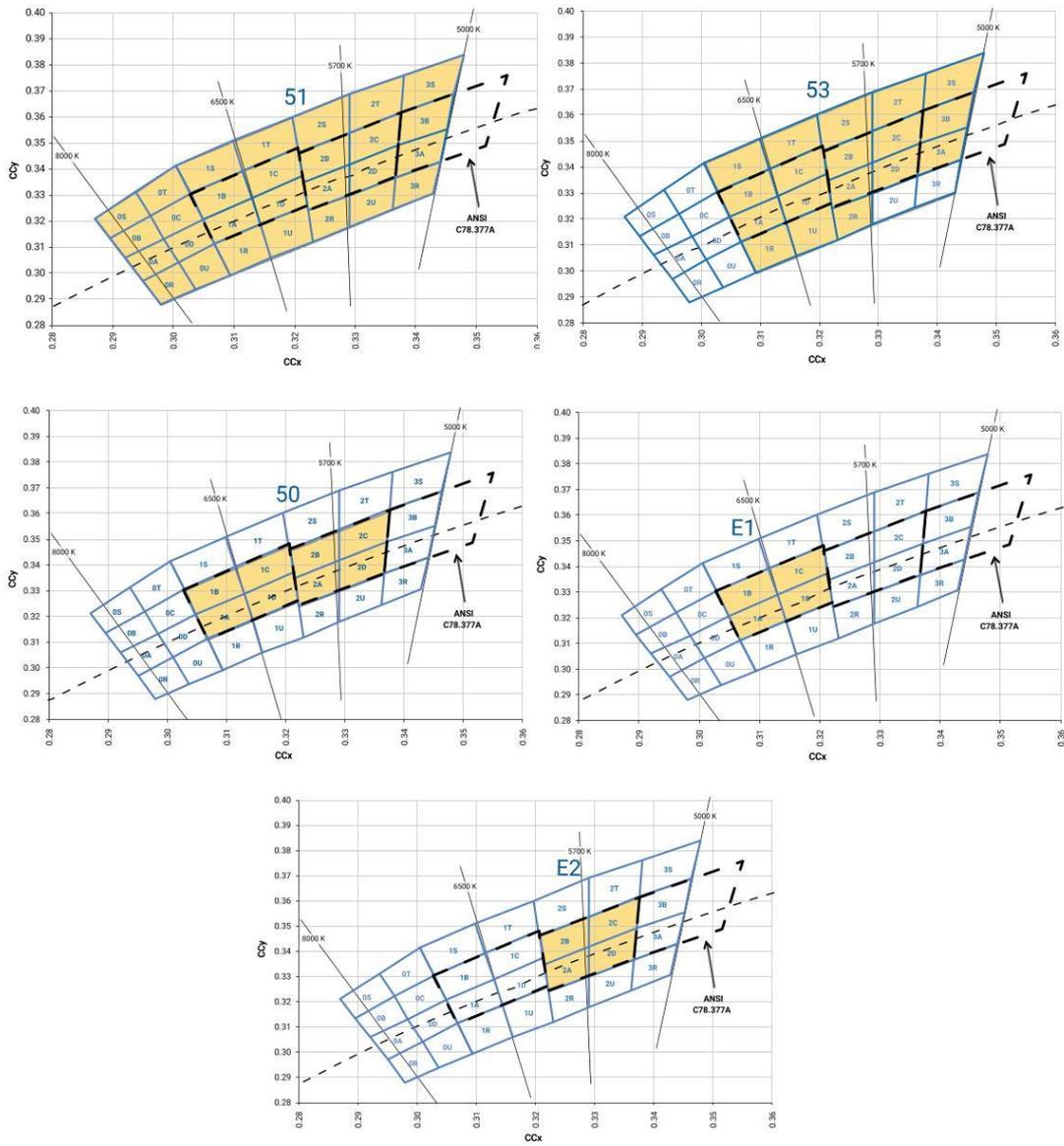
CREE'S STANDARD WHITE CHROMATICITY REGIONS PLOTTED ON THE 1931 CIE CURVE - CONTINUED

ANSI Neutral White and ANSI Warm White - Continued





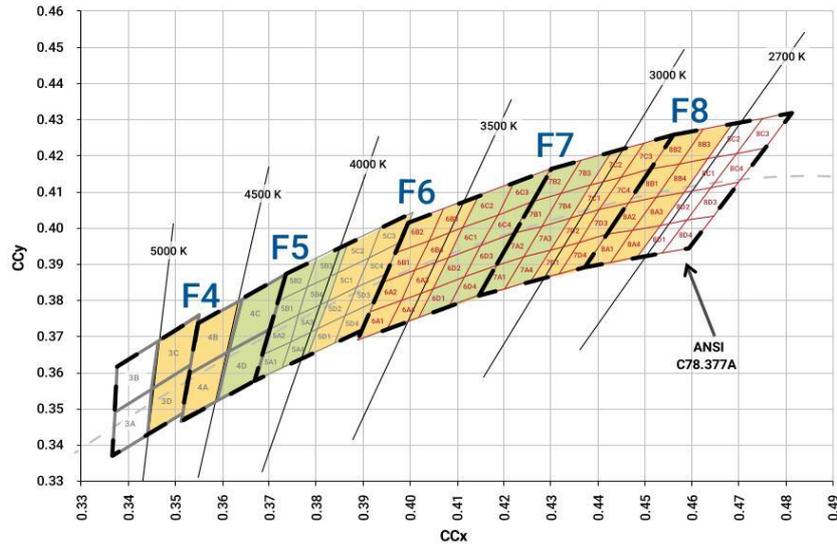
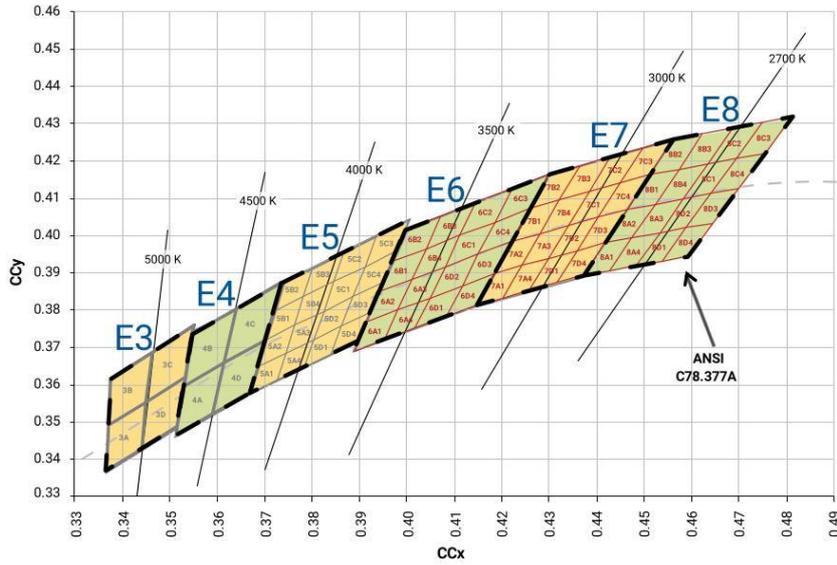
CREE'S STANDARD COOL WHITE KITS PLOTTED ON ANSI STANDARD CHROMATICITY REGIONS



Copyright © 2013-2015 Cree, Inc. All rights reserved. The information in this document is subject to change without notice. Cree®, the Cree logo and XLamp® are registered trademarks of Cree, Inc. This document is provided for informational purposes only and is not a warranty or a specification. For product specifications, please see the data sheets available at www.cree.com.



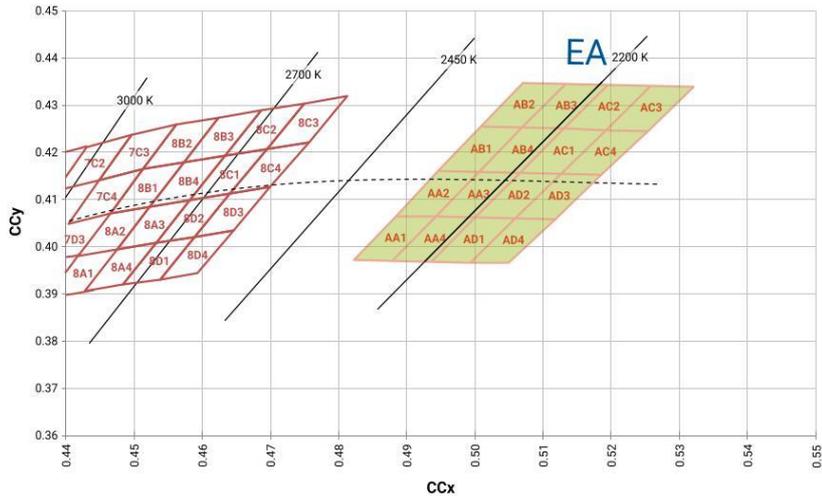
CREE'S STANDARD WARM AND NEUTRAL WHITE KITS PLOTTED ON ANSI STANDARD CHROMATICITY REGIONS



Copyright © 2013-2015 Cree, Inc. All rights reserved. The information in this document is subject to change without notice. Cree®, the Cree logo and XLamp® are registered trademarks of Cree, Inc. This document is provided for informational purposes only and is not a warranty or a specification. For product specifications, please see the data sheets available at www.cree.com.



CREE'S STANDARD WARM AND NEUTRAL WHITE KITS PLOTTED ON ANSI STANDARD CHROMATICITY REGIONS - CONTINUED





CREE'S STANDARD CHROMATICITY KITS

The following table provides the chromaticity bins associated with chromaticity kits.

Color	CCT	Kit	Chromaticity Bins
Cool White	6200 K	51	0A, 0B, 0C, 0D, 0R, 0S, 0T, 0U, 1A, 1B, 1C, 1D, 1R, 1S, 1T, 1U, 2A, 2B, 2C, 2D, 2R, 2S, 2T, 2U, 3A, 3B, 3R, 3S
	6000 K	53	1A, 1B, 1C, 1D, 1R, 1S, 1T, 1U, 2A, 2B, 2C, 2D, 2R, 2S, 2T, 3A, 3B, 3S
	6200 K	50	1A, 1B, 1C, 1D, 2A, 2B, 2C, 2D
	6500 K	E1	1A, 1B, 1C, 1D
	5700 K	E2	2A, 2B, 2C, 2D
Neutral White	5000 K	E3	3A, 3B, 3C, 3D
	4750 K	F4	3C, 3D, 4A, 4B
	4500 K	E4	4A, 4B, 4C, 4D
	4250 K	F5	4C, 4D, 5A1, 5A2, 5A3, 5A4, 5B1, 5B2, 5B3, 5B4
	4000 K	E5	5A1, 5A2, 5A3, 5A4, 5B1, 5B2, 5B3, 5B4, 5C1, 5C2, 5C3, 5C4, 5D1, 5D2, 5D3, 5D4
Warm White	3750 K	F6	5C1, 5C2, 5C3, 5C4, 5D1, 5D2, 5D3, 5D4, 6A1, 6A2, 6A3, 6A4, 6B1, 6B2, 6B3, 6B4
	3500 K	E6	6A1, 6A2, 6A3, 6A4, 6B1, 6B2, 6B3, 6B4, 6C1, 6C2, 6C3, 6C4, 6D1, 6D2, 6D3, 6D4
	3250 K	F7	6C1, 6C2, 6C3, 6C4, 6D1, 6D2, 6D3, 6D4, 7A1, 7A2, 7A3, 7A4, 7B1, 7B2, 7B3, 7B4
	3000 K	E7	7A1, 7A2, 7A3, 7A4, 7B1, 7B2, 7B3, 7B4, 7C1, 7C2, 7C3, 7C4, 7D1, 7D2, 7D3, 7D4
	2850 K	F8	7C1, 7C2, 7C3, 7C4, 7D1, 7D2, 7D3, 7D4, 8A1, 8A2, 8A3, 8A4, 8B1, 8B2, 8B3, 8B4
	2700 K	E8	8A1, 8A2, 8A3, 8A4, 8B1, 8B2, 8B3, 8B4, 8C1, 8C2, 8C3, 8C4, 8D1, 8D2, 8D3, 8D4
	2200 K	EA	AA1, AA2, AA3, AA4, AB1, AB2, AB3, AB4, AC1, AC2, AC3, AC4, AD1, AD2, AD3, AD4

The following tables of order codes list flux minimums and chromaticity regions for the various categories of XLamp XH LEDs. For other flux and chromaticity combinations, contact Cree or an authorized distributor.



STANDARD ORDER CODES AND BINS (XH-B ANSI COOL WHITE, T_j = 25 °C)

XLamp XH-B LED Standard Kit Codes - White						
Chromaticity		Minimum Luminous Flux (lm) @ 65 mA		Order Codes		
Kit	CCT	Code	Flux (lm)	No Minimum CRI	70 CRI Minimum	80 CRI Minimum
ANSI Cool White (5000 K – 8300 K)						
E1	6500 K	J3	26.8	XHBAWT-00-0000-00000LXE1	XHBAWT-00-0000-00000BXE1	XHBAWT-00-0000-00000HXE1
		J2	23.5			XHBAWT-00-0000-00000HWE1
50	6000 K	J3	26.8	XHBAWT-00-0000-00000LX50	XHBAWT-00-0000-00000BX50	XHBAWT-00-0000-00000HX50
		J2	23.5			XHBAWT-00-0000-00000HW50
51	6000 K	J3	26.8	XHBAWT-00-0000-00000LX51	XHBAWT-00-0000-00000BX51	XHBAWT-00-0000-00000HX51
		J2	23.5			XHBAWT-00-0000-00000HW51
53	5700 K	J3	26.8	XHBAWT-00-0000-00000LX53	XHBAWT-00-0000-00000BX53	XHBAWT-00-0000-00000HX53
		J2	23.5			XHBAWT-00-0000-00000HW53
E2	5700 K	J3	26.8	XHBAWT-00-0000-00000LXE2	XHBAWT-00-0000-00000BXE2	XHBAWT-00-0000-00000HXE2
		J2	23.5			XHBAWT-00-0000-00000HWE2

STANDARD ORDER CODES AND BINS (XH-B NEUTRAL WHITE, T_j = 25 °C)

XLamp XH-B LED Standard Kit Codes - White						
Chromaticity		Minimum Luminous Flux (lm) @ 65 mA		Order Codes		
Kit	CCT	Code	Flux (lm)	70 CRI Minimum	75 CRI Typical	80 CRI Minimum
ANSI Neutral White (3700 K – 5000 K)						
E3	5000 K	J3	26.8	XHBAWT-00-0000-00000BXE3	XHBAWT-00-0000-00000LXE3	XHBAWT-00-0000-00000HXE3
		J2	23.5			XHBAWT-00-0000-00000HWE3
F4	4750 K	J3	26.8	XHBAWT-00-0000-00000BXF4	XHBAWT-00-0000-00000LXF4	XHBAWT-00-0000-00000HXF4
		J2	23.5			XHBAWT-00-0000-00000HWF4
E4	4500 K	J3	26.8	XHBAWT-00-0000-00000BXE4	XHBAWT-00-0000-00000LXE4	XHBAWT-00-0000-00000HXE4
		J2	23.5			XHBAWT-00-0000-00000HWE4
F5	4300 K	J3	26.8	XHBAWT-00-0000-00000BXF5	XHBAWT-00-0000-00000LXF5	XHBAWT-00-0000-00000HXF5
		J2	23.5		XHBAWT-00-0000-00000LWF5	XHBAWT-00-0000-00000HWF5
E5	4000 K	J3	26.8	XHBAWT-00-0000-00000BXE5	XHBAWT-00-0000-00000LXE5	XHBAWT-00-0000-00000HXE5
		J2	23.5	XHBAWT-00-0000-00000BWE5	XHBAWT-00-0000-00000LWE5	XHBAWT-00-0000-00000HWE5

Notes:

- Cree maintains a tolerance of ±7% on flux and power measurements, ±0.005 on chromaticity (CCx, CCy) measurements and ±2 on CRI measurements.
- Cree XLamp XH Family LED order codes specify only a minimum flux bin and not a maximum. Cree may ship reels in flux bins higher than the minimum specified by the order code without advance notice. Shipments will always adhere to the chromaticity or DWL bin restrictions specified by the order code.

Copyright © 2013-2015 Cree, Inc. All rights reserved. The information in this document is subject to change without notice. Cree®, the Cree logo and XLamp® are registered trademarks of Cree, Inc. This document is provided for informational purposes only and is not a warranty or a specification. For product specifications, please see the data sheets available at www.cree.com.



