

Lichtquellen und deren Darstellung von niedrigen und hohen Beleuchtungsstärken für die Kalibrierung von Photometern

Till Schwarznecker, Maatje Hilmer, Johannes Ledig

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig
till.schwarznecker@ptb.de

Abstract

Die Realisierung der SI-Basiseinheiten ist eine der Hauptaufgaben der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB). Die Einheit der Lichtstärke wird dabei mit Normallampen dargestellt und bewahrt. Eine davon abgeleitete essenzielle Messgröße ist die photometrische Empfindlichkeit von Detektoren (Photometern). Diese wird für die Weitergabe der Lichtstärke mithilfe von Substitutionsverfahren benötigt.

Ein Photometerkopf besteht typischerweise aus einer Silizium-Photodiode, welche das auftreffende Licht erfasst und in einen elektrischen Strom umwandelt. Über einen integrierten $V(\lambda)$ -Filter, bestehend aus mehreren Schichten Farbglass, wird dabei die relative spektrale Empfindlichkeit des Detektors an die des menschlichen Auges (eines Normbeobachters) angepasst. Die Komponenten eines Photometers sind häufig thermostatisiert, da dadurch die Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur erheblich verringert wird.

Mithilfe eines Beleuchtungsstärke-Photometers lässt sich die Beleuchtungsstärke auf dessen Referenzebene bestimmen. Mit dem dazugehörigen Abstand zur Lichtquelle kann daraus über das photometrische Entfernungsgesetz die Lichtstärke ermittelt werden. Häufig haben Photometer ein zugehöriges Anzeigegerät, das den Photostrom in Ampere oder eine Beleuchtungsstärke in Lux anzeigt. Die Kalibrierung solcher Photometer ist eine der Aufgaben der Arbeitsgruppe 4.12 Lichtstärkeneinheit der PTB.

Um ein Photometerkopf zu kalibrieren, kann eine photometrische Empfindlichkeit in A/lx angegeben werden, die beschreibt, wie viel Photostromstärke pro Beleuchtungsstärke erzeugt wird. Alternativ können auch die Anzeigewerte bei bestimmten Beleuchtungsstärken im Kalibrierschein angegeben werden. Dabei wird meist eine große Spannweite an zu berichtenden Beleuchtungsstärken angefragt, damit in der Anwen-



derung zwischen diesen Werten interpoliert werden kann, um ebenfalls eine photometrische Empfindlichkeit in Skalenteile pro Beleuchtungsstärke für das Gerät zu bestimmen.

Das reguläre Leistungsangebot der PTB deckt dabei die Kalibrierung von Photometern bei Beleuchtungsstärken von 1 mlx bis 10 klx bezogen auf Glühlampenlicht ab. Die Erzeugung dieser unterschiedlichen Beleuchtungsstärken kann nur mit einer passenden Auswahl von Lichtquellen realisiert werden. Daneben gibt es weitere Aspekte, die bei den Lichtquellen zu beachten sind: Stabilität der Lichtquelle, Homogenität der räumlichen Lichtverteilung und die ausgestrahlte Lichtart (d.h. relative Spektralverteilung). In diesem Tagungsbeitrag werden unterschiedliche Typen und Arten von Glühlampen betrachtet und auf die genannten Eigenschaften untersucht.

In Zukunft soll in der PTB eine Lichtquelle basierend auf freistrahrenden Hochleistungs-LEDs eingesetzt werden, die für die Kalibrierung über einen großen Dynamikbereich mit Beleuchtungsstärken bis 10 klx oder höher verwendet werden kann. Dazu werden in diesem Beitrag erste Ansätze gezeigt, sowie Vorteile und Herausforderungen der Kalibrierverfahren bei Einsatz solcher LED erörtert.

1 Einleitung

Eine der Hauptaufgaben der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) ist die Realisierung der SI-Basiseinheiten. Unter anderem die Länge, die Masse, Zeit und die Lichtstärke. Die Einheit der Lichtstärke wird von der Arbeitsgruppe 4.12 „Lichtstärkeinheit“ dargestellt und bewahrt. Eine davon abgeleitete essenzielle Messgröße ist die photometrische Empfindlichkeit von Detektoren (Photometern). Diese wird für die Weitergabe der Lichtstärke mithilfe von dem Substitutionsverfahren benötigt.

Mit einem Beleuchtungsstärke-Photometer lässt sich mit der photometrischen Empfindlichkeit die Beleuchtungsstärke auf dessen wirksamer Referenzebene bestimmen. Mit dem dazugehörigen Abstand zur Lichtquelle kann daraus über das photometrische Entfernungsgesetz die Lichtstärke ermittelt werden. Die Kalibrierung solcher Photometer ist ebenfalls eine der Aufgaben der Arbeitsgruppe 4.12.

Das reguläre Leistungsangebot der PTB deckt dabei die Kalibrierung von Photometern bei Beleuchtungsstärken von 1 mlx bis 10 klx bezogen auf Glühlampenlicht ab. Die Erzeugung dieser unterschiedlichen Beleuchtungsstärken kann nur mit einer passenden Auswahl von Lichtquellen realisiert werden. Bei einer geeigneten Lichtquelle muss dabei auf einige Aspekte geachtet werden: Stabilität der Lichtquelle, Homogenität der räumlichen Lichtverteilung und die ausgestrahlte Lichtart (d.h. relative Spektralverteilung). In diesem Tagungsbeitrag werden unterschiedliche Typen und Arten von Glühlampen betrachtet und auf die genannten Eigenschaften untersucht sowie ein alternativer Ansatz mittels einer farbigen LED vorgestellt.