STANDARD ORDER CODES AND BINS (XH-B WARM WHITE, T_j = 25 °C)

XLamp XH-B LED Standard Kit Codes - White								
Chromaticity		Minimum Luminous Flux (lm) @ 65 mA		Order Codes				
Kit	CCT	Code	Flux (lm)	70 CRI Minimum	80 CRI Typical	80 CRI Minimum	85 CRI Minimum	90 CRI Minimum
ANSI Warm White (2700 K - 3700 K)								
F6	3700 K	J3	26.8	XHBAWT-00-0000-00000BXF6				
		J2	23.5	XHBAWT-00-0000-00000BWF6	XHBAWT-00-0000-00000LWF6	XHBAWT-00-0000-00000HWF6		
E6	3500 K	J3	26.8	XHBAWT-00-0000-00000BXE6				
		J2	23.5	XHBAWT-00-0000-00000BWE6	XHBAWT-00-0000-00000LWE6	XHBAWT-00-0000-00000HWE6		
F7	3200 K	J3	26.8	XHBAWT-00-0000-00000BXF7				
		J2	23.5	XHBAWT-00-0000-00000BWF7	XHBAWT-00-0000-00000LWF7	XHBAWT-00-0000-00000HWF7		
		H0	18.1				XHBAWT-00-0000-00000PVF7	XHBAWT-00-0000-00000LVF7
E7	3000 K	J3	26.8	XHBAWT-00-0000-00000BXE7				
		J2	23.5	XHBAWT-00-0000-00000BWE7	XHBAWT-00-0000-00000LWE7	XHBAWT-00-0000-00000HWE7		
		H0	18.1				XHBAWT-00-0000-00000PVE7	XHBAWT-00-0000-00000LVE7
F8	2850 K	J2	23.5	XHBAWT-00-0000-00000BWF8	XHBAWT-00-0000-00000LWF8	XHBAWT-00-0000-00000HWF8		
		H0	18.1				XHBAWT-00-0000-00000PVF8	XHBAWT-00-0000-00000LVF8
E8	2700 K	J2	23.5	XHBAWT-00-0000-00000BWE8	XHBAWT-00-0000-00000LWE8	XHBAWT-00-0000-00000HWE8		
		H0	18.1				XHBAWT-00-0000-00000PVE8	XHBAWT-00-0000-00000LVE8

Notes:

- Cree maintains a tolerance of ±7% on flux and power measurements, ±0.005 on chromaticity (CCx, CCy) measurements and ±2 on CRI measurements.
- Cree XLamp XH Family LED order codes specify only a minimum flux bin and not a maximum. Cree may ship reels in flux bins higher than the minimum specified by the order code without advance notice. Shipments will always adhere to the chromaticity or DWL bin restrictions specified by the order code.



STANDARD ORDER CODES AND BINS (XH-G ANSI COOL WHITE, T_j = 25 °C)

XLamp XH-G LED Standard Kit Codes - White						
Chromaticity		Minimum Luminous Flux (lm) @ 65 mA		Order Codes		
Kit	CCT	Code	Flux (lm)	No Minimum CRI	70 CRI Minimum	80 CRI Minimum
ANSI Cool White (5000 K – 8300 K)						
E1	6500 K	K2	30.6	XHGAWT-00-0000-00000L0E1	XHGAWT-00-0000-00000B0E1	
		J3	26.8	XHGAWT-00-0000-00000LXE1	XHGAWT-00-0000-00000BXE1	XHGAWT-00-0000-00000HXE1
50	6000 K	K2	30.6	XHGAWT-00-0000-00000L050	XHGAWT-00-0000-00000B050	
		J3	26.8	XHGAWT-00-0000-00000LX50	XHGAWT-00-0000-00000BX50	XHGAWT-00-0000-00000HX50
51	6000 K	K2	30.6	XHGAWT-00-0000-00000L051	XHGAWT-00-0000-00000B051	
		J3	26.8	XHGAWT-00-0000-00000LX51	XHGAWT-00-0000-00000BX51	XHGAWT-00-0000-00000HX51
53	5700 K	K2	30.6	XHGAWT-00-0000-00000L053	XHGAWT-00-0000-00000B053	
		J3	26.8	XHGAWT-00-0000-00000LX53	XHGAWT-00-0000-00000BX53	XHGAWT-00-0000-00000HX53
E2	5700 K	K2	30.6	XHGAWT-00-0000-00000L0E2	XHGAWT-00-0000-00000B0E2	
		J3	26.8	XHGAWT-00-0000-00000LXE2	XHGAWT-00-0000-00000BXE2	XHGAWT-00-0000-00000HXE2

STANDARD ORDER CODES AND BINS (XH-G NEUTRAL WHITE, T_j = 25 °C)

XLamp XH-G LED Standard Kit Codes - White						
Chromaticity		Minimum Luminous Flux (lm) @ 65 mA		Order Codes		
Kit	CCT	Code	Flux (lm)	70 CRI Minimum	75 CRI Typical	80 CRI Minimum
ANSI Neutral White (3700 K – 5000 K)						
E3	5000 K	K2	30.6	XHGAWT-00-0000-00000B0E3	XHGAWT-00-0000-00000L0E3	
		J3	26.8	XHGAWT-00-0000-00000BXE3	XHGAWT-00-0000-00000LXE3	XHGAWT-00-0000-00000HXE3
F4	4750 K	K2	30.6	XHGAWT-00-0000-00000B0F4		
		J3	26.8	XHGAWT-00-0000-00000BXF4	XHGAWT-00-0000-00000LXF4	XHGAWT-00-0000-00000HXF4
E4	4500 K	K2	30.6	XHGAWT-00-0000-00000B0E4		
		J3	26.8	XHGAWT-00-0000-00000BXE4	XHGAWT-00-0000-00000LXE4	XHGAWT-00-0000-00000HXE4
F5	4300 K	K2	30.6	XHGAWT-00-0000-00000B0F5		
		J3	26.8	XHGAWT-00-0000-00000BXF5	XHGAWT-00-0000-00000LXF5	XHGAWT-00-0000-00000HXF5
E5	4000 K	K2	30.6	XHGAWT-00-0000-00000B0E5		XHGAWT-00-0000-00000H0E5
		J3	26.8	XHGAWT-00-0000-00000BXE5	XHGAWT-00-0000-00000LXE5	XHGAWT-00-0000-00000HXE5

Notes:

- Cree maintains a tolerance of ±7% on flux and power measurements, ±0.005 on chromaticity (CCx, CCy) measurements and ±2 on CRI measurements.
- Cree XLamp XH Family LED order codes specify only a minimum flux bin and not a maximum. Cree may ship reels in flux bins higher than the minimum specified by the order code without advance notice. Shipments will always adhere to the chromaticity or DWL bin restrictions specified by the order code.



STANDARD ORDER CODES AND BINS (XH-G WARM WHITE, T_J = 25 °C)

XLamp XH-B LED Standard Kit Codes - White								
Chromaticity		Minimum Luminous Flux (lm) @ 65 mA		Order Codes				
Kit	CCT	Code	Flux (lm)	70 CRI Minimum	80 CRI Typical	80 CRI Minimum	85 CRI Minimum	90 CRI Minimum
ANSI Warm White (2700 K - 3700 K)								
F6	3700 K	J3	26.8	XHGAWT-00-0000-00000BXF6	XHGAWT-00-0000-00000LXF6	XHGAWT-00-0000-00000HXF6		
E6	3500 K	J3	26.8	XHGAWT-00-0000-00000BXE6	XHGAWT-00-0000-00000LXE6	XHGAWT-00-0000-00000HXE6		
F7	3200 K	J3	26.8	XHGAWT-00-0000-00000BXF7	XHGAWT-00-0000-00000LXF7	XHGAWT-00-0000-00000HXF7		
		J2	23.5			XHGAWT-00-0000-00000HWF7		
		H0	18.1				XHGAWT-00-0000-00000PVF7	XHGAWT-00-0000-00000UVF7
E7	3000 K	J3	26.8	XHGAWT-00-0000-00000BXE7	XHGAWT-00-0000-00000LXE7	XHGAWT-00-0000-00000HXE7		
		J2	23.5			XHGAWT-00-0000-00000HWE7		
		H0	18.1				XHGAWT-00-0000-00000PVE7	XHGAWT-00-0000-00000UVE7
F8	2850 K	J3	26.8	XHGAWT-00-0000-00000BXF8	XHGAWT-00-0000-00000LXF8	XHGAWT-00-0000-00000HXF8		
		J2	23.5		XHGAWT-00-0000-00000LWF8	XHGAWT-00-0000-00000HWF8		
		H0	18.1				XHGAWT-00-0000-00000PVF8	XHGAWT-00-0000-00000UVF8
E8	2700 K	J3	26.8	XHGAWT-00-0000-00000BXE8	XHGAWT-00-0000-00000LXE8	XHGAWT-00-0000-00000HXE8		
		J2	23.5		XHGAWT-00-0000-00000LWE8	XHGAWT-00-0000-00000HWE8		
		H0	18.1				XHGAWT-00-0000-00000PVE8	XHGAWT-00-0000-00000UVE8

Notes:

- Cree maintains a tolerance of ±7% on flux and power measurements, ±0.005 on chromaticity (CCx, CCy) measurements and ±2 on CRI measurements.
- Cree XLamp XH Family LED order codes specify only a minimum flux bin and not a maximum. Cree may ship reels in flux bins higher than the minimum specified by the order code without advance notice. Shipments will always adhere to the chromaticity or DWL bin restrictions specified by the order code.

Platine für den IR-Spektralbereich:

- Insgesamt 22 LEDs des Typs Lms17LED der Firma LED Microsensor NT LLC mit einer Wellenlänge von 1700 nm verbaut [152].



Near-Infrared (NIR) Light-Emitting Diode

1.70 - 1.76 μm

Lms17LED series

Device parameters	Symbol	Value	Units
Operating/ storage temperature	T_{stg}	-60..+90*	$^{\circ}\text{C}$
Soldering temperature (can be applied for not more than 5 secs)	T_{sol}	+180	$^{\circ}\text{C}$

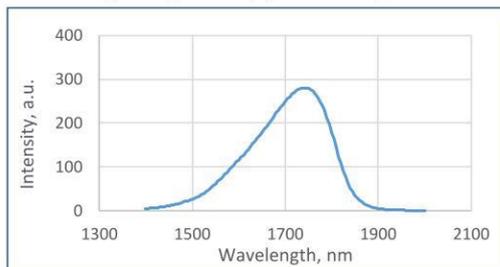
*Temperature range may vary for different packaging types.

All parameters refer to LEDs in TO18 package with a cavity and operation at ambient temperature 25 $^{\circ}\text{C}$ unless otherwise stated.

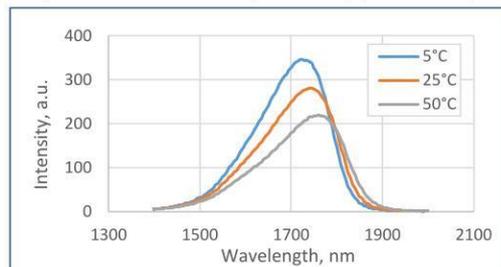


LED parameters	Conditions	Symbol	Value	Units
Peak emission wavelength ¹	qCW mode ³ $I = 25 \text{ mA}$	λ_p	1.70 - 1.76	μm
FWHM of the emission band ¹	qCW mode ³ $I = 25 \text{ mA}$	FWHM	160 - 220	nm
Average optical power (minimal / typical) ¹	qCW mode ³ $I = 200 \text{ mA}$	P_{qCW}	min 5 / typ 7	mW
Peak optical power (minimal / typical) ²	Pulse mode ⁴ $I = 1 \text{ A}$	P_{pul}	min 15 / typ 17	mW
Maximum operating current	qCW mode ³	I_{qCW}	200	mA
	Pulse mode ⁴	I_{pul}	1	A
	DC mode ⁵	I_{DC}	100	mA
Forward voltage ¹	qCW mode ³ $I = 200 \text{ mA}$	V	0.7 - 1.1	V

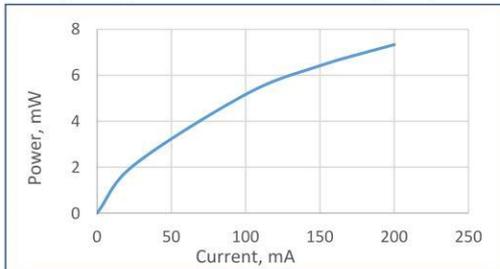
Typical spectrum (qCW³, 25 mA)



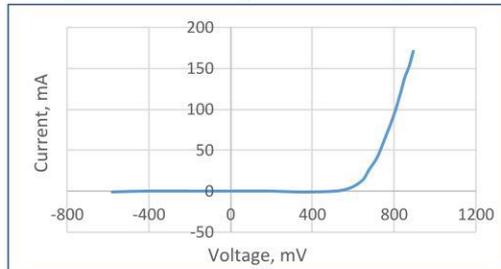
Spectra at different temperatures (qCW³, 25 mA)



Typical optical power characteristic (qCW³)



Typical current-voltage characteristic (qCW³)



¹ Parameter tested for each device.

² Parameter tested for representative sampling.

³ qCW mode: repetition rate: 0.5 KHz, pulse duration: 1 ms, duty cycle: 50%.

⁴ Pulse mode: repetition rate: 0.5 KHz, pulse duration: 20 μs , duty cycle: 1%.

⁵ DC mode: direct current.

Rev.011216 The design and specification of the product can be changed by LED Microsensor NT LLC. without notice

HEAD OFFICE LED Microsensor NT, LLC and RnD CENTRE Microsensor Technology, LLC
10, A, Kurchatova str., 1N, St-Petersburg, 194223, Russia; info@lmsnt.com; www.lmsnt.com

page 1 (8)



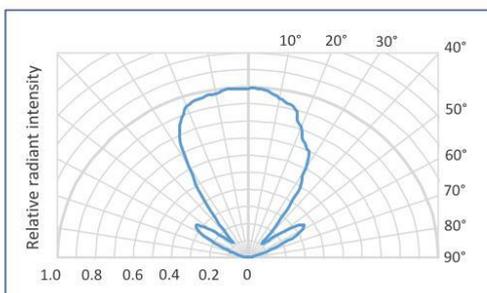
Near-Infrared (NIR) Light-Emitting Diode

1.70 - 1.76 μm

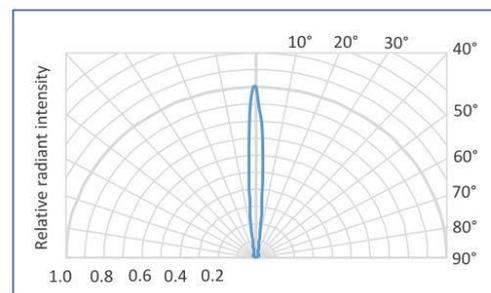
Packages	Model
TO-18 with a cap with a glass window	Lms17LED
TO-18 with a parabolic reflector without a glass window	Lms17LED-R
TO-18 with a parabolic reflector with a glass window	Lms17LED-RW
TO-5 with a built-in thermocooler and thermoresistor, covered by a cap with a glass window	Lms17LED-TEM
TO-5 with a built-in thermocooler and thermoresistor, covered by a parabolic reflector with a glass window	Lms17LED-TEM-R

Radiant characteristics (far-field pattern)

TO-18 package with a cap



TO-18 package with a parabolic reflector



Related products:

- **Photodiodes Lms24PD, Lms25PD series** - detectors of mid-infrared radiation;
- **LED drivers (D-41i, D-51i, minidrivers mD-1c, mD-1p)** - provide LED power supply in pulse modes.

Rev.011216 The design and specification of the product can be changed by LED Microsensor NT LLC. without notice

HEAD OFFICE LED Microsensor NT, LLC and RnD CENTRE Microsensor Technology, LLC
10, A, Kurchatova str., 1N, St-Petersburg, 194223, Russia; info@lmsnt.com; www.lmsnt.com

page 2 (8)

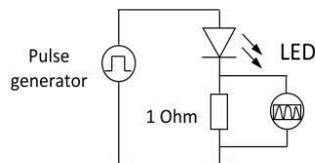


Near-Infrared (NIR) Light-Emitting Diode

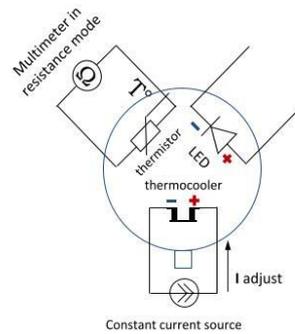
1.70 - 1.76 μm

To drive the LED we recommend the following basic circuit connections:

LED basic circuit connection

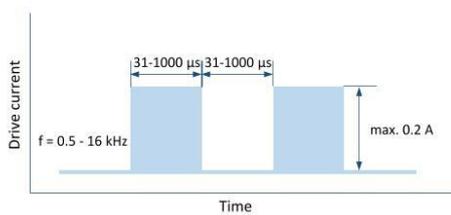


LED with thermoelectric module basic circuit connection

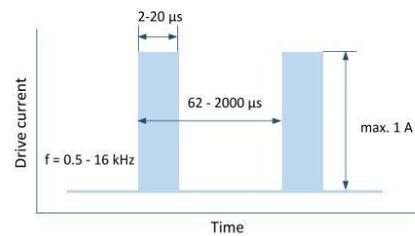


We recommend using **Quasi Continuous Wave (qCW) mode** with a duty cycle 50% or 25% to obtain maximum average optical power and short **Pulse modes** to obtain maximum peak power.

Quasi Continuous Wave (qCW) mode



Pulse mode

**IMPORTANT CAUTIONS:**

- please check your connection circuit before turning on the LED;
- please mind the LED polarity: anode is marked with a RED dot; REVERSE voltage applying is FORBIDDEN;
- please do not connect the LED to the multimeter;
- please control the CURRENT applied to the LED in order NOT to EXCEED the maximum allowable values.

Rev.011216 The design and specification of the product can be changed by LED Microsensor NT LLC. without notice

HEAD OFFICE LED Microsensor NT, LLC and RnD CENTRE Microsensor Technology, LLC
10, A, Kurchatova str., 1N, St-Petersburg, 194223, Russia; info@lmsnt.com; www.lmsnt.com

page 3 (8)

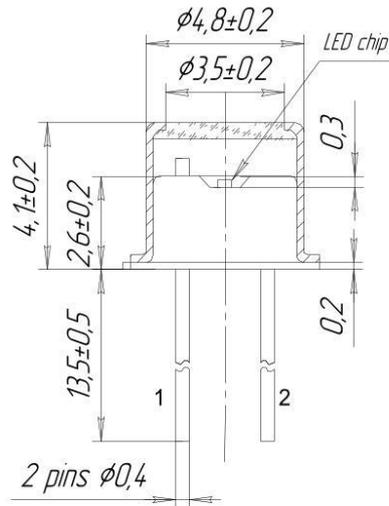


Near-Infrared (NIR) Light-Emitting Diode

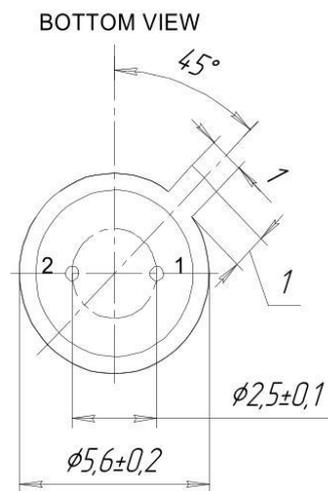
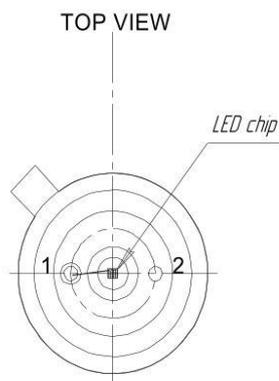
1.70 - 1.76 μm

Technical Drawings

Lms17LED



1 - LED anode
2 - LED cathode



Rev.011216 The design and specification of the product can be changed by LED Microsensor NT LLC. without notice

HEAD OFFICE LED Microsensor NT, LLC and RnD CENTRE Microsensor Technology, LLC
10, A, Kurchatova str., 1N, St-Petersburg, 194223, Russia; info@lmsnt.com; www.lmsnt.com

page 4 (8)

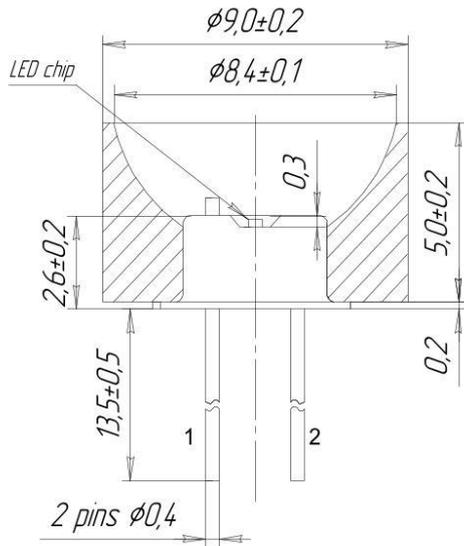


Near-Infrared (NIR) Light-Emitting Diode

1.70 - 1.76 μm

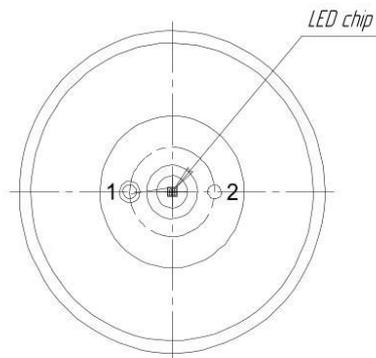
Technical Drawings

Lms17LED-R

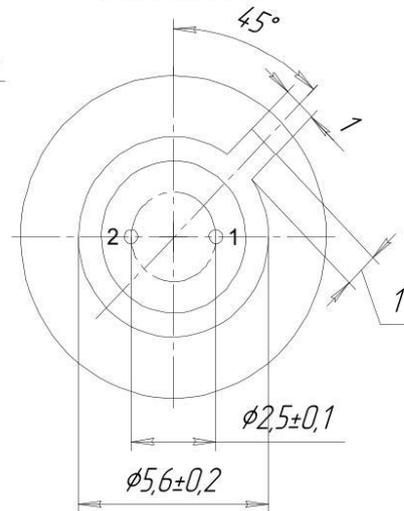


1 - LED anode
2 - LED cathode

TOP VIEW



BOTTOM VIEW



Rev.011216 The design and specification of the product can be changed by LED Microsensor NT LLC. without notice

HEAD OFFICE LED Microsensor NT, LLC and RnD CENTRE Microsensor Technology, LLC
10, A, Kurchatova str., 1N, St-Petersburg, 194223, Russia; info@lmsnt.com; www.lmsnt.com

page 5 (8)

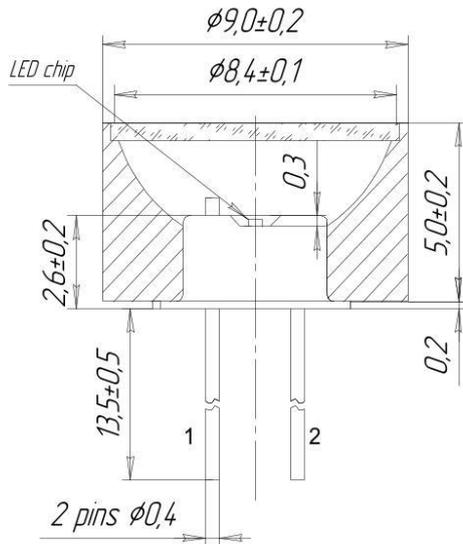


Near-Infrared (NIR) Light-Emitting Diode

1.70 - 1.76 μm

Technical Drawings

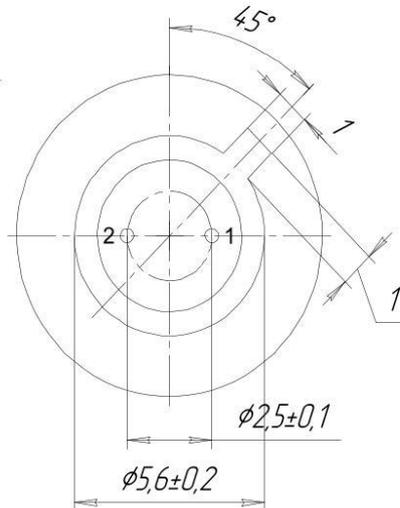
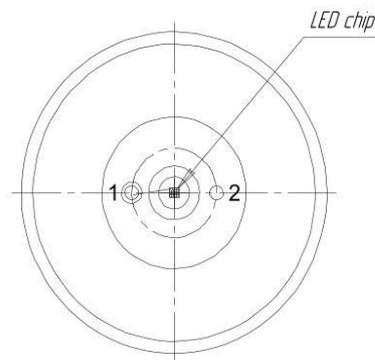
Lms17LED-RW



1 - LED anode
2 - LED cathode

TOP VIEW

BOTTOM VIEW



Rev.011216 The design and specification of the product can be changed by LED Microsensor NT LLC. without notice

HEAD OFFICE LED Microsensor NT, LLC and RnD CENTRE Microsensor Technology, LLC
10, A, Kurchatova str., 1N, St-Petersburg, 194223, Russia; info@lmsnt.com; www.lmsnt.com

page 6 (8)

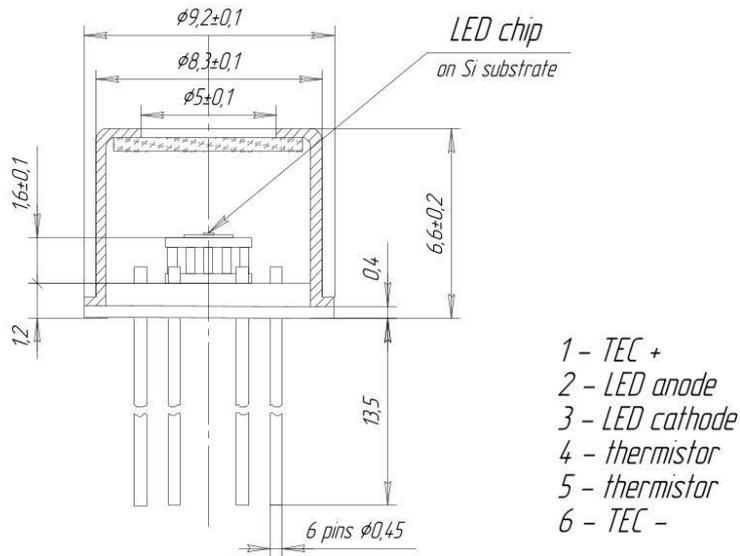


Near-Infrared (NIR) Light-Emitting Diode

1.70 - 1.76 μm

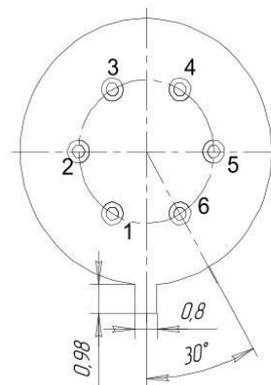
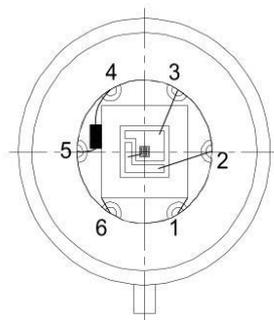
Technical Drawings

Lms17LED-TEM



TOP VIEW

BOTTOM VIEW



Rev.011216 The design and specification of the product can be changed by LED Microsensor NT LLC. without notice

HEAD OFFICE LED Microsensor NT, LLC and RnD CENTRE Microsensor Technology, LLC
10, A, Kurchatova str., 1N, St-Petersburg, 194223, Russia; info@lmsnt.com; www.lmsnt.com

page 7 (8)

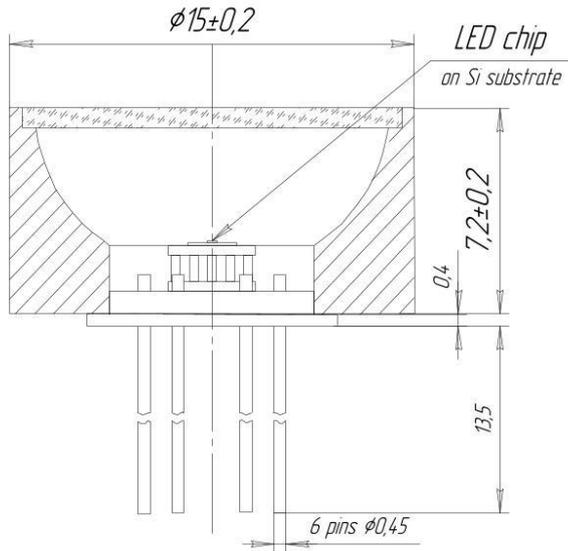


Near-Infrared (NIR) Light-Emitting Diode

1.70 - 1.76 μm

Technical Drawings

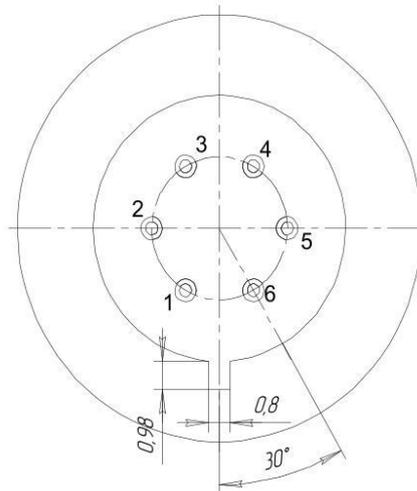
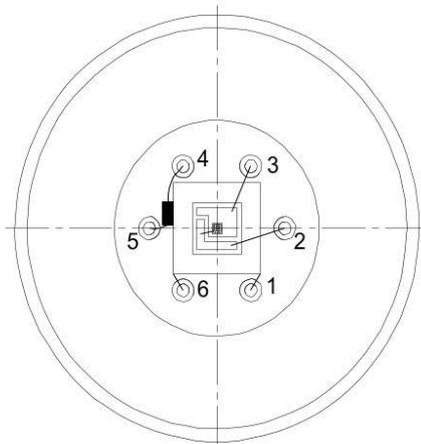
Lms17LED-TEM-R



- 1 - TEC +
- 2 - LED anode
- 3 - LED cathode
- 4 - thermistor
- 5 - thermistor
- 6 - TEC -

TOP VIEW

BOTTOM VIEW



Rev.011216 The design and specification of the product can be changed by LED Microsensor NT LLC. without notice

HEAD OFFICE LED Microsensor NT, LLC and RnD CENTRE Microsensor Technology, LLC
 10, A, Kurchatova str., 1N, St-Petersburg, 194223, Russia; info@lmsnt.com; www.lmsnt.com

III Verwendete industrielle Messgeräte und Messkomponenten

III.i Spektrometer

Bei dem in dieser Arbeit verwendeten Spektrometer handelt es sich um das AvaSpec-ULS2048L-USB2-FCPC der Arbeitsgruppe 4.51 der PTB mit folgenden Spezifikationen:

Range:	320 nm – 860 nm
Grating:	600 lines/mm
Slit size:	600 μm
Blaze:	400 nm
Resolution (FWHM):	2.1 nm
Integration time:	1.11 ms - 10 minutes
Stray-light:	0.04-0.1%, depending on the grating
Sensitivity in counts/ μW per ms integration time:	470,000
Detector:	CCD linear array, 2048 pixels

III.ii Detektortypen am Gonioreflektometer

Die nachfolgend aufgeführten Detektortypen kommen am Gonioreflektometer in Verbindung mit einem Keysight Digitalmultimeter (B2985A) zum Einsatz.

- *Solar-Blind* Channel-Photomultiplier CPM 922
- *Yellow Enhanced* Channel-Photomultiplier CPM993
- Si-Photodiode Hamamatsu Si-Photodiode S1337 series Number 1010BQ
- *InGaAs Amplified Photodetector* with Thermoelectric Cooler ETX 3000 TE, Diodenkühlung: Diode wurde auf -28°C gekühlt unter Verwendung eines „Newport 3040

III.iii Thermo-Elektrische-Kühlvorrichtung (TEC) des LED-SR

Das zur Konstruktion des LED-SR verwendete Modell TEC-1089 besitzt einen Ausgangsstrom von 0 A bis ± 10 A mit einer Restwelligkeit von $< 1\%$. Die Hauptmerkmale sind laut Datenblatt

- Temperatursensor-Typen: Pt100, Pt1000, NTC, Spannung
- Temperatur-Präzision / -Stabilität: $< 0.01^{\circ}\text{C}$
- Temperaturregelung & Messfrequenz: 1 Hz, 10 Hz, 80 Hz
- Leistungsoptimierter PID für thermische Leistungsregelung
- Abmessungen (L x B x H): 75 mm x 60 mm x 18 mm
- Wirkungsgrad: 95 % (bei 90 % Last)

Der Temperaturregler wurde in Kombination mit der zugehörigen Software betrieben, der sog. TEC Controller Software. Dieser bietet die Möglichkeit der Konfiguration, Steuerung, Überwachung und

Live-Diagnose des TEC-Controllers. Zudem ermöglicht es eine automatische Optimierung der Einstellungsparameter des PID-Reglers, die Datenprotokollierung, die Anzeige der Temperaturstabilität und umfassende Hilfsoptionen zur Fehlerbehandlung.