2 Grundlagen

2.1 Photometerkopf

Ein Photometerkopf besteht typischerweise aus einer Silizium-Photodiode, welche das auftreffende Licht erfasst und in einen elektrischen Strom umwandelt. Über einen integrierten $V(\lambda)$ -Filter, bestehend aus mehreren Schichten Farbglass, wird dabei die relative spektrale Empfindlichkeit des Detektors an die des menschlichen Auges (eines Normbeobachters) angepasst. Bei manchen Detektoren ist vor dem Filterglas ein diffuses Element (z.B. mattes Glas) angebracht, welches die Winkelabhängigkeit der spektralen Empfindlichkeit stark reduziert. Weiterhin unterscheiden sich Photometerköpfe mechanisch in der Art der Lichteintrittsöffnung, je nach Verwendung kann damit der mögliche Eintrittswinkel des Photometerkopf sowie die Winkelabhängigkeit der photometrischen Empfindlichkeit angepasst werden. In Abbildung 1 ist schematisch der Aufbau eines Photometerkopfes zu sehen.

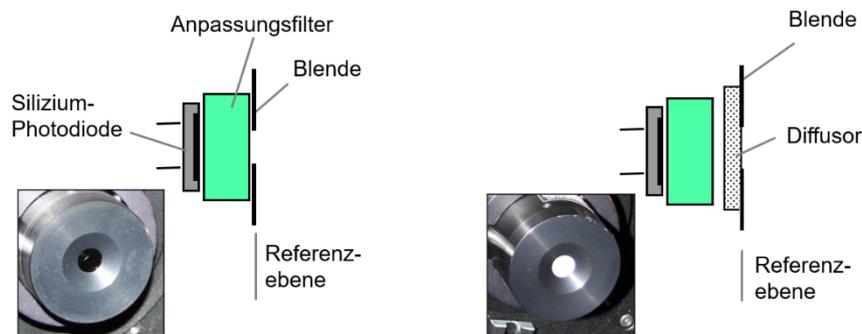


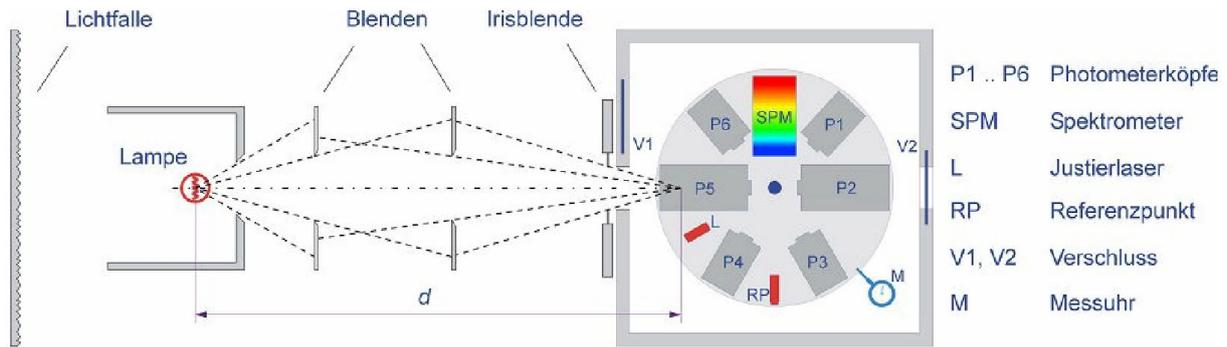
Abbildung 1: Aufbau Photometerkopf^[6]

Die Komponenten eines Photometers sind häufig thermostatisiert, da dadurch die Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur erheblich verringert wird.

2.2 Messaufbau- und verfahren der PTB

In der PTB werden Messungen und Kalibrierung von gerichteten photometrischen Größen am Messplatz Photometerbank durchgeführt. Diese besitzt eine definierte optische Achse, in der Photometer und Lichtquelle ausgerichtet werden können. Durch eine rotierende Platte auf der Empfängerseite können unterschiedliche Photometer nacheinander in diese optische Achse gefahren werden.

Ein wichtiger Aspekt der Photometerbank ist die Möglichkeit, den Abstand d zwischen Empfänger und Lichtquelle variieren zu können, um das Abstandquadratgesetz zwischen der Lichtstärke und der Beleuchtungsstärke zu überprüfen.

Abbildung 2: Messaufbau PTB – Einheit der Lichtstärke^[6]

2.3 Kalibrierung von Photometern

Bei einer Kalibrierung eines Photometers wird i.d.R. mittels Substitutionsverfahren gearbeitet. Dabei wird die wirksame Referenzebene des zu kalibrierenden Photometers und die des Referenzphotometers kurz nacheinander am selben Ort positioniert und der jeweilige Photostrom bzw. die jeweilige Anzeige aufgenommen. Das Referenzphotometer ist dabei auf das nationale Normal der Lichtstärke rückgeführt.

Als Ergebnis der Kalibrierung können unterschiedliche Werte berichtet werden. Es kann eine photometrische Empfindlichkeit in A/lx angegeben werden, die beschreibt, wie viel Photostromstärke pro Beleuchtungsstärke erzeugt wird. Alternativ können auch die Anzeigewerte bei bestimmten Beleuchtungsstärken im Kalibrierschein angegeben werden. Dabei wird meist eine große Spannweite an zu berichtenden Beleuchtungsstärken angefragt, damit in der Anwendung zwischen diesen Werten interpoliert werden kann, um ebenfalls eine photometrische Empfindlichkeit in Skalenteile pro Beleuchtungsstärke für das Gerät zu bestimmen.

Um diese große Spannweite an Beleuchtungsstärken zu erzeugen, werden unterschiedliche Lichtquellen benötigt. Im nächsten Abschnitt werden diese Lichtquellen vorgestellt, und darauf eingegangen, welche Eigenschaften sie haben.

3 Lichtquellen

3.1 Einleitung und Vorstellung der wichtigen Eigenschaften von Lichtquellen

Für die Kalibrierung von Photometern können nur Lichtquellen mit bestimmten Eigenschaften verwendet werden. Diese Eigenschaften werden in diesem Teil vorgestellt.

Die Homogenität der räumlichen Lichtverteilung der Lichtquelle ist eine dieser wichtigen Eigenschaften. Die Lichtquelle muss über eine hinreichend große Fläche, im Bereich von mehreren cm^2 , eine homogene Lichtverteilung ausstrahlen. Bei der Kalibrierung von Photometern gibt es meistens Unterschiede in der Bauform, den Vorsätzen (zur Anpassung der Winkelabhängigkeit) und der Größe der Eintrittsöffnung. Durch eine inhomogene Beleuchtung würden die Photometer mit unterschiedlichen

mittleren Beleuchtungsstärken bestrahlt werden, wodurch das oben genannte Substitutionsverfahren nur bei identischen Photometern anwendbar wäre.

Eine weitere Eigenschaft ist die Stabilität der Lichtquelle. Bei dem Substitutionsverfahren wird das Photometer und das Referenzphotometer nacheinander am selben Ort ausgerichtet und jeweils die Beleuchtungsstärke aufgenommen. Bei instabilen Lichtquellen würde durch diesen kleinen Zeitversatz zwischen den Messungen ein Unterschied im Messergebnis entstehen. Dadurch ist es vor allem wichtig, dass die Lichtquelle zumindest für die Dauer des Transfers eine hohe Stabilität aufweist.

In der Photometrie wird eine Kalibrierung der photometrischen Empfindlichkeit in der Regel auf die Normlichtart A referenziert, deren Spektralverteilung einer Verteilungstemperatur von 2856 K entspricht. Wenn die Verteilungstemperatur T nicht der Normlichtart A entspricht, wird über einen spektralen Korrekturfaktor $F(T) = \left(\frac{T}{T_A}\right)^m$ [7], welcher dem Photometer zugewiesen wird, das absolute Ergebnis korrigiert. Wenn der Lichtquelle keine Verteilungstemperatur zugeordnet werden kann, muss das Ergebnis durch Relativmessungen oder die spektralen Daten auf die Normlichtart A korrigiert werden. Dies ist nicht ohne höheren Aufwand und zusätzlichen Messungen möglich.

Weiterhin ist die Handhabung der Lichtquelle, sowie der benötigte Aufwand beim Betrieb der Lichtquelle ein wichtiger Aspekt. Zum Beispiel wird bei einem aufwändigen Aufbau der Lichtquellen mehr Zeit in Anspruch genommen, die dem Kunden in Rechnung gestellt werden muss.

3.2 Vorstellung der verwendeten Lichtquellen

Im Folgenden werden unterschiedliche Lichtquellen vorgestellt, deren Eckdaten betrachtet und auf die oben benannten Eigenschaften eingegangen. Im Normalfall werden die Lichtquellen mit Gleichstrom und einem konstanten Strom betrieben, die Ausnahme bildet hier der Scheinwerfer, welcher mit 220V Wechselspannung betrieben wird. Das LN3-Normal wird über das dazugehörige Versorgungsgerät betrieben.

3.3 LN3

- Lichtquelle: LN3 – Leuchtdichte-Normal
- Hersteller: LMT Lichtmesstechnik GmbH Berlin
- Verwendete Beleuchtungsstärke: bis ca. 10 lx

Lampen vom Typ LN3 dienen vorwiegend als Leuchtdichte-Normal. Dieses besteht aus einer Ulbricht-Kugel mit einem Durchmesser von ca. 25 cm und einer Streuscheibe als Lichtaustrittsfenster mit einem Durchmesser von etwa 70 mm sowie einer Quarzglas-Halogenglühlampe, die das Innere der Kugel beleuchtet. Über eine interne Regelung mittels der DC-Lampenstromstärke wird die Beleuch-

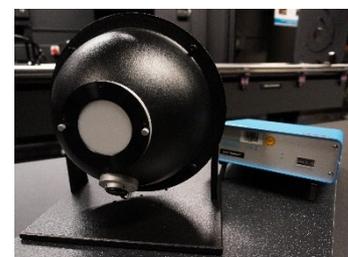


Abbildung 3:
LN3-Normal von LMT

tungsstärke auf der Kugelwand aktiv stabilisiert. Die Ausleuchtung ist durch die Vielfachreflexion in der Ulbrich-Kugel sehr homogen. Die Lampe ist durch die interne Regelung stabil und weist eine mittlere Leuchtdichte in der Größenordnung von 1000 cd/m^2 auf. Mit dem LN3-Leuchtdichtenormal kann an der Photometerbank durch Variation von Abstand sowie Größe (Raumwinkel) der leuchtenden Fläche eine Beleuchtungsstärke zwischen 3 mlx und 10 lx erzeugt werden.