III.iv SBIG STF-8300

Anbei die Spezifikationen zur SBIG Kamera mit KAF-8300 CCD-Sensor und Mikrolinsentechnologie.

- Pixel-Array: 3326 x 2504
- CCD-Größe: 17,96 x 13,52 mm
- Gesamtpixelzahl: 8,3 Millionen
- Full Well Capacity: ~25.500 e-
- Dunkler Strom 0,002 e-/p/s @ -10C
- Antiblooming: 1000X
- Shutter: Mechanisch
- Belichtung 0,09 bis 3600 Sekunden
- Ausleserauschen ~9.3e-
- Binning-Modi 1x1, 2x2, 3x3, etc. - 15x15
- Digitalisierungsrate 10 Megapixel / Sekunde
- Kühlung -40C max. aus der Umgebung
- Temp. Regelung +/- 0,1 Grad
- Rückfokus 0,69 Zoll (17,5 mm)

III.i Zurich Instruments UHFLI Lock-In Verstärker mit Boxcar Option

Anbei die Spezifikationen zum UHFLI Lock-In Verstärker von Zürich Instruments mit Boxcar Option:

- 600 MHz Betriebsfrequenz
- 2 unabhängige Lock-in-Einheiten
- 2 Hochleistungs-Signalgeneratoren
- 4 unabhängige Oberschwingungen pro Lock-in-Einheit
- Hochauflösendes 12-bit-Scope mit 65k Samples
- Frequenzgang-Analysator (FRA)
- FFT-Spektrumanalysator
- LabOne® Toolset
- 2 Boxcar-Einheiten mit grafischer Auswahl von Boxcar- und Basislinienfenstern. In den hier gezeigten Messungen wurde ein Boxcar Averaging von 128 verwendet
- Option zur Grundlinienunterdrückung und Differenzmessung

Zusätzlich zum Zurich Instruments UHFLI Lock-In Verstärker wurde ein Femto DLPCA-100 Verstärker eingesetzt.

III.ii Cary 5000 UV-Vis-NIR Spektralphotometer mit diffusem Reflexionszubehör

Das Cary 5000 UV-Vis-NIR-Spektrophotometer ermöglicht Messungen im Bereich von 175 nm bis 3300 nm. Es wird mit einer Cary WinUV Software gesteuert. Es besitzt ein großes Probenfach, welches probenspezifisches Messzubehör aufnehmen kann wie z.B. eine Ulbricht-Kugel für spektrale und diffuse Reflexionsmessungen. Der LockDown-Mechanismus ermöglicht es, das Zubehör schnell zu wechseln und zu positionieren, um reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen. Die Spezifikationen sind nachfolgend aufgeführt.

- Strahlungsquelle: Wolfram-Halogenlampe für den VIS-Spektralbereich und Deuteriumlampe für den UV-Spektralbereich
- Maximale Scangeschwindigkeit: UV-Vis 2.000 nm/min, NIR 8.000 nm/min
- Photometrisches System: Doppelstrahl
- Spektrale Bandbreite: UV-Vis 0,01 nm bis 5,00 nm, NIR 0,04 nm bis 20 nm
- Wellenlänge: 175 nm bis 3300 nm

IV Ergänzende und Vertiefende Messdaten und Grafiken

IV.i Bestrahlungsstärke der verwendeten LEDs

Wie unter 3.1.1 beschrieben, wurden acht käuflich erworbene LEDs auf ihre verfügbare Strahlungsleistung untersucht. Die Bestrahlungsstärke der LEDs, welche in eine BaSO₄-Kugel eingekoppelt wurden, ist in Abbildung A 1 zu sehen. Die zugehörigen Datenblätter befinden sich im Anhang II.

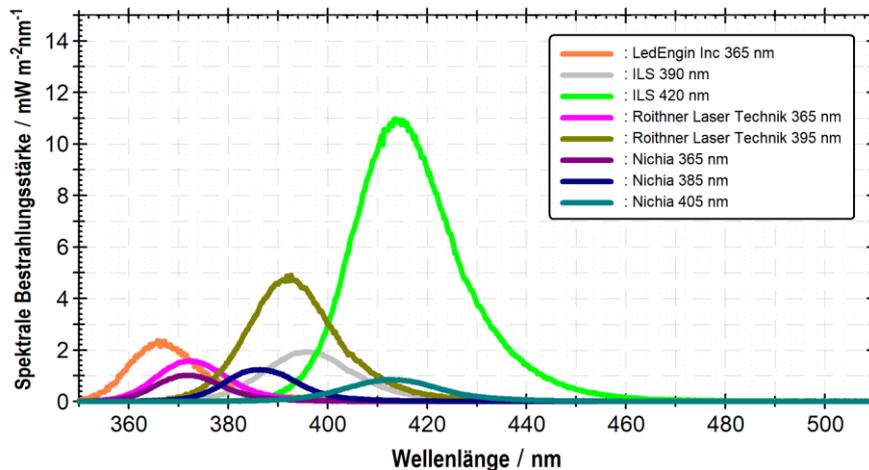


Abbildung A 1: Bestrahlungsstärke der einzelnen acht LEDs, welche in eine BaSO₄-Kugel eingekoppelt und mit einem Array-Spektrometer gemessen wurden.

Die 365 nm LED von Roithner Laser Technik wurde trotz einer großen optischen Leistung aufgrund ihrer zeitlich beobachteten Instabilität (Abbildung A 2) unter denselben Umgebungsbedingungen und trotz einer Kühlung nicht weiter betrachtet.

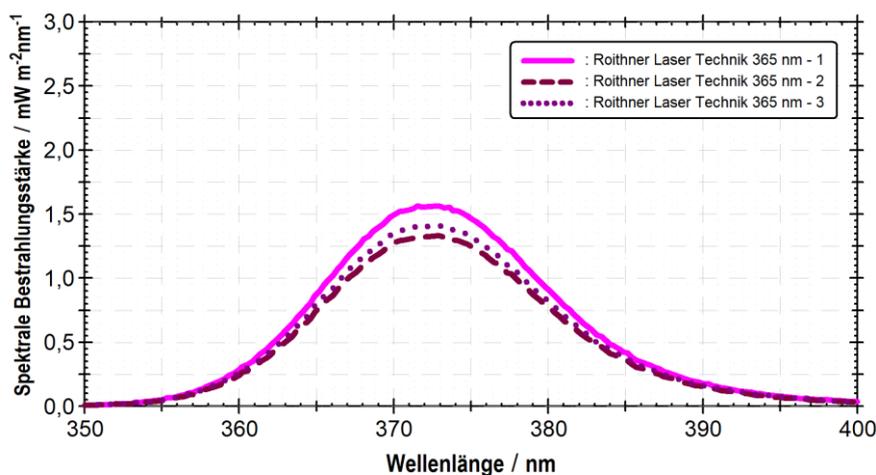


Abbildung A 2: Bestrahlungsstärke der 365 nm LED von Roithner Laser Technik, welche in eine BaSO₄-Kugel eingekoppelt und dreimal wiederholt im Abstand von einer Minute mit einem Array-Spektrometer gemessen wurden.

IV.ii Charakterisierung der verbesserten LED-SR Version

Die Temperaturstabilität und räumliche Homogenität des Strahlungsfläche der unter 3.1.1 beschriebenen verbesserten Version des LED-SR, also der Vorgängerversion des finalen LED-SR, ist in Abbildung A 3 und Abbildung A 5 aufgeführt.

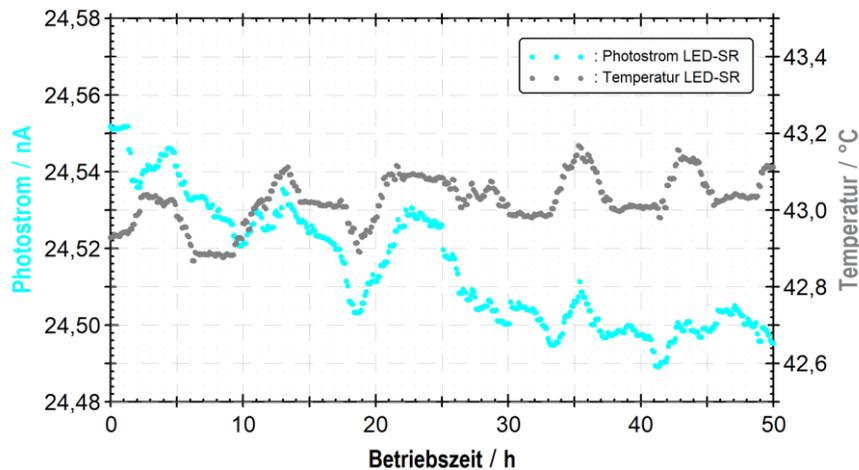


Abbildung A 3: Langzeitstabilität des emittierten Photostroms (blau) und der Temperatur (grau) der verbesserten Version des LED-SR. Der Photostrom wurde mit einer Si-Photodiode aufgezeichnet.

Die jeweils normierte Langzeit-Photostrommessung der verbesserten LED-SR Version und der finalen LED-SR Version ist in Abbildung A 4 aufgeführt. Sie zeigt in Kombination mit Abbildung A 3 eine signifikante temperaturabhängige Oszillation des Photostroms der verbesserten LED-SR Version, welche durch die aktive Temperaturregelung in der finalen LED-SR Version nicht mehr vorhanden ist (Abbildung 19).

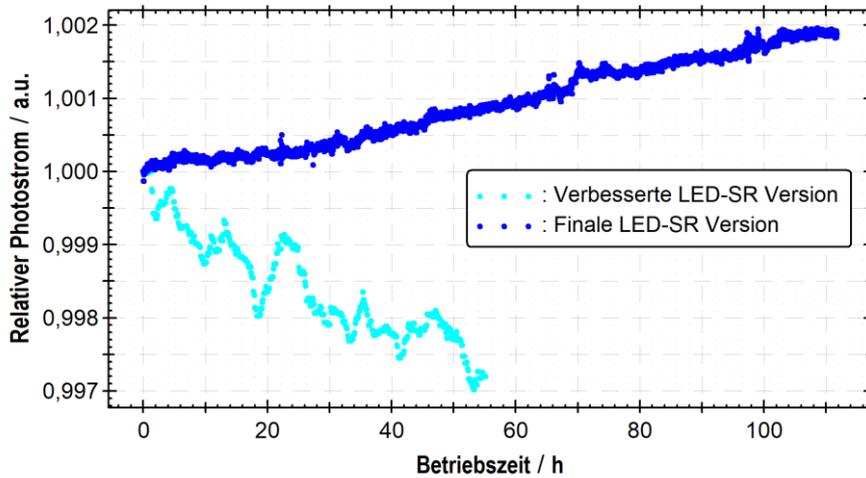


Abbildung A 4: Normierte Langzeitstabilität des emittierten Photostroms der verbesserten LED-SR Version (hellblau) und der finalen LED-SR Version (blau). Der Photostrom wurde mit einer Si-Photodiode aufgezeichnet.

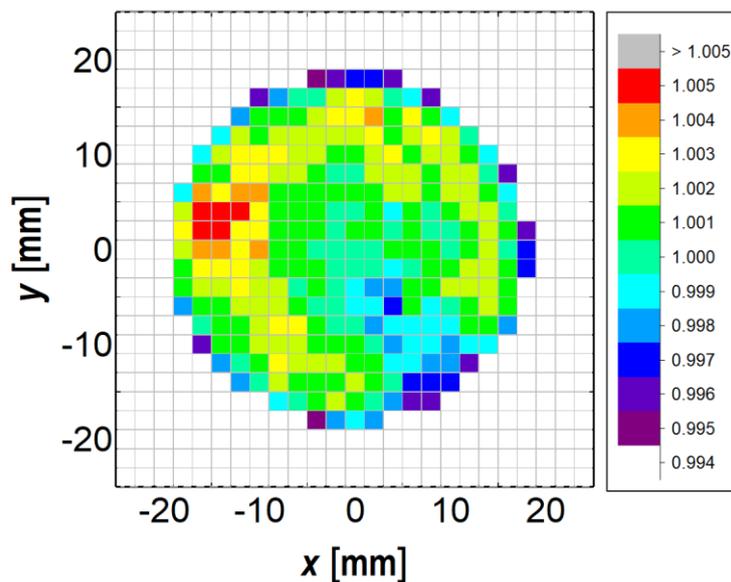


Abbildung A 5: Zweidimensionales Homogenitätsdiagramm der emittierten Strahldichte des LED-SR, normiert auf den Wert des Mittelpunkts der Strahlungsfläche [10, 11, 86]. Gemessen mit einer Si-Photodiode.

IV.iii Messdaten des absoluten SRF mit Messunsicherheitsbetrachtung

Kombinierte Standardmessunsicherheit sowie der absolute systematische und statistische Unsicherheitsbeitrag für die Messung der weißen (Tabelle A 1), roten (Tabelle A 2) und blauen (Tabelle A 3) Keramikprobe.

Tabelle A 1: Der SRF, die kombinierte Standardmessunsicherheit $U(\text{SRF})$ mit ihren statistischen u_{stat} - und systematischen u_{sys} -Unsicherheitsbeiträgen für die weiße matte Keramikprobe, die mit dem Halogen-SR bzw. LED-SR in $45^\circ:0^\circ$ -Geometrie bestimmt und mit einer Silizium-Photodiode detektiert wurde.

λ / nm	SRF	$U(\text{SRF})$		u_{stat}		u_{sys}	
		Halogen-SR	LED-SR	Halogen-SR	LED-SR	Halogen-SR	LED-SR
360	0,6467	7,93E-03	3,18E-03	7,90E-03	2,11E-03	7,17E-04	2,38E-03
370	0,6959	8,32E-03	1,17E-03	8,28E-03	3,80E-04	8,61E-04	1,11E-03
380	0,7449	6,31E-03	1,34E-03	6,23E-03	6,13E-04	1,00E-03	1,19E-03
390	0,7923	4,37E-03	1,37E-03	4,25E-03	5,30E-04	1,04E-03	1,27E-03
400	0,8223	3,23E-03	1,28E-03	3,04E-03	6,42E-04	1,10E-03	1,11E-03
410	0,8413	2,53E-03	1,28E-03	2,27E-03	2,41E-04	1,11E-03	1,25E-03
420	0,8538	2,05E-03	1,36E-03	1,69E-03	6,88E-04	1,16E-03	1,17E-03
430	0,8631	1,85E-03	2,91E-03	1,40E-03	2,65E-03	1,20E-03	1,22E-03

Tabelle A 2: Der SRF, die kombinierte Standardmessunsicherheit $U(\text{SRF})$ mit ihren statistischen u_{stat} - und systematischen u_{sys} -Unsicherheitsbeiträgen für die rote matte Keramikprobe, die mit dem Halogen-SR bzw. LED-SR in $45^\circ:0^\circ$ -Geometrie bestimmt und mit einer Silizium-Photodiode detektiert wurde.

λ / nm	SRF	$U(\text{SRF})$		u_{stat}		u_{sys}	
		Halogen-SR	LED-SR	Halogen-SR	LED-SR	Halogen-SR	LED-SR
360	0,1410	8,58E-03	3,88E-03	8,58E-03	1,96E-03	1,75E-04	3,34E-03
370	0,1394	8,65E-03	4,29E-04	8,65E-03	3,72E-04	1,70E-04	2,15E-04
380	0,1409	4,20E-03	5,20E-04	4,19E-03	4,82E-04	1,66E-04	1,93E-04
390	0,1355	4,42E-03	4,77E-04	4,42E-03	4,39E-04	1,67E-04	1,87E-04
400	0,1400	2,85E-03	5,52E-04	2,84E-03	5,19E-04	1,84E-04	1,87E-04
410	0,1344	2,65E-03	2,75E-04	2,65E-03	1,74E-04	1,81E-04	2,14E-04
420	0,1340	1,56E-03	5,92E-04	1,55E-03	5,62E-04	1,86E-04	1,86E-04
430	0,1345	1,61E-03	2,95E-03	1,60E-03	2,94E-03	1,84E-04	1,82E-04

Tabelle A 3: Der SRF, die kombinierte Standardmessunsicherheit $U(\text{SRF})$ mit ihren statistischen u_{stat} - und systematischen u_{sys} -Unsicherheitsbeiträgen für die blaue matte Keramikprobe, die mit dem Halogen-SR bzw. LED-SR in $45^\circ:0^\circ$ -Geometrie bestimmt und mit einer Silizium-Photodiode detektiert wurde.