3.4 WI41/G

- Lichtquelle: WI41/G – Lichtstärke-Normallampe
- Hersteller: OSRAM GmbH
- Verwendete Beleuchtungsstärke: bis ca. 50 lx
- Versorgung: etwa 6 A , 31 V ^[1]

Die Lampe vom Typ OSRAM WI41/G ist eine gasgefüllte Glühlampe für wissenschaftliche Zwecke und das meistverwendete Lichtstärke-Normal in der Arbeitsgruppe 4.12. Das Normal besteht aus einem konischen Glaskolben, der eine halbseitige, lichtundurchlässige Maske mit einem Fenster von etwa 8 cm^2 hat. Der Leuchtkörper besteht aus einem Filament das mäanderförmig in einer Ebene angeordnet ist.



Abbildung 4: WI41/G

Eine inhomogene räumliche Lichtverteilung könnte bei Lampen dieses Typen durch Reflexionen im Glaskolben auftreten. Durch das begrenzende Lampenfenster und die konische Form des Kolbens werden diese Reflexionen jedoch vermieden sowie der Einfluss des Lampenhintergrunds begrenzt. Die räumliche Lichtverteilung auf der benötigten Fläche zur Ausleuchtung der zu kalibrierenden Photometer ist homogen. Die Stabilität wird anhand der Lampenspannung überwacht sowie durch regelmäßige Zusatzmessung kontrolliert und ist bei den verwendeten Lampen gegeben. Die Lampen werden bei einer Verteilungstemperatur von 2856 K betrieben, diese Spektralverteilung entspricht näherungsweise der Normlichtart A. Mit der WI41/G kann an der Photometerbank eine Beleuchtungsstärke bis zu 50 lx erreicht werden.

3.5 FEL

- Lichtquelle: FEL – Quarzglas-Halogenglühlampe
- Hersteller: OSRAM GmbH
- Verwendete Beleuchtungsstärke: bis ca. 2000 lx
- Versorgung: etwa $8,5 \text{ A}$, 115 V ^[3]

Die FEL-Lampe ist eine Halogenglühlampe mit einem zylindrischen Quarzglaskolben, der Leuchtkörper besteht aus einer spiralförmig angeordneten Doppelwendel. In der Arbeitsgruppe 4.12 ist diese Lampe jeweils fest in einem Spezialsockel fixiert. Sie wird als Verteilungstemperatur-Normal verwendet sowie für die Erzeugung von Beleuchtungsstärken bis ca. 2000 lx . Die räumliche

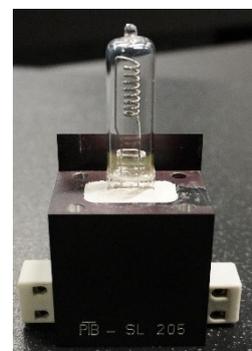


Abbildung 5:
FEL-Lampe mit
Spezialsockel

Lichtverteilung der Lampe ist homogen und die Lichtstärke bleibt für die Messdauer stabil und wird anhand der Lampenspannung und zusätzlichen Messungen überwacht. Für die Erzeugung von hohen Beleuchtungsstärken wird dieser Lampentyp bei einer Verteilungstemperatur von bis zu 3200 K betrieben. Die Ergebnisse können allerdings anhand des spektralen Korrektorexponenten m auf die Normlichtart A korrigiert werden.

3.6 20kW-Lampe

- Lichtquelle: Halogenglühlampe
- Hersteller: OSRAM GmbH
- Verwendete Beleuchtungsstärke: bis ca. 10 klx
- Nennleistung: 20 kW^[2]

Diese Halogenlampe besteht aus einem Glaskolben mit einer in einer Ebene angeordneten Wendel als Leuchtkörper und ist aktuell die in der Arbeitsgruppe 4.12 verwendete Lichtquelle, um Beleuchtungsstärken bis zu 10 klx zu erzeugen. Auch hier ist die räumliche Lichtverteilung in Ausstrahlrichtung homogen. Die Halogenlampe wird in einem aktiv gekühlten Lampenhaus betrieben, trotzdem steigt die Temperatur der Lampe bzw. deren Umgebung stetig. Aus diesem Grund verändert sich die Beleuchtungsstärke nach einiger Zeit im Betrieb. Für die Dauer zwischen Messung von Referenzphotometer und Kalibrierobjekt bleibt die Lampe ausreichend stabil. Für die Messung bei einer Beleuchtungsstärke von 10 klx wird die Lampe mit einer Verteilungstemperatur von ca. 3100 K betrieben, die Ergebnisse müssen somit ebenfalls auf die Normlichtart A korrigiert werden.



Abbildung 6:
20 kW-Lampe

3.7 Scheinwerfer

- Lichtquelle: Scheinwerfer mit Glühlampe
- Hersteller: Jupiterlicht
- Verwendete Beleuchtungsstärke: bis ca. 50 klx
- Versorgung: 220 V, 2000 W

Eine in der Arbeitsgruppe 4.12 eher selten betriebene Lichtquelle ist ein Scheinwerfer basierend auf einer Halogenglühlampe. Mit diesem können Beleuchtungsstärken bis zu 50 klx erzeugt werden.

Der Scheinwerfer hat vor seiner Glühlampe eine optische Stufenlinse, wodurch Photometer aus einem vergrößerten Raumwinkel und etwas inhomogen ausgeleuchtet werden. Der Scheinwerfer erhitzt sich während des Betriebs, wodurch Probleme bei der Stabilität entstehen können. Weiterhin hat der Scheinwerfer eine sehr große Öffnung, sodass man bei Messungen nur große Messabstände wählen kann. Das Leuchtmittel des Scheinwerfers ist eine Glühlampe, wodurch eine Verteilungstemperatur zugeordnet werden kann.



Abbildung 7:
Theater-Scheinwerfer

4 Hochleistungs-LED als Lichtquelle

4.1 Aufbau

In der Arbeitsgruppe 4.12 wird an einer neuen Lichtquelle gearbeitet. Dabei soll die Lichtquelle über eine Hochleistungs-LED vom Typ OSTAR® Projection Power von OSRAM Opto Semiconductors GmbH realisiert werden, welche in Abbildung 8 zu sehen ist. Das untersuchte LED-Modul LE CG P3AQ besteht aus 6 blauen LED Dies, deren Emission durch einen davor angeordneten Konverter-Leuchtstoff hocheffizient in grünes Licht umgewandelt wird. Die Spektralverteilung der Emission hat eine Halbwertsbreite von etwa 100 nm und ähnelt stark dem Verlauf der $V(\lambda)$ -Kurve. Die leuchtende Fläche von 13 mm² ist von einem weißen Rahmen von etwa 1 cm² umgeben^{[5][6]}.



Abbildung 8: Foto der Hochleistungs-LED LE CG P3AQ

Es gibt zwei unterschiedliche Varianten des LED-Moduls. Bei der älteren Variante LE CG P3A 01 sind die Kathoden der einzelnen Dies elektrisch verbunden und die LEDs in zwei Strängen parallel verschaltet. Dabei kann der LED-Chip mit maximal 30 A durchflossen werden, wobei sich eine Betriebsspannung von etwa 3,35 V ergibt. Dieser Aufbau hat einige Nachteile: Die LEDs werden aufgrund der leicht unterschiedlichen Sensitivitäten gegenüber der Betriebstemperatur ggf. nicht mit derselben Stromstärke durchflossen, was zu unterschiedlichen Helligkeiten der LED führen könnte. Zusätzlich stellt die Versorgung ein Problem dar, weil ein Versorgungsgerät für 30 A benötigt wird.

Bei einer neueren Variante LE CG P3AQ sind die Dies in Reihe verschaltet. Dieses löst die benannten Schwierigkeiten. Mit einem Nennstrom von bis zu 10 A und einer Spannung von 21 V lässt sich dieser Typ deutlich einfacher betreiben und z.B. kann das für eine FEL-Lampe verwendete Versorgungsgeräte genutzt werden. Dabei werden alle LEDs mit derselben Stromstärke durchflossen. Aus diesen Gründen werden die weiteren Messungen und Überlegungen mit der neuen Variante durchgeführt.

Für die ersten Messungen wird die LED auf einem einfachen Kühlkörper mit einer aktiven Luftkühlung befestigt. Dieser wird benötigt, da durch die hohe in der LED umgesetzte elektrische Leistung Wärme entsteht und die Effizienz der LED erheblich von deren Temperatur abhängt. Der Kühlkörper wurde auf einem Lampenwagen montiert und die LED auf der Photometerbank ausgerichtet.

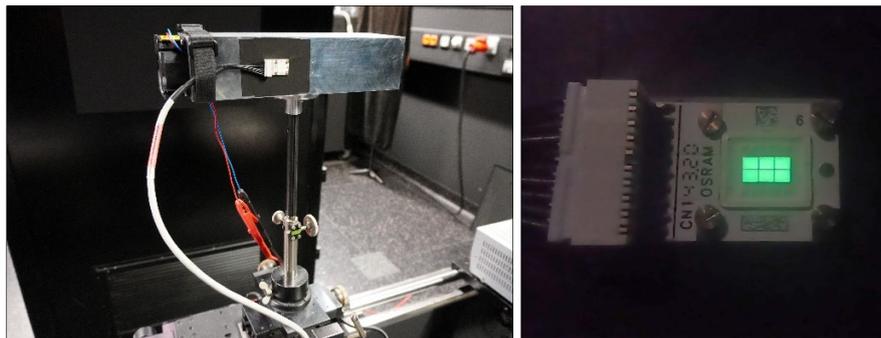


Abbildung 9: Foto von Aufbau und Halterung der Hochleistungs-LED LE CG P3AQ

4.2 Messungen mit der Hochleistungs-LED

Bei der ersten Messung wird schrittweise der Lampenstrom erhöht und die Beleuchtungsstärke betrachtet. Weiterhin wird die Temperatur mit einer Wärmebildkamera überprüft. Der Messabstand beträgt 1,5 m.