λ / nm	SRF	$U(\text{SRF})$		u_{stat}		u_{sys}	
		Halogen-SR	LED-SR	Halogen-SR	LED-SR	Halogen-SR	LED-SR
360	0,2126	5,99E-03	8,45E-03	5,98E-03	2,02E-03	2,73E-04	8,21E-03
370	0,2191	6,85E-03	7,63E-04	6,84E-03	2,48E-04	3,11E-04	7,22E-04
380	0,2326	3,76E-03	5,08E-04	3,75E-03	4,11E-04	2,98E-04	2,99E-04
390	0,2368	3,37E-03	5,42E-04	3,35E-03	4,86E-04	3,16E-04	2,40E-04
400	0,2446	3,38E-03	6,74E-04	3,36E-03	6,34E-04	3,22E-04	2,28E-04
410	0,2371	1,99E-03	2,95E-04	1,97E-03	1,69E-04	3,09E-04	2,42E-04
420	0,2209	1,57E-03	6,14E-04	1,54E-03	5,31E-04	3,41E-04	3,08E-04
430	0,1985	1,31E-03	2,04E-03	1,26E-03	1,99E-03	3,47E-04	4,19E-04

IV.iv Gepulster Betrieb des LED-SR

Das normierte gepulste Strahlersignal S_i des LED-SR bei 410 nm ist nachfolgend als Wellenform in Abbildung A 6 bei Verwendung eines 23 Hz und 137 Hz Pulsbetriebs mit einem Tastverhältnis von jeweils 50 % und 10 % gezeigt. Es ist zu erkennen, dass bei 23 Hz und einem 50 % Tastverhältnis das Signal in den ersten 15 ° der Phase durch das Pulsen leicht überreguliert wird und sich anschließend einpendelt. Dieses Verhalten ist in nicht so markanter Ausprägung aufgrund der zeitlichen Konstante der Messung auch bei der Signalaufnahme mit 137 Hz und einem Duty Cycle von 50 % aber auch jeweils bei 10 % Duty Cycle zu erkennen.

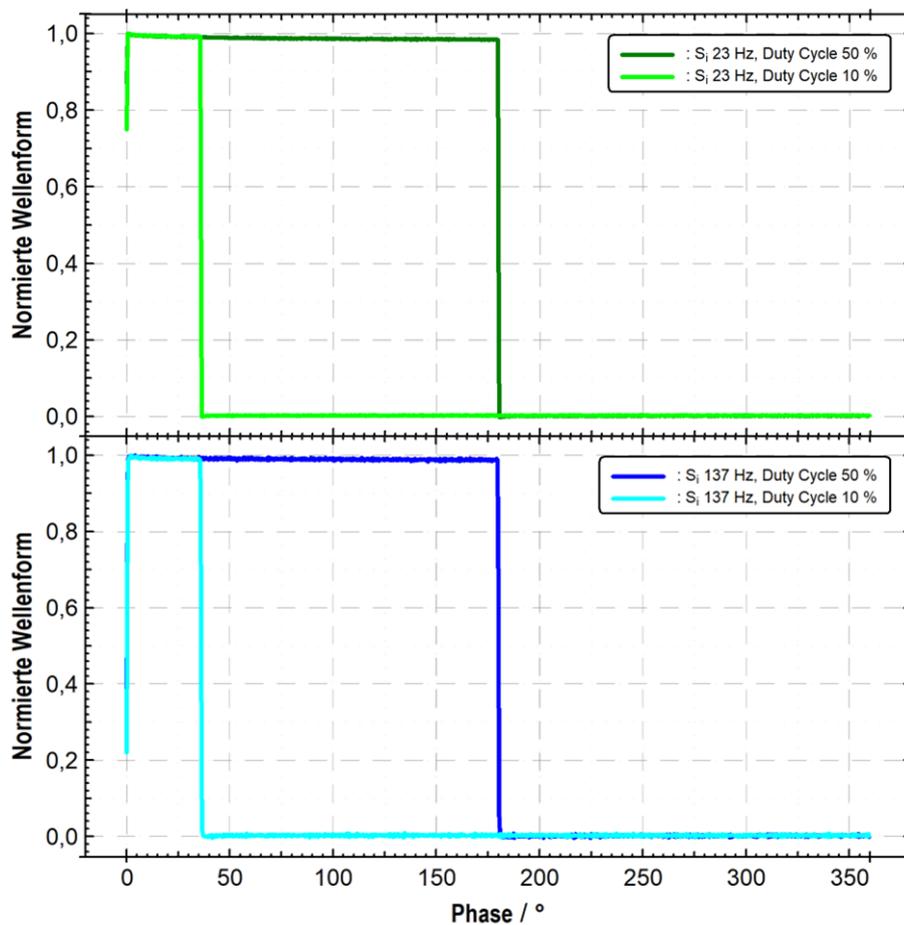


Abbildung A 6: Normierte Wellenform des gepulsten Strahlersignals S_i des LED-SR bei Verwendung eines 23 Hz und 137 Hz Pulsbetriebs mit einem Tastverhältnis von jeweils 50 % und 10 % gemessen bei 410 nm. Zusätzlich zum Zurich Instruments UHFLI Lock-In Verstärker (Anhang III.i) wurde ein FEMTO DLPCA-100 Verstärker eingesetzt.

Abbildung A 7 zeigt das gepulste Messsignal S_r im Verhältnis zum Strahlersignal S_i des LED-SR bei 410 nm bei Verwendung eines 23 Hz und 137 Hz Pulsbetriebs mit einem Tastverhältnis von 10 %. Der Signalunterschied (siehe Dynamikbereich des Messsignals in Abschnitt 3.2.1) zwischen den gemessenen Signalen S_i und S_r aufgrund des Messprinzips und der Intensität der Strahlungsquelle ist hier deutlich zu sehen. Dies beeinflusst auch durch das Erreichen der Verstärkergrenze die Peakform des gemessenen

Signals S_r . Dennoch lässt sich das Signal als solches noch detektieren und ist trotz eines Duty Cycles von 10 % vom Rauschen extrahierbar.

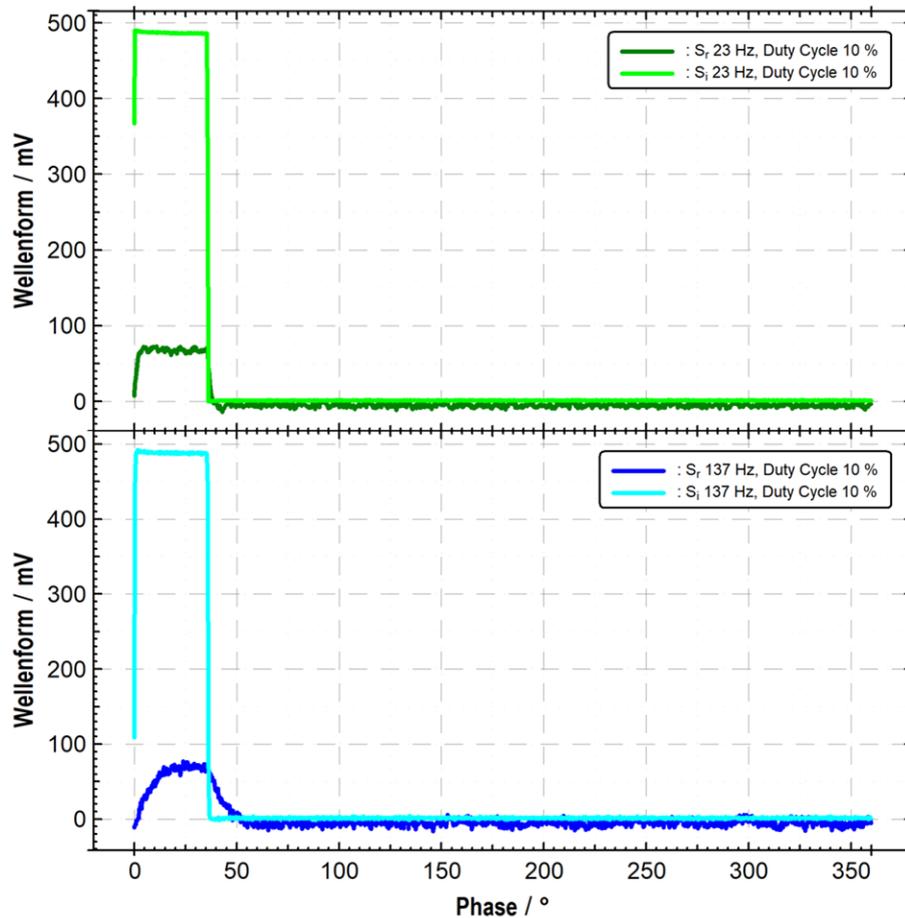


Abbildung A 7: Wellenform des gepulsten Messsignals S_r und dem Strahlersignal S_i des LED-SR bei Verwendung eines 23 Hz und 137 Hz Pulsbetriebs mit einem Tastverhältnis von 10 % bei 410 nm. Ein Zurich Instruments UHFLI Lock-In Verstärker (Anhang III.i) wurde in Kombination mit einem FEMTO DLPCA-100 Verstärker eingesetzt.

Tabelle A 4 zeigt die kombinierte Standardmessunsicherheit sowie den absoluten systematischen und statistischen Unsicherheitsbeitrag für die Messung der weißen Keramikprobe mit dem LED-SR in einer $45^\circ:0^\circ$ -Geometrie im gepulsten Betrieb bei Verwendung eines 23 Hz und 137 Hz Pulsbetriebs mit einem Tastverhältnis von 10 %.

Tabelle A 4: Der SRF, die kombinierte Standardmessunsicherheit $U(\text{SRF})$ mit ihren statistischen u_{stat} - und systematischen u_{sys} -Unsicherheitsbeiträgen für die weiße matte Keramikprobe, die mit dem LED-SR in $45^\circ:0^\circ$ -Geometrie im gepulsten Betrieb bei Verwendung eines 23 Hz und 137 Hz Pulsbetriebs mit einem Tastverhältnis von 10 % mit einer Silizium-Photodiode detektiert wurde.

λ / nm	SRF	$U(\text{SRF})$		u_{stat}		u_{sys}	
		23 Hz	137 Hz	23 Hz	137 Hz	23 Hz	137 Hz
360	0,6467	2,03E-02	-	2,03E-02	-	3,63E-03	-
370	0,6959	1,84E-02	1,76E-02	1,84E-02	1,75E-02	3,95E-03	3,95E-03
380	0,7449	3,79E-03	1,97E-02	3,78E-03	1,97E-02	4,30E-03	4,30E-03
390	0,7923	4,76E-03	2,20E-02	4,74E-03	2,20E-02	4,50E-03	4,50E-03
400	0,8223	5,46E-03	2,59E-02	5,44E-03	2,58E-02	4,70E-03	4,70E-03
410	0,8413	1,32E-03	7,98E-03	1,30E-03	7,96E-03	4,80E-03	4,80E-03
420	0,8538	5,33E-03	2,90E-02	5,30E-03	2,90E-02	4,89E-03	4,89E-03
430	0,8631	2,87E-02	-	2,86E-02	-	4,94E-03	-

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Spektrale Strahldichte eines Schwarzen Strahlers bei verschiedenen Temperaturen, berechnet nach dem Planck'schen Strahlungsgesetz mit Darstellung der Spektralfarben im Hintergrund.....	4
Abbildung 2: Spektrale Bestrahlungsstärke des Halogen-Kugelstrahlers mit Darstellung der Spektralfarben im Hintergrund.	6
Abbildung 3: Schematische Darstellung der Rekombinationsmechanismen in einem direkten Halbleiter mit vereinfachter Skizze der Bandstruktur. Dabei entspricht EV der Energie an der Valenzbandkante und EC der Energie an der Leitungsbandkante. a) Strahlende Rekombination, b) Shockley-Read-Hall (SRH)-Rekombination und c) Auger Rekombination.....	7
Abbildung 4: Schematischer Querschnitt der Grundstruktur einer LED.	10
Abbildung 5: Schematische Abbildung eines vereinfachten Kristallgitters (oben) mit auftretender durchstoßender Versetzung a) Stufenversetzung und b) Schraubenversetzung mit den jeweiligen Burgersvektoren b . Dieser beschreibt die Richtung und den Betrag der Abgleitung durch die Versetzungsbewegung, welche schließlich zu der Versetzung (unten) des Kristallgitters führt. .	11
Abbildung 6: Grafische Darstellung der Energiebandlücken und entsprechende Emissionswellenlängen verschiedener III-Nitrid-Materialien, dargestellt gegen ihre Gitterkonstante mit Veranschaulichung der Spektralfarben im Hintergrund.	14
Abbildung 7: Schematische Skizze des Referenz-Gonioreflektometers der PTB. Der Abstand zwischen der Probe und dem Aperturwechsler beträgt 3,8 m. [12, 87, 88].....	17
Abbildung 8: Definition der Richtungen und aller zugehörigen Winkel $\theta_i, \Phi_i, \theta_r, \Phi_i$ in der gerichteten Geometrie [12] mit dem auftreffendem $d\omega_i$ und reflektiertem $d\omega_r$ Strahl und der bestrahlten Fläche dA	19
Abbildung 9: Simulation eines möglichst kontinuierlichen konstanten Spektrums mit den verwendeten Spektrometerdaten von je drei LED-Typen, eingebracht in eine mit $BaSO_4$ beschichtete Ulbricht-Kugel und ermittelt mit einem Array-Spektrometer. Das Zielspektrum ist in rot und das sich ergebende zusammengesetzte LED-Spektrum in blau aufgeführt. a) Simulation zusammengesetzt aus je einer LED, die bei 365 nm, 395 nm und 420 nm emittiert; b) Simulation a mit einer zusätzlichen LED bei 365 nm; c) Simulation mit Nichia LEDs, die bei 365 nm (x6), 385 nm (x5) und 405 nm (x10) emittieren. Die zugehörigen technischen Datenblätter befinden sich im Anhang II.	24
Abbildung 10: Die erste Testversion des LED-SR mit einer Bariumsulfatkugel und drei einzeln gesteuerten high-power LEDs (365 nm, 395 nm und 420 nm).....	26
Abbildung 11: Spektrale Bestrahlungsstärke der Testversion des LED-SR (dunkelgrün) und der einzelnen LEDs, welche für die Konstruktion verwendet wurden (365 nm orange, 395 nm ocker und 420 nm hellgrün), gemessen mit einem Array-Spektrometer. Zum Vergleich ist die spektrale	

Bestrahlungsstärke des Halogen-SR in rot und das Ergebnis der Simulation aus Abbildung 9 a) in blau aufgeführt.....	26
Abbildung 12: BaSO ₄ -Kugelbeschichtung nach einem jahrzehntelangen Einsatz am Gonioreflektometer. Einige stark beanspruchte Stellen, welche u. a. durch das Explodieren von Halogenlampen, mechanischer Abnutzung, die Temperaturbelastung und UV-Strahlung entstanden sind, sind rot eingekreist. Beim LED-SR wurde mit einer PTFE-Beschichtung gearbeitet, welche robuster gegen solche Schäden ist.	27
Abbildung 13: Reflexionsgrad von Bariumsulfat und PTFE gemessen in der 8°/d-Geometrie mit einem UV-Vis-NIR Spektralphotometer mit einer Ulbricht-Kugel für spektrale und diffuse Reflexionsmessungen.	27
Abbildung 14: Struktur der verbesserten Version des LED-SR mit einer Beschichtung aus gesintertem PTFE und vier einzeln gesteuerten high-power LEDs (365 nm (x2), 395 nm and 420 nm) [9, 10].	28
Abbildung 15: Spektrale Bestrahlungsstärke der verbesserten LED-SR-Version (türkis), gemessen mit einem Array-Spektrometer. Zum Vergleich ist die spektrale Bestrahlungsstärke der vorangegangenen Testversion des LED-SR in dunkelgrün und des Halogen-SR in rot aufgeführt.	28
Abbildung 16: Seitenansicht der finalen Version des LED-SR mit dem inneren Reflexionseinsatz in der Äquatorialebene, einer gesinterten PTFE-Kugelwandbeschichtung, austauschbaren Hochleistungs-LED-Platinen (Hauptboard bestückt mit Nichia NVSU233B(T) U 365 nm (x6), U 385 nm (x5), U 405 nm (x10)) und ihrem aktiven Temperaturkontrollsystem [10, 11].....	30
Abbildung 17: Spektrale Bestrahlungsstärke der finalen LED-SR-Version (blau), gemessen mit einem Array-Spektrometer. Zum Vergleich ist die spektrale Bestrahlungsstärke der vorangegangenen verbesserten LED-SR-Version in türkis, der Testversion des LED-SR in dunkelgrün und des Halogen-SR in rot aufgeführt.	30
Abbildung 18: Emittierter normierter Photostrom des Halogen-SR (rot) und des LED-SR (blau) gemessen am Gonioreflektometer. Normierung auf den Photostrom des LED-SR bei 410 nm. .	31
Abbildung 19: Langzeitstabilität des emittierten Photostroms (blau) und der Temperatur (grau) des LED-SR. Der Photostrom wurde mit einer Si-Photodiode aufgezeichnet. Die Temperatur wurde mithilfe des zur Regelung verwendeten Temperaturfühlers auf der LED-Platine gemessen.	32
Abbildung 20: Relativ gemessener Langzeit-Photostrom des LED-SR (blau) und des Halogen-SR (rot). Der Photostrom wurde mit einer Si-Photodiode aufgezeichnet.....	34
Abbildung 21: Spektrale Stabilität des LED-SR. Ermittelt anhand der Abweichung der Emissionsspektren bei verschiedenen Betriebszeiten zum initialen Spektrum nach der Einbrenn- und Temperier-Zeit von 10 min. Gemessen mit einem Array-Spektrometer.	35

- Abbildung 22: Skizze des sog. „Homogenitätsmessaufbaus“, eines zur Bestimmung der Homogenität des Strahlungsfeldes bei Kugelstrahlern entwickelten Scanning-Messaufbaus nach [86]. Gemessen mit einer Si-Photodiode und einem Digitalmultimeter..... 36
- Abbildung 23: Zweidimensionales Homogenitätsdiagramm der emittierten Strahldichte des LED-SR, normiert auf den Wert des Mittelpunkts der Strahlungsfläche [10, 11, 86]. Die Messung erfolgte mit einer Si-Photodiode..... 37
- Abbildung 24: Skizze des Messverfahrens zur Bestimmung der mechanischen Zentrierung des Reflexionseinsatzes des LED-SR. Position ①: Kamera zentriert in der Probenebene. Positionen ② und ③: Kamera am rechten bzw. linken Rand des Messflecks (Ø 20 mm). 38
- Abbildung 25: Strahlaufnahme des LED-SR a) für alle drei Positionen des hypothetischen Messflecks auf der Probe nach optimaler mechanischer Zentrierung des Reflexionseinsatzes. b) von Position 2 vor der Korrektur der mechanischen Zentrierung des Reflexionseinsatzes. Hier ist der Rand des Halters des Reflexionseinsatzes noch zu erkennen und mit einem roten Pfeil markiert. 39
- Abbildung 26: Relative Fluoreszenz einer weißen matten Keramik, jeweils normiert auf die Anregungswellenlänge von 360 nm bis 430 nm..... 47
- Abbildung 27: Exemplarische Darstellung der ermittelten Topographie der Probenoberfläche, gezeigt anhand der blauen matten Keramikprobe in feiner ($\pm 0,02$ mm) Auflösung. Aufnahme zeigt nur den Probenausschnitt aus dem Sichtfeld des verwendeten Streifenlichtprojektors von GOM Metrology..... 48
- Abbildung 28: Satz käuflich erhältlicher matter Keramikproben. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Proben sind: Die weiße (1), die rote (4) und die blaue (6) Probe [12]. 53
- Abbildung 29: SRF einer weißen (oben), roten (in der Mitte) und blauen (unten) keramischen Probe mit der kombinierten Standardmessunsicherheit, gemessen mit dem Halogen-SR und dem LED-SR je in einer $45^\circ:0^\circ$ -Geometrie. Zur Detektion wurde eine Silizium-Photodiode (Hamamatsu S1337) verwendet..... 54
- Abbildung 30: Die zu Abbildung 29 ermittelte SRF-Differenz $\beta_{\text{LED-SR}} - \beta_{\text{Halogen-SR}}$ für die Messung einer weißen (oben), roten (in der Mitte) und blauen (unten) keramischen Probe, erhalten durch die Verwendung beider Strahlungsquellen. Die angegebenen Unsicherheiten ergeben sich aus der Unsicherheitsfortpflanzung (Wurzel aus der Summe der Quadrate der Einzelunsicherheiten). .. 56
- Abbildung 31: Kombinierte Standardmessunsicherheit des SRF für eine weiße, rote und blaue Keramikprobe, gemessen mit dem Halogen-SR und LED-SR in einer $45^\circ:0^\circ$ Geometrie..... 57
- Abbildung 32: Statistischer Beitrag der kombinierten Standardmessunsicherheit des SRF für eine weiße, rote und blaue Keramikprobe, gemessen mit dem Halogen-SR und dem LED-SR in einer $45^\circ:0^\circ$ Geometrie. 57
- Abbildung 33: Systematischer Beitrag der kombinierten Standardmessunsicherheit des SRF für eine weiße, rote und blaue Keramikprobe, gemessen mit dem Halogen-SR und LED-SR in einer $45^\circ:0^\circ$ Geometrie. Zur besseren Veranschaulichung wird eine logarithmische Darstellung verwendet. 57

- Abbildung 34: Die fünf größten relativen systematischen Unsicherheitsbeiträge für die weiße (oben), die rote (Mitte) und die blaue Keramikprobe (unten) bei Messung mit dem LED-SR ohne Einbeziehung der Probeneigenschaften wie f_{pol} und f_{flu} und die Wellenlängenunauigkeit der spektralen Bandbreite $\Delta\lambda_b$, welcher in Abschnitt 3.3.1.1 näher betrachtet wird..... 59
- Abbildung 35: Berechnete Photostromdifferenz zwischen gemessenem und f_{bi} -korrigiertem Signal S_i des LED-SR für verschiedene spektrale Bandbreiten $\Delta\lambda$ 3 nm, 2 nm und 1 nm..... 62
- Abbildung 36: Aufnahme von fünf Reflexionsstandards unter Bestrahlung mit Weißlicht (oben) und einer UV-Lampe mit 365 nm (Mitte) und 254 nm (unten). a) Opalglas b) Matte weiße Keramik, c) Bariumsulfat (gepresst), d) PTFE, e) Bariumsulfat (gespachtelt). Aufgenommen mit einer CCD-Kamera..... 65
- Abbildung 37: Relative Fluoreszenz einer matten weißen Keramikprobe, bestimmt im Vergleich zu einem gesinterten PTFE-Standard und unter Verwendung des LED-SR als Strahlungsquelle [11, 120]..... 66
- Abbildung 38: Stokes-Parameter des LED-SR. Da alle Werte innerhalb ihrer Standardmessunsicherheiten als Null angesehen werden können, kann der LED-SR als zufällig polarisiert betrachtet werden [11]..... 68
- Abbildung 39: Stokes-Parameter M_0 (links) und das SRF-Verhältnis (rechts) für variable Einstrahlwinkel bei 365 nm, 400 nm und 425 nm der blauen polarisationsabhängigen Keramikprobe [11]. 69
- Abbildung 40: Oben: Verhältnis zwischen DOP und Gesamtreflexionsvermögen der blauen polarisationsabhängigen Keramikprobe [11]. Messungen mit dem LED-SR bei 365 nm, 400 nm und 425 nm. Messungen mit dem Halogen-SR bei 700 nm und 750 nm. Beschriftung angepasst an Spektralfarben. Unten: Strahldichtefaktor der betrachteten blauen Keramikprobe..... 69
- Abbildung 41: Foto der zwei untersuchten Papierproben (Probe 1 links, Probe 2 rechts) mit optischen Aufhellern (OBA) und geringer Lichtechtheit (LE)[128, 130]. Probe 1 besitzt einen Anteil von 11,3 an OBA und Probe 2 von 6,6..... 72
- Abbildung 42: Diffuser Reflexionsverlauf und relative Stabilität der zwei untersuchten Papierproben (oben Probe 1, unten Probe 2) aus Abbildung 41 veranschaulicht anhand der Abweichung der Reflexionsverläufe und deren Differenzen nach verschiedenen Bestrahlungszeiten $t_1 = 0$ h, $t_2 = 4$ h $t_3 = 8$ h, $t_4 = 16$ h und $t_5 = 32$ h mit dem LED-SR..... 73
- Abbildung 43: Schematische Skizze des Referenz-Gonioreflektometers der PTB (Abbildung 7) erweitert um den gepulsten Betrieb der Kugelstrahlerquelle und eine Lock-In-Verstärker-gestützte Detektion. 75
- Abbildung 44: SRF einer weißen keramischen Probe mit der kombinierten Standardmessunsicherheit gemessen in einer $45^\circ:0^\circ$ -Geometrie mit dem LED-SR im kontinuierlichen Strombetrieb (dunkelblau) und gepulst betrieben bei 23 Hz (hellblau) und 137 Hz (rot) mit je einem Duty Cycle von 10 %. Zur Detektion wurde eine Silizium-Photodiode (Hamamatsu S1337) verwendet. 76

- Abbildung 45: Die zu Abbildung 44 ermittelte SRF-Differenz $\beta_{\text{LED-SR}}$ im kontinuierlichen Betrieb – $\beta_{\text{LED-SR}}$ gepulst zwischen kontinuierlichem Betrieb und gepulstem Betrieb mit 23 Hz (hellblau) und 137 Hz (rot) jeweils mit einem Duty Cycle von 10 % für eine weiße keramische Probe. Die angegebenen Unsicherheiten resultieren aus der Unsicherheitsfortpflanzung (Wurzel aus der Summe der Quadrate der Einzelunsicherheiten)..... 77
- Abbildung 46: Logarithmische Darstellung des gemessenen Photostrom der exemplarischen LED-SR-Platinen für verschiedene Spektralbereiche. Die konstruierte UV-Platine mit zwei LED-Typen ist in Violett (270 nm und 305 nm), die „Standard“-LED-SR Platine für den UV-VIS-Spektralbereich in Blau (siehe Abschnitt 3.1), die Weißlicht-Platine in Ocker (zwei Varianten von Weißlicht LEDs bei 440 nm mit Phosphor) und die IR-Platine (1700 nm) in Rot dargestellt. Datenblätter der verwendeten LEDs sind im Anhang II.iii aufgeführt. 79
- Abbildung A 1: Bestrahlungsstärke der einzelnen acht LEDs, welche in eine BaSO₄-Kugel eingekoppelt und mit einem Array-Spektrometer gemessen wurden..... CXXXI
- Abbildung A 2: Bestrahlungsstärke der 365 nm LED von Roithner Laser Technik, welche in eine BaSO₄-Kugel eingekoppelt und dreimal wiederholt im Abstand von einer Minute mit einem Array-Spektrometer gemessen wurden. CXXXI
- Abbildung A 3: Langzeitstabilität des emittierten Photostroms (blau) und der Temperatur (grau) der verbesserten Version des LED-SR. Der Photostrom wurde mit einer Si-Photodiode aufgezeichnet. CXXXII
- Abbildung A 4: Normierte Langzeitstabilität des emittierten Photostroms der verbesserten LED-SR Version (hellblau) und der finalen LED-SR Version (blau). Der Photostrom wurde mit einer Si-Photodiode aufgezeichnet. CXXXIII
- Abbildung A 5: Zweidimensionales Homogenitätsdiagramm der emittierten Strahldichte des LED-SR, normiert auf den Wert des Mittelpunkts der Strahlungsfläche [10, 11, 86]. Gemessen mit einer Si-Photodiode. CXXXIII
- Abbildung A 6: Normierte Wellenform des gepulsten Strahlersignals S_i des LED-SR bei Verwendung eines 23 Hz und 137 Hz Pulsbetriebs mit einem Tastverhältnis von jeweils 50 % und 10 % gemessen bei 410 nm. Zusätzlich zum Zurich Instruments UHFLI Lock-In Verstärker (Anhang III.i) wurde ein FEMTO DLPCA-100 Verstärker eingesetzt. CXXXV
- Abbildung A 7: Wellenform des gepulsten Messsignals S_r und dem Strahlersignal S_i des LED-SR bei Verwendung eines 23 Hz und 137 Hz Pulsbetriebs mit einem Tastverhältnis von 10 % bei 410 nm. Ein Zurich Instruments UHFLI Lock-In Verstärker (Anhang III.i) wurde in Kombination mit einem FEMTO DLPCA-100 Verstärker eingesetzt..... CXXXVI

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Aufführung der berücksichtigten Unsicherheitsbeiträge für die Bestimmung des spektralen Strahldichtefaktors [12]	51
Tabelle 2: Anzahl der Messwiederholungen N , welche benötigt werden, um mit dem Halogen-SR die gleiche kombinierte Messunsicherheit zu erreichen wie mit einer Messwiederholung mit dem LED-SR (20-fache Datenaufnahme pro Messpunkt, Gleichung (20)) für eine weiße, rote und blaue Keramikprobe.	61
Tabelle A 1: Der SRF, die kombinierte Standardmessunsicherheit $U(\text{SRF})$ mit ihren statistischen u_{stat} - und systematischen u_{sys} -Unsicherheitsbeiträgen für die weiße matte Keramikprobe, die mit dem Halogen-SR bzw. LED-SR in $45^\circ:0^\circ$ -Geometrie bestimmt und mit einer Silizium-Photodiode detektiert wurde.	CXXXIV
Tabelle A 2: Der SRF, die kombinierte Standardmessunsicherheit $U(\text{SRF})$ mit ihren statistischen u_{stat} - und systematischen u_{sys} -Unsicherheitsbeiträgen für die rote matte Keramikprobe, die mit dem Halogen-SR bzw. LED-SR in $45^\circ:0^\circ$ -Geometrie bestimmt und mit einer Silizium-Photodiode detektiert wurde.	CXXXIV
Tabelle A 3: Der SRF, die kombinierte Standardmessunsicherheit $U(\text{SRF})$ mit ihren statistischen u_{stat} - und systematischen u_{sys} -Unsicherheitsbeiträgen für die blaue matte Keramikprobe, die mit dem Halogen-SR bzw. LED-SR in $45^\circ:0^\circ$ -Geometrie bestimmt und mit einer Silizium-Photodiode detektiert wurde.	CXXXIV
Tabelle A 4: Der SRF, die kombinierte Standardmessunsicherheit $U(\text{SRF})$ mit ihren statistischen u_{stat} - und systematischen u_{sys} -Unsicherheitsbeiträgen für die weiße matte Keramikprobe, die mit dem LED-SR in $45^\circ:0^\circ$ -Geometrie im gepulsten Betrieb bei Verwendung eines 23 Hz und 137 Hz Pulsbetriebs mit einem Tastverhältnis von 10 % mit einer Silizium-Photodiode detektiert wurde.	CXXXVII

Literaturverzeichnis

- [1] Chang, M.-H., Das, D., Varde, P. V. u. Pecht, M.: Light emitting diodes reliability review. *Microelectronics Reliability* 52 (2012) 5, S. 762–782
- [2] Taki, T. u. Strassburg, M.: Review—Visible LEDs: More than Efficient Light. *ECS Journal of Solid State Science and Technology* 9 (2020) 1, S. 15017
- [3] Pelka, D. G. u. Patel, K.: An overview of LED applications for general illumination. *Design of Efficient Illumination Systems. SPIE Proceedings. SPIE 2003*, S. 15
- [4] Baten, M. Z., Alam, S., Sikder, B. u. Aziz, A.: III-Nitride Light-Emitting Devices. *Photonics* 8 (2021) 10, S. 430
- [5] Gerloff, T.: *Metrologie für moderne Lichtquellen: LEDs und OLEDs*
- [6] Project from EU research framework programmes: *Overcoming the Limits of Diffraction with Superresolution Lighting on a Chip (ChipScope)*. 2023
- [7] Project from EU research framework programmes: *Scalable Structured Micro Illumination Light Engines (SMILE)*. 2022
- [8] PTB - Fachbereich 4.5 Angewandte Radiometrie: *Aufbau eines LED-basierten Solarmodulmessplatzes. PTB-Jahresbericht 2018 2023*
- [9] Santourian, I., Teichert, S., Hauer, K.-O. u. Schirmacher, A.: Investigation of the suitability of high-power LEDs for the use as radiation source for PTB's gonioreflectometer. *Lux junior 2019: 14. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs*, 06. - 08. September 2019, Ilmenau: *Tagungsband (2019)*, S. 43–50
- [10] Santourian, I., Teichert, S., Hauer, K.-O., Quast, T. u. Schirmacher, A.: Further development of an LED-based radiation source for goniometric spectral radiance factor measurements. *Lux junior 2021: 15. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs*, 04. – 06. Juni 2021, Ilmenau : *Tagungsband (2021)*, S. 255–263
- [11] Santourian, I., Quast, T., Teichert, S., Hauer, K.-O. u. Schirmacher, A.: Novel LED-based radiation source and its application in diffuse reflectometry and polarization measurements. *NEWRAD 2021 conference Proceedings. Journal of Physics: Conference Series 2149 (2022) 1*, S. 12010
- [12] Santourian, I., Quast, T. u. Schirmacher, A.: Uncertainty budget for PTB's gonioreflectometers and ways to improve it in the short VIS spectral range. *Metrologia* 59 (2022) 2, S. 25004
- [13] *ISO/IEC Guide 98:1993 Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). first edition 1993; corrected, reprinted and supplemented several times, latest reissue.*
https://infostore.saiglobal.com/en-us/standards/iso-iec-guide-98-1993-586203_saig_iso_iso_1342561/, abgerufen am: 16.01.2022
- [14] Fermum, L.: LED illumination, 2022. <https://www.vision-doctor.com/en/illumination-types/led-illumination.html>, abgerufen am: 30.01.2022