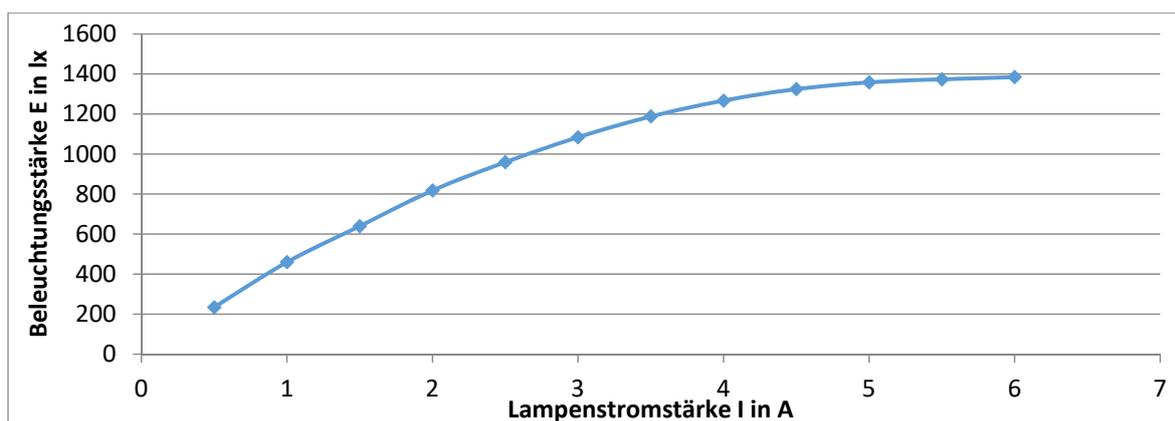


Abbildung 10: Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit von der Lampenstromstärke

Bei einem Lampenstrom von 6 A wird in einem Abstand von 1,5 m eine Beleuchtungsstärke von 1384,5 lx erreicht. Die Temperatur der LED wurde bei einem Lampenstrom über 6 A zu hoch, daher wurde die Stromstärke an dieser Stelle nicht weiter erhöht. Es ist allerdings zu erkennen, dass die Steigung abnimmt. Das heißt, dass bei einem höheren Lampenstrom die Beleuchtungsstärke nur leicht ansteigt und die Effizienz abnimmt. Bei einer Erhöhung des Lampenstroms von 5,5 A auf 6 A, wird z.B. eine nur um 11,6 lx höhere Beleuchtungsstärke gemessen. Dies kann vorrangig auf die Zunahme der Temperatur zurückgeführt werden welche den Bereich der einstellbaren Lichtstärke auf etwa eine Größenordnung beschränkt.

Bei der nächsten Messung werden die Stabilität und Wiederholbarkeit der Beleuchtungsstärke in einem Abstand von 1,5 m bestimmt. Dazu wird die LED einer Lampenstromstärke von 4,5 A betrieben und es werden mit einem zeitlichen Abstand von ca. 5 Minuten Messwerte aufgenommen. Zudem wird die LED zwischenzeitig zweimal

ausgeschaltet, um zu testen, ob bei einem erneuten Betrieb eine ähnliche Beleuchtungsstärke zu erwarten ist. Um eine stabile Betriebstemperatur zu erreichen, wird die LED vor der ersten Messung jeweils 10 Minuten betrieben.

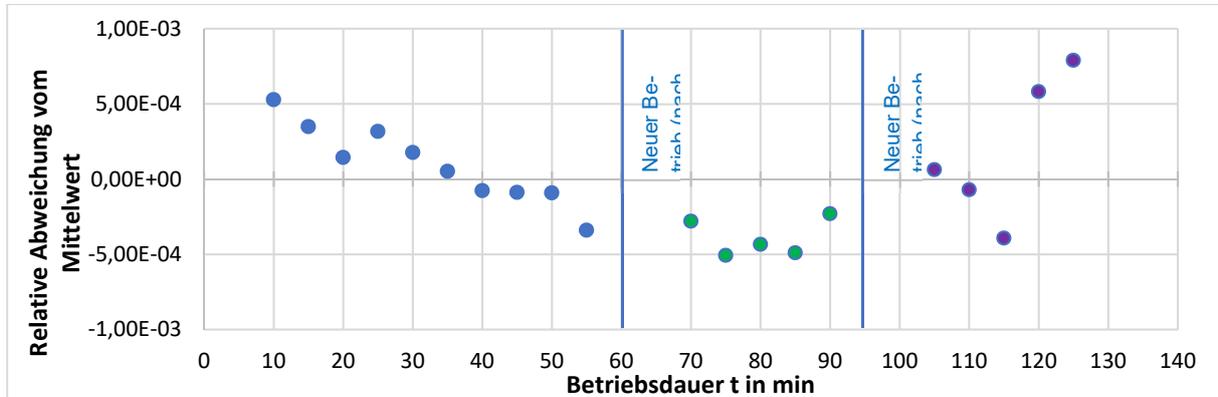


Abbildung 11: Stabilität und Wiederholbarkeit der LED über einen längeren Zeitraum