- [15] Miyasaka, K., Shelley, K., Takahashi, S., Kubota, H., Ito, K., Yoshiya, I., Yamanishi, A., Cooper, J. B., Steward, D. J., Nishida, H., Kiani, J., Ogino, H., Sata, Y., Kopotic, R. J., Jenkin, K., Hannenberg, A. u. Gawande, A.: Tribute to Dr. Takuo Aoyagi, inventor of pulse oximetry. *Journal of anesthesia* 35 (2021) 5, S. 671–709
- [16] Anton Paar: Modulares Kreispolarmeter: MCP : Anton-Paar.com, 2022. <https://www.anton-paar.com/de-de/produkte/details/mcp-510053005500-modulare-kreispolarmeter/>, abgerufen am: 30.01.2022
- [17] Amano, H., Collazo, R., Santi, C. de, Einfeldt, S., Funato, M., Glaab, J., Hagedorn, S., Hirano, A., Hirayama, H., Ishii, R., Kashima, Y., Kawakami, Y., Kirste, R., Kneissl, M., Martin, R., Mehnke, F., Meneghini, M., Ougazzaden, A., Parbrook, P. J., Rajan, S., Reddy, P., Römer, F., Ruschel, J., Sarkar, B., Scholz, F., Schowalter, L. J., Shields, P., Sitar, Z., Sulmoni, L., Wang, T., Wernicke, T., Weyers, M., Witzigmann, B., Wu, Y.-R., Wunderer, T. u. Zhang, Y.: The 2020 UV emitter roadmap. *Journal of Physics D: Applied Physics* 53 (2020) 50, S. 503001
- [18] Kneissl, M., Kolbe, T., Chua, C., Kueller, V., Lobo, N., Stellmach, J., Knauer, A., Rodriguez, H., Einfeldt, S., Yang, Z., Johnson, N. M. u. Weyers, M.: Advances in group III-nitride-based deep UV light-emitting diode technology. *Semiconductor Science and Technology* 26 (2011) 1, S. 14036
- [19] NobelPrize.org: The Nobel Prize in Physics 2014, 2022. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2014/summary/>, abgerufen am: 23.01.2022
- [20] Muramoto, Y., Kimura, M. u. Nouda, S.: Development and future of ultraviolet light-emitting diodes: UV-LED will replace the UV lamp. *Semiconductor Science and Technology* 29 (2014) 8, S. 84004
- [21] Desinfektion durch Hochleistungs UV-LEDs | RECOM, 2022. <https://recom-power.com/de/rec-n-uv-leds-for-disinfection-167.html?0>, abgerufen am: 31.01.2022
- [22] VERORDNUNG (EU) 2019/2020 DER KOMMISSION vom 1. Oktober 2019 zur Festlegung von Ökodesign-Anforderungen an Lichtquellen und separate Betriebsgeräte gemäß der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 244/2009, (EG) Nr. 245/2009 und (EU) Nr. 1194/2012 der Kommission. EUR-Lex - 32019R2020 - DE - EUR-Lex
- [23] DELEGIERTE VERORDNUNG (EU) 2019/2015 DER KOMMISSION vom 11. März 2019 zur Ergänzung der Verordnung (EU) 2017/1369 des Europäischen Parlaments und des Rates in Bezug auf die Energieverbrauchskennzeichnung von Lichtquellen und zur Aufhebung der Delegierten Verordnung (EU) Nr. 874/2012 der Kommission. EUR-Lex - 32019R2015 - EN - EUR-Lex
- [24] Deutsche Gesellschaft für wirtschaftliche Zusammenarbeit: Lichtquellen: Neue Ökodesign-Richtlinie - DGWZ, 2021. <https://www.dgwz.de/ineffiziente-leuchtmittel>, abgerufen am: 06.02.2022

- [25] Mills, A.: Solid state lighting — a world of expanding opportunities at LED 2002. III-Vs Review 16 (2003) 1, S. 30–33
- [26] Manikandan, M., Nirmal, D., Ajayan, J., Mohankumar, P., Prajooon, P. u. Arivazhagan, L.: A review of blue light emitting diodes for future solid state lighting and visible light communication applications. Superlattices and Microstructures 136 (2019), S. 106294
- [27] Krames, M. R., Shchekin, O. B., Mueller-Mach, R., Mueller, G. O., Zhou, L., Harbers, G. u. Craford, M. G.: Status and Future of High-Power Light-Emitting Diodes for Solid-State Lighting. Journal of Display Technology 3 (2007) 2, S. 160–175
- [28] Sandhu, A.: The future of ultraviolet LEDs. Nature Photonics 1 (2007) 1, S. 38
- [29] DIN 5030-2:1982-09, *Spektrale Strahlungsmessung; Strahler für spektrale Strahlungsmessungen; Auswahlkriterien*
- [30] Erb, Wolfgang (Hrsg.): Leitfaden der Spektroradiometrie. INSTAND-Schriftenreihe, Bd. 6. Berlin: Springer 1989
- [31] Gobrecht, H., Eichler, H.-J., Bergmann, L. u. Schaefer, C.: Optik. Zum Gebrauch bei Akademischen Vorlesungen und zum Selbststudium ; Band 3: Optik. Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 3. Berlin, Boston: De Gruyter 1978
- [32] FAKSIMILE AUS DEN VERHANDLUNGEN DER DEUTSCHEN PHYSIKALISCHEN GESELLSCHAFT 2 (1900) S. 237: Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum; von M. Planck. Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum von M. Planck. Physik Journal 4 (1948) 4, S. 146–151
- [33] Dohlus, R.: Lichtquellen. De Gruyter Studium. Berlin: De Gruyter 2015
- [34] Herwig, H. u. Moschallski, A.: Wärmeübertragung. Physikalische Grundlagen – Illustrierende Beispiele – Übungsaufgaben mit Musterlösungen. SpringerLink Bücher. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2009
- [35] Hoffmann, D.: 100 Jahre Quantenphysik: Schwarze Körper im Labor: Experimentelle Vorleistungen für Plancks Quantenhypothese. Physik Journal 56 (2000) 12, S. 43–47
- [36] Sze, S. M., Li, Y. u. Ng, K. K.: Physik der Halbleiterbauelemente. Berlin: WILEY VCH 2022
- [37] Khanna, V. K.: Fundamentals of Solid-State Lighting. LEDs, OLEDs, and Their Applications in Illumination and Displays. Boca Raton: CRC Press 2017
- [38] ROUND, H. J.: A Note on Carborundum. In: Sze, S. M. (Hrsg.): Semiconductor devices. Pioneering papers. Singapore, Teaneck, N.J.: WORLD SCIENTIFIC 1991, S. 879
- [39] Mbeusseune, A.: Wirtschaftlichkeit von LED-Leuchten. Methode zum Vergleich von LED-Leuchten und Leuchten mit Leuchtstofflampen. Hamburg: Diplomica Verlag 2015
- [40] Nakamura, S.: Nobel Lecture: Background Story of the Invention of Efficient Blue InGaN Light Emitting Diodes (2014)
- [41] Nakamura, S., Iwasa, N., Senoh, M. u. Mukai, T.: Hole Compensation Mechanism of P-Type GaN Films. Japanese Journal of Applied Physics 31 (1992) Part 1, No. 5A, S. 1258–1266

- [42] Shionoya, S. (Hrsg.): Phosphor handbook. The CRC Press laser and optical science and technology series. Boca Raton, FL: CRC Press 1999
- [43] Yen, W. M.: Phosphor handbook. CRC Press laser and optical science and technology series, Bd. 21. Boca Raton: CRC 2007
- [44] Sze, S. M. (Hrsg.): Semiconductor devices. Pioneering papers. Singapore, Teaneck, N.J.: WORLD SCIENTIFIC 1991
- [45] Lu, G., Yang, S. u. Huang, Y.: Analysis on failure modes and mechanisms of LED. In: 8th International Conference 2009, S. 1237–1241
- [46] van Driel, W. D. (Hrsg.): Solid State Lighting Reliability. Components to Systems. Solid State Lighting Technology and Application Series, Bd. 1. New York, NY: Springer New York 2013
- [47] Glaab, J., Ploch, C., Kelz, R., Stölmacker, C., Lapeyrade, M., Ploch, N. L., Rass, J., Kolbe, T., Einfeldt, S., Mehnke, F., Kuhn, C., Wernicke, T., Weyers, M. u. Kneissl, M.: Degradation of (InAlGa)N-based UV-B light emitting diodes stressed by current and temperature. *Journal of Applied Physics* 118 (2015) 9, S. 94504
- [48] Meneghini, M., Barbisan, D., Rodighiero, L., Meneghesso, G. u. Zanoni, E.: Analysis of the physical processes responsible for the degradation of deep-ultraviolet light emitting diodes. *Applied Physics Letters* 97 (2010) 14, S. 143506
- [49] Ruschel, J.: Ursachen der stromgetriebenen Degradation von UV-LEDs, Eric Cuvillier Dissertation. Göttingen
- [50] Mukai, T., Morita, D., Yamamoto, M., Akaishi, K., Matoba, K., Yasutomo, K., Kasai, Y., Sano, M. u. Nagahama, S.: Investigation of optical-output-power degradation in 365-nm UV-LEDs. *Physica Status Solidi (C) Current Topics in Solid State Physics* 3 (2006) 6, S. 2211–2214
- [51] Sawyer, S., Rumyantsev, S. L. u. Shur, M. S.: Degradation of AlGaIn-based ultraviolet light emitting diodes. *Solid-State Electronics* 52 (2008) 6, S. 968–972
- [52] Braunschweig, T. U.: Epitaxy Competence Center - ec 2, 2022. <https://www.tu-braunschweig.de/iht/epitaxy-competence-center-ec2/vorstellung>, abgerufen am: 10.08.2022
- [53] Park, J.-S., Kim, J. K., Cho, J. u. Seong, T.-Y.: Review—Group III-Nitride-Based Ultraviolet Light-Emitting Diodes: Ways of Increasing External Quantum Efficiency. *ECS Journal of Solid State Science and Technology* 6 (2017) 4, Q42-Q52
- [54] 6. Defekte in Kristallen (Realstrukturen). In: Bohm, J., Klimm, D., Mühlberg, M., Winkler, B. u. Kleber, W. (Hrsg.): Einführung in die Kristallographie. De Gruyter Studium. Berlin: De Gruyter 2021, S. 444–488
- [55] Bohm, J., Klimm, D., Mühlberg, M., Winkler, B. u. Kleber, W. (Hrsg.): Einführung in die Kristallographie. De Gruyter Studium. Berlin: De Gruyter 2021
- [56] Brendel, M.: Charakterisierung und Optimierung von (Al, Ga)N-basierten UV-Photodetektoren, 2016

- [57] Glaab, J.: Untersuchung der Degradation von InAlGaN-basierten ultravioletten Leuchtdioden zur Verbesserung der Zuverlässigkeit, 2019
- [58] Iveland, J., Martinelli, L., Peretti, J., Speck, J. S. u. Weisbuch, C.: Direct measurement of Auger electrons emitted from a semiconductor light-emitting diode under electrical injection: identification of the dominant mechanism for efficiency droop. *Physical Review Letters* 110 (2013) 17, S. 177406
- [59] Kuball, M., Ľapajna, M., Simms, R. J., Faqir, M. u. Mishra, U. K.: AlGaIn/GaN HEMT device reliability and degradation evolution: Importance of diffusion processes. *Microelectronics Reliability* 51 (2011) 2, S. 195–200
- [60] Puzyrev, Y. S., Roy, T., Beck, M., Tuttle, B. R., Schrimpf, R. D., Fleetwood, D. M. u. Pantelides, S. T.: Dehydrogenation of defects and hot-electron degradation in GaN high-electron-mobility transistors. *Journal of Applied Physics* 109 (2011) 3, S. 34501
- [61] Puzyrev, Y. S., Tuttle, B. R., Schrimpf, R. D., Fleetwood, D. M. u. Pantelides, S. T.: Theory of hot-carrier-induced phenomena in GaN high-electron-mobility transistors. *Applied Physics Letters* 96 (2010) 5, S. 53505
- [62] Meneghesso, G., Verzellesi, G., Danesin, F., Rampazzo, F., Zanon, F., Tazzoli, A., Meneghini, M. u. Zanoni, E.: Reliability of GaN High-Electron-Mobility Transistors: State of the Art and Perspectives. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability* 8 (2008) 2, S. 332–343
- [63] Meneghini, M., Tazzoli, A., Mura, G., Meneghesso, G. u. Zanoni, E.: A Review on the Physical Mechanisms That Limit the Reliability of GaN-Based LEDs. *IEEE Transactions on Electron Devices* 57 (2010) 1, S. 108–118
- [64] Manyakhin, F., Kovalev, A. u. Yunovich, A. E.: Aging Mechanisms of InGaIn/AlGaIn/GaN Light-Emitting Diodes Operating at High Currents. *MRS Internet Journal of Nitride Semiconductor Research* 3 (1998) 1, S. 1–6
- [65] Gong, Z., Gaevski, M., Adivarahan, V., Sun, W., Shatalov, M. u. Asif Khan, M.: Optical power degradation mechanisms in AlGaIn-based 280nm deep ultraviolet light-emitting diodes on sapphire. *Applied Physics Letters* 88 (2006) 12, S. 121106
- [66] Shatalov, M., Gong, Z., Gaevski, M., Wu, S., Sun, W., Adivarahan, V. u. Khan, M. A.: Reliability of AlGaIn-based deep UV LEDs on sapphire. *Light-Emitting Diodes: Research, Manufacturing, and Applications X*. SPIE Proceedings. SPIE 2006, 61340P
- [67] *DIN 5031-10:2018-03, Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik_ - Teil_10: Photobiologisch wirksame Strahlung, Größen, Kurzzeichen und Wirkungsspektren*
- [68] Meyer, A. E. H. u. Seitz, E. O.: Ultraviolette Strahlen. Ihre Erzeugung, Messung und Anwendung in Medizin, Biologie und Technik. Berlin, Boston: De Gruyter 1949
- [69] Zollner, C. J., DenBaars, S. P., Speck, J. S. u. Nakamura, S.: Germicidal ultraviolet LEDs: a review of applications and semiconductor technologies. *Semiconductor Science and Technology* 36 (2021) 12, S. 123001