In Abbildung 11 ist die relative Abweichung zum Mittelwert der Messung zur Ermittlung der Stabilität und Wiederholbarkeit dargestellt. Die LED ist in einem Bereich von unter einem Promille über einen längeren Zeitraum sehr stabil. Selbst bei erneutem Betrieb der LED ergibt sich die Beleuchtungsstärke in einem Bereich eines Promilles. Es ist vorerst keine Alterung durch den Betrieb zu sehen. Über eine Alterung außerhalb des Betriebs kann zu diesem Zeitpunkt noch keine Aussage getroffen werden, dies wäre für den Einsatz im Substitutionsverfahren (statt als Normallampe) jedoch ohnehin kein signifikanter Aspekt. Als Nächstes wird die Beleuchtungsstärke bei unterschiedlichen Abständen gemessen und hinsichtlich dem photometrischen Entfernungsgesetz ausgewertet. Dabei wurde der Arbeitspunkt erneut bei einer Stromstärke von 4,5 A gewählt. Anhand der Betrachtung des Produkts aus Beleuchtungsstärke und Abstandsquadrat können systematische Fehler gegenüber dem photometrischen Entfernungsgesetz aufgezeigt werden.

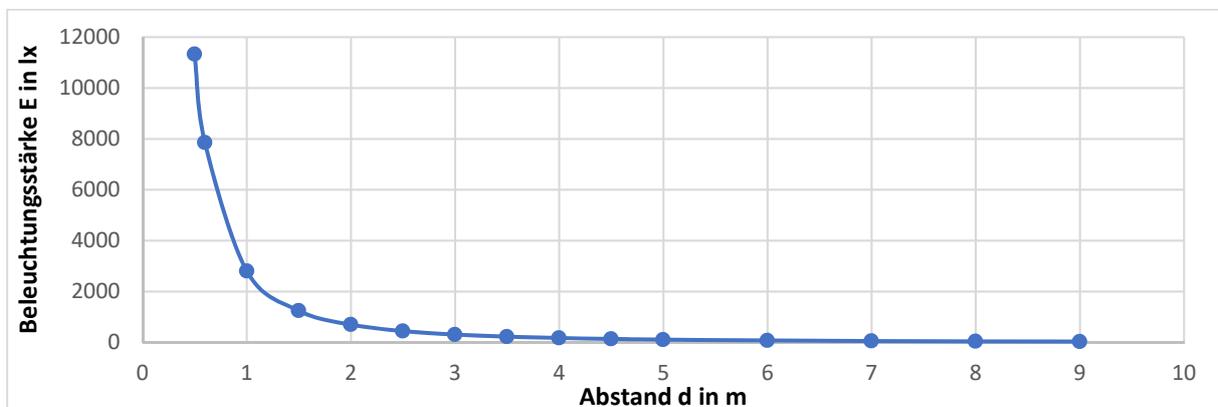


Abbildung 12: Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit vom Abstand

Abbildung 12 zeigt, dass eine Beleuchtungsstärke von über 10 klx bereits in einem Abstand von ca. 0,5 m erreicht werden kann.