- [70] Torrance, K. E. u. Sparrow, E. M.: Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces*. *Journal of the Optical Society of America* 57 (1967) 9, S. 1105
- [71] Manolakis, D. G., Lockwood, R. B. u. Cooley, T. W.: Hyperspectral imaging remote sensing. Physics, sensors, and algorithms. Cambridge: Cambridge University Press 2016
- [72] Oleari, C. u. Simone, G.: Standard colorimetry. Definitions, algorithms, and software. Society of dyers and colourists. Chichester, West Sussex: John Wiley 2016
- [73] Wyszecki, G.: Color science. Concepts and methods, quantitative data and formulae. A Wiley-Interscience publication. New York, Chichester: Wiley 2001
- [74] Germer, T., Zwinkels, J. C. u. Tsai, B. K.: Spectrophotometry: Accurate Measurement of Optical Properties of Materials. ISSN. Elsevier Science 2014
- [75] Berns, R. S.: Principles of color technology. Hoboken, NJ: Wiley Copyright 2019
- [76] 1978-07. *DIN 5036-1:Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien; Begriffe, Kennzahlen*. <https://www.beuth.de/de/norm/din-5036-1/505970>, abgerufen am: 16.01.2022
- [77] *ASTM E2387-19 Practice for Goniometric Optical Scatter Measurements*
- [78] Radiometric and photometric characteristics of materials and their measurement | CIE. Technical report / CIE CIE 038-1977, Commission Internationale de l'Éclairage, 1977
- [79] e.g. the scientific programs xDReflect (<https://xdreflect.eu>), BiRD ([https://birdproject.eu/u/references/bibliography on white standard](https://birdproject.eu/u/references/bibliography%20on%20white%20standard)) and BxDiff (<https://bxdiff.cmi.cz/>)
- [80] Georgiev, G. T. u. Butler, J. J.: BRDF study of gray-scale Spectralon. *Earth Observing Systems XIII. SPIE Proceedings*. SPIE 2008, S. 708107
- [81] Höpe, A., Hauer, K.-O., Bergner, P. u. Ziegler, T.: BRDF measurements at 254 nm for the LISA Pathfinder satellite mission. Abstract Booklet. In: NEWRAD 2014
- [82] Korte, H. u. Schmidt, M.: Über Messungen des Leuchtdichtefaktors an beliebig reflektierenden Proben. *Lichttechnik* 19 , 135A-137A. 1967
- [83] Höpe, A.: Diffuse Reflectance and Transmittance. Volume 46, Chapter 6, Pages 179-219. 2014
- [84] CMC- Datenbank vom BIPM. BIPM : Bureau International des Poids et Mesures CMC : Calibration and Measurement Capabilities, 2023. <https://www.bipm.org/kcdb/>, abgerufen am: 25.01.2023
- [85] Hünenhoff, D., Grusemann, U. u. Höpe, A.: New robot-based gonireflectometer for measuring spectral diffuse reflection. *Metrologia*, BIPM and IOP Publishing Ltd 43 (2006), S. 1
- [86] Hauer, K.-O. u. Höpe, A.: High-grade uniform light source for radiometric and photometric applications. *MAPAN* 24 (2009) 3, S. 175–182
- [87] Höpe, A., Atamas, T., Hünenhoff, D., Teichert, S. u. Hauer, K.-O.: ARGon3: "3D appearance robot-based gonireflectometer" at PTB. *The Review of scientific instruments* 83 (2012) 4, S. 45102

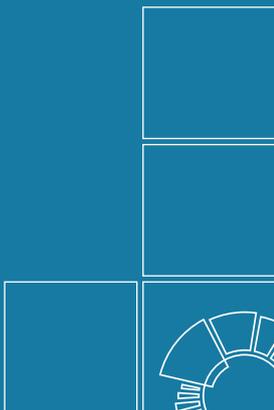
- [88] Quast, T., Hauer, K.-O. u. Schirmacher, A.: Polarization effects in diffuse reflectance measurements - comparison of white standards and special-effect pigment samples. 4th CIE Expert Symposium on Colour and Visual Appearance 2016
- [89] Quast, T., Schirmacher, A., Hauer, K.-O. u. Koo, Anette: Polarization properties and microfacet-based modelling of white, grey and coloured matte diffuse reflection standards. *J. Phys.*, IOP Publishing Conf. Ser. 972 (2018)
- [90] Quast, T. u. Schirmacher, A.: BRDF and polarisation - pitfalls and how to avoid them. Online Tutorial: 5th CIE Expert Symposium on Colour and Visual Appearance 2020
- [91] Cooksey, C. C., Nadal, M. E., Allen, D. W., Hauer, K.-O. u. Höpe, A.: Bidirectional reflectance scale comparison between NIST and PTB. *Applied optics* 54 (2015) 13, S. 4006
- [92] Erb, W.: High-Accuracy Gonioreflectance Spectrometry at the PTB. In: Burgess, C. u. Mielenz, K. D. (Hrsg.): *Advances in Standards and Methodology in Spectrophotometry*. Analytical Spectroscopy Library, Bd. 2. Elsevier 1987, S. 87–98
- [93] Strothkämper, C., Ferrero, A., Koo, A., Jaanson, P., Ged, G., Obein, G., Källberg, S., Audenaert, J., Leloup, F. B., Martínez-Verdú, F. M., Perales, E., Schirmacher, A. u. Campos, J.: Multilateral spectral radiance factor scale comparison. *Applied optics* 56 (2017) 7, S. 1996–2006
- [94] PTB - Arbeitsgruppe 4.51 Reflexion und Transmission: Animierte Grafiken von Reflexionsverteilungen - PTB.de, 2021. <https://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt4/fb-45/ag-451/animierte-grafiken-von-reflexionsverteilungen.html>, abgerufen am: 06.01.2023
- [95] Tatsiana, A., Hauer, K.-O. u. Höpe, A.: Appearance Measurements of Goniochromatic Colours. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Appearance*. Edinburgh, UK, April 2012
- [96] Nadal, M. E. u. Early, E. A.: Color measurements for pearlescent coatings. *Color Research & Application* 29 (2004) 1, S. 38–42
- [97] Mähringer, A., Döblinger, M., Hennemann, M., Gruber, C., Fehn, D., Scheurle, P. I., Hosseini, P., Santourian, I., Schirmacher, A., Rotter, J. M., Wittstock, G., Meyer, K., Clark, T., Bein, T. u. Medina, D. D.: An Electrically Conducting Three-Dimensional Iron-Catecholate Porous Framework. *Angewandte Chemie (International ed. in English)* 60 (2021) 33, S. 18065–18072
- [98] Schönherr, M. I., Scheurle, P. I., Frey, L., Martínez-Abadía, M., Döblinger, M., Mähringer, A., Fehn, D., Gerhards, L., Santourian, I., Schirmacher, A., Quast, T., Wittstock, G., Bein, T., Meyer, K., Mateo-Alonso, A. u. Medina, D. D.: An electrically conducting 3D coronene-based metal-organic framework. *Journal of materials chemistry. A* 12 (2024) 17, S. 10044–10049
- [99] Shitomi, H. u. Saito, I.: Photoluminescence from white reference materials for spectral diffuse reflectance measurements upon exposure to radiation shorter than 400 nm. *Metrologia*, BIPM and IOP Publishing 43 (2006), S. 36
- [100] Pons, A. u. Campos, J.: Spectrophotometric error in colour coordinates introduced by fluorescence of white calibration tile. *Color Research & Application* 29 (2004) 2, S. 111–114

- [101] VERORDNUNG (EG) Nr.244/2009 DER KOMMISSION vom 18. März 2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Haushaltslampen mit ungebündeltem Licht. EUR-Lex - - EN - EUR-Lex
- [102] Erb, Wolfgang u. Mücke, Leopold: Ein Strahler hoher und über eine große Fläche gleichmäßiger Leuchtdichte. PTB Mitteilung (1972)
- [103] Santourian, I., Teichert, S., Schirmacher, A., Quast, T. u. Hauer, K.-O.: Construction and characterization of a high-power UV-LED module as radiation source for goniometric spectral radiance factor measurements. [Vortrag]. ICULTA - The International Conference on UV LED Technologies & Applications 2021
- [104] Labsphere, Inc.: Spectralon® Reflectance Standards Care and Handling Guidelines. <https://www.labsphere.com/wp-content/uploads/2021/09/Spectralon-Standards-Care-and-Handling-Guidelines.pdf>, abgerufen am: 31.01.2023
- [105] Erb, Wolfgang u. Nikolaus, K.-P.: Untersuchungen der Abhängigkeit des Strahldichtefaktors diffus angestrahlter Reflexionsnormale vom Abstrahlungswinkel. PTB Mitteilung 4 (1997), S. 210
- [106] Woolliams, E. R., Baribeau, R., Bialek, A. u. Cox, M. G.: Spectrometer bandwidth correction for generalized bandpass functions. *Metrologia* 48 (2011) 3, S. 164–172
- [107] Gardner, J. L.: Bandwidth correction for LED chromaticity. *Color Research & Application* 31 (2006) 5, S. 374–380
- [108] Schinke, C., Pollex, H., Hinken, D., Wolf, M., Bothe, K., Kröger, I., Nevas, S. u. Winter, S.: Calibrating spectrometers for measurements of the spectral irradiance caused by solar radiation. *Metrologia* 57 (2020) 6, S. 65027
- [109] Effect of instrumental bandpass function and measurement interval on spectral quantities. Technical report / CIE CIE 214 2014, Commission Internationale de l'Éclairage, Vienna 2014
- [110] Clarke, F., Garforth, F. A. u. Parry, D. J.: Goniophotometric and polarization properties of white reflection standard materials. *Lighting Research & Technology* 15 (1983) 3, S. 133–149
- [111] Calderón, A., Ferrero, A. u. Campos, J.: Accounting for polarization-related effects in the measurement of the bidirectional reflectance distribution function. *Metrologia* 57 (2020) 4, S. 45003
- [112] Zdenek, S.: Recent Developments in the Study of the Polarization of Sky Light. In: *Advances in Geophysics Volume 3. Advances in Geophysics*, Bd. 3. Elsevier 1956, S. 43–104
- [113] Fröhling, R. u. Andrä, H. J.: Observation of Na I inner shell-excited quartet terms. *Physics Letters A* 97 (1983) 9, S. 375–376
- [114] Santourian, I. u. Schirmacher, A.: Information on fluorescence measurements in goniometric geometry 45°:0°. CCPRK5-2017-Key Comparison. 2021

- [115] Wiora, G.: Optische 3D-Messtechnik : Präzise Gestaltvermessung mit einem erweiterten Streifenprojektionsverfahren, Heidelberg University Library 2001
- [116] Experimental Analysis of BRDF Models, Ngan, A., Durand, F. u. Matusik, W., 2005
- [117] Mescheder, L.: Differentialgeometrische Betrachtung eines Roboterbasierten Gonioreflektometers. Braunschweig 2013
- [118] *DIN 5033 Farbmessung - Teil_1 bis 10*
- [119] Wissenschaftliches Programm: xDReflect: xD Reflect | MULTIDIMENSIONAL REFLECTOMETRY FOR INDUSTRY, 2022. <https://www.xdreflect.eu/>, abgerufen am: 16.01.2022
- [120] Santourian, I., Teichert, S., Hauer, K.-O., Quast, T. u. Schirmacher, A.: Development, implementation and validation of a high-power LED-based radiation source for goniometric spectral radiance factor measurements. [Poster]. NEWRAD 2021. 2021
- [121] Quast, T., Santourian, I., Hauer, K.-O. u. Schirmacher, A.: Polarization effects in diffuse reflection measurements at the transition between the UV-A and VIS spectral range. [Poster]. NEWRAD 2021. 2021
- [122] Wypych, G. (Hrsg.): Handbook of UV degradation and stabilization. Toronto: ChemTec Pub 2011
- [123] Wypych, G. (Hrsg.): Handbook of UV degradation and stabilization. Toronto: ChemTec Publishing 2015
- [124] Wypych, G.: Handbook of UV degradation and stabilization. Toronto: ChemTec Publishing 2020
- [125] Ketola, W. D. u. Grossman, D. (Hrsg.): Accelerated and outdoor durability testing of organic materials. ASTM STP 1202. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials 1994
- [126] Beyer, M., Bäurich, C. u. Fischer, K.: Mechanismen der licht-und wärmeinduzierten Vergilbung von Faserstoffen. Das Papier. 1995
- [127] Letnar, M. Č. u. Vančina, V. K.: The Effect of Accelerated Ageing on Graphic Paperboards Degradation. Restaurator 23 (2002) 2, S. 118–132
- [128] *DIN ISO 12040:1998-01, Druck- und Reproduktionstechnik - Drucke und Druckfarben - Bestimmung der Lichtechtheit mit gefiltertem Xenon-Bogenlicht (ISO_12040:1997)*
- [129] *DIN EN ISO 105-B01:2014-12, Textilien - Farbechtheitsprüfungen - Teil_B01: Farbechtheit gegen Licht: Tageslicht (ISO_105-B01:2014); Deutsche Fassung EN_ISO_105-B01:2014*
- [130] *DIN EN ISO 105-B02:2014-11, Textilien - Farbechtheitsprüfungen - Teil_B02: Farbechtheit gegen künstliches Licht: Xenonbogenlicht (ISO_105-B02:2014); Deutsche Fassung EN_ISO_105-B02:2014*
- [131] Fogra Forschungsinstitut für Medientechnologien e.V: Fogra forscht, prüft, zertifiziert. 2025. <https://fogra.org/>, abgerufen am: 23.02.2025

- [132] Kramer, J. B.: Fluorescent Whitening Agents. In: Detergents. Springer, Berlin, Heidelberg 1992, S. 351–366
- [133] Internationale Beleuchtungskommission: Improvement to industrial colour-difference evaluation. Technical report / CIE, Bd. 142. Vienna: CIE Central Bureau 2001
- [134] Sharma, G., Wu, W. u. Dalal, E. N.: The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations. *Color Research & Application* 30 (2005) 1, S. 21–30
- [135] Meade, M. L.: Lock-in amplifiers. Principles and applications. Electrical measurement series, Bd. 1. London: P. Peregrinus 1983
- [136] Michels, W. C. u. Curtis, N. L.: A Pentode Lock-In Amplifier of High Frequency Selectivity. *Review of Scientific Instruments* 12 (1941) 9, S. 444–447
- [137] Gupta, M. S. (Hrsg.): Electrical noise. Fundamentals & sources. IEEE Press selected reprint series. New York: IEEE Press 1977
- [138] Vasilescu, G.: Electronic Noise and Interfering Signals. Principles and Applications. Signals and Communication Technology. [New York]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005
- [139] Zurich Instruments: White Paper: Principles of lock-in detection and the state of the art, 2016
- [140] Zurich Instruments: Lock-in Verstärker, 2019. <https://www.zhinst.com/europe/de/lock-in-amplifiers>, abgerufen am: 22.07.2023
- [141] Yang, L., Hu, J. u. Shin, M. W.: Dynamic Thermal Analysis of High-Power LEDs at Pulse Conditions. *IEEE Electron Device Letters* 29 (2008) 8, S. 863–866
- [142] Zurich Instruments: UHF-BOX Boxcar Averager Option, 2019. <https://www.zhinst.com/europe/de/products/uhf-box-boxcar-averager?from=UHFLI>, abgerufen am: 22.07.2023
- [143] Osram Licht AG: 64663 HLX | OSRAM PIA, 2024. https://www.osram.de/ecat/Halogen-Niedervoltlampen%20ohne%20Reflektor-Halogen-Niedervoltlampen-Halogenlampen-Industrie-Spezialbeleuchtung/de/de/GPS01_1028526/ZMP_56131/, abgerufen am: 08.01.2024
- [144] Osram Licht AG: 64664 HLX | OSRAM PIA, 2024. https://www.osram.de/ecat/Halogen-Niedervoltlampen%20ohne%20Reflektor-Halogen-Niedervoltlampen-Halogenlampen-Industrie-Spezialbeleuchtung/de/de/GPS01_1028526/ZMP_1006951/, abgerufen am: 08.01.2024
- [145] Roithner Laser Technik GmbH: Roithner Lasertechnik - High Power Multi Chip LEDs, TO Package, 2023. http://www.roithner-laser.com/led_highmulti_to.html, abgerufen am: 08.01.2024
- [146] Intelligent LED Solutions: ILH-XU01-S380-SC211-WIR200. | Intelligent LED SMD UV-LED 390nm / 5500 → 6500mW, Dom 140° 4 Pin | RS, 2024. <https://de.rs-online.com/web/p/uv-leds/8251565>, abgerufen am: 08.01.2024
- [147] LedEngin Inc: LZ4 LuxiGen™ UV LED Emitters - ams OSRAM | Mouser, 2024. <https://www.mouser.de/new/ams-osram/led-engin-lz4-led-emitters/>, abgerufen am: 15.01.2024

- [148] Nichia: Product Search LED | NICHIA CORPORATION, 2024. https://led-ld.nichia.co.jp/en/product/led_search.html?ledsearch=true&type=NVSU233B, abgerufen am: 08.01.2024
- [149] BOLB: S6060 SMD – Bolb Inc, 2024. <https://bolb.co/smd6060/>, abgerufen am: 08.01.2024
- [150] LG Innotek Co., Ltd. and Laser Components Germany GmbH: UVB LEDs mit Leistungen bis zu 300 mW, 2024. <https://www.lasercomponents.com/de/news/uvb-leds-mit-leistungen-bis-zu-300-mw/>, abgerufen am: 08.01.2024
- [151] Cree LED: Document Library - Cree LED <https://docs.rs-online.com/e23d/0900766b814709f5.pdf>, 2022. https://www.cree-led.com/document-library/?_document_search=XH%20Family, abgerufen am: 10.01.2024
- [152] LED Microsensor NT LLC: Light Emitting Diode Models, 2023. <http://lmsnt.com/leds1600-5000/models/#LED2>, abgerufen am: 08.01.2024



Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

ISNI: 0000 0001 2186 1887

Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Bundesallee 100

38116 Braunschweig

Telefon: (05 31) 592-93 21

Telefax: (05 31) 592-92 92

www.ptb.de