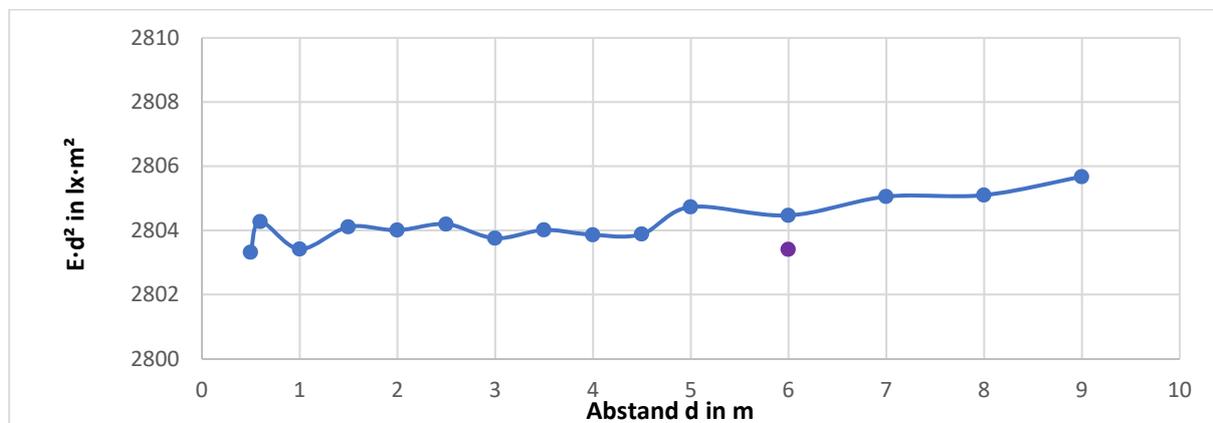


Abbildung 13: $E \cdot d^2$ Abhängigkeit vom Abstand

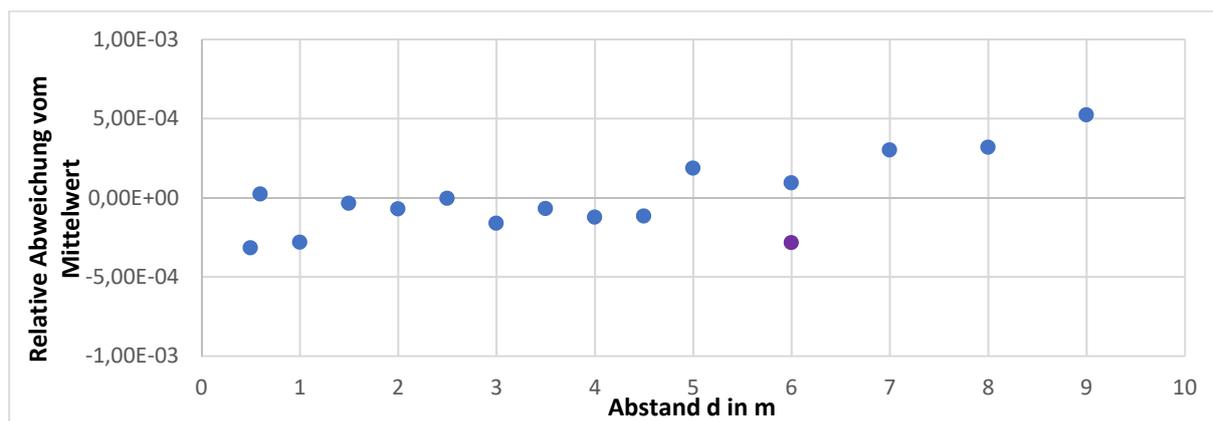


Abbildung 14 : $E \cdot d^2$ relative Abhängigkeit vom Abstand im Vergleich zum Mittelwert

In Abbildung 13 ist die Abhängigkeit des Produkts aus Beleuchtungsstärke und Abstandsquadrat der LED über den Abstand dargestellt. In Abbildung 15 sind die Werte aus Abbildung 14 als relative Abweichung zum Mittelwert über alle Messpunkte dargestellt. Die Werte sind optimal, wenn bei jedem Abstand das gleiche Ergebnis zu sehen ist. Die Abweichung zwischen den Werten liegt in einem Bereich von ca. einem Promille. Damit kann der Lichtquelle eine Lichtstärke-Eigenschaft zugeordnet werden.

Es ist allerdings ist Drift im zeitlichen Verlauf zu beobachten. Der Abstand wurde im Verlauf der Messreihe weiter reduziert, nach dem kleinsten Abstand wurde erneut bei 6 m gemessen (lila Punkt). Dies zeigt, dass die Stabilität die größte Einflussgröße ist, dominierend dafür ist in der gezeigten Messung die Temperaturstabilität, welche sich auch in der LED-Spannung zeigt.

Als letzten Punkt wird das Spektrum der LED betrachtet. In Abbildung 15 ist in blau das gemessene Spektrum der LED zu sehen, dabei wurde für die Messung ein Spektroradiometer BTS256-EF (Hersteller Gigahertz-Optik GmbH) verwendet. Die Messung entspricht dem für die LED spezifizierten Spektrum [5]. Zum Vergleich ist in orange die normierte $V(\lambda)$ -Kurve zu sehen.

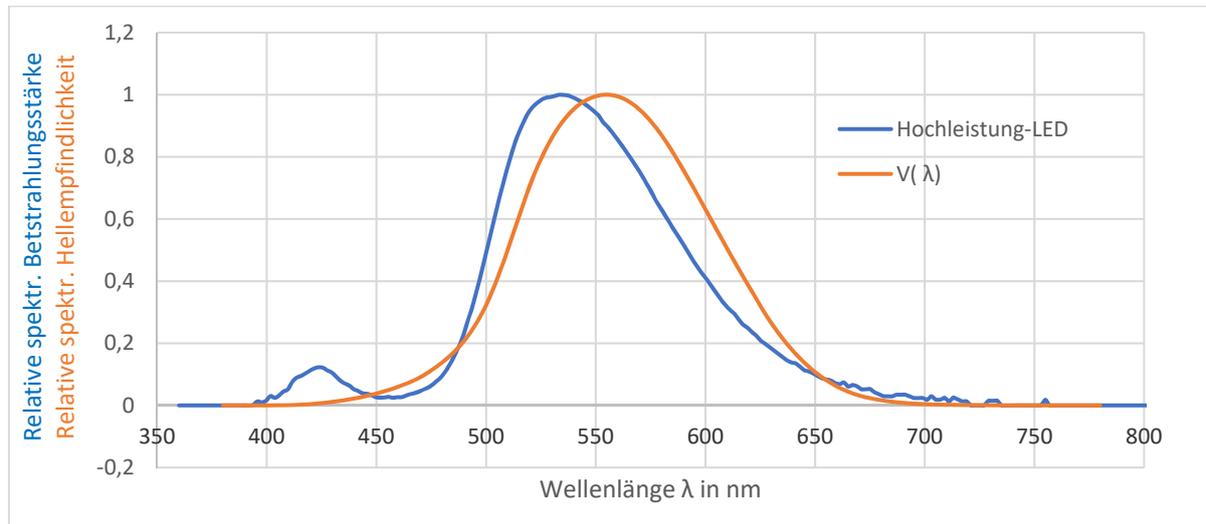


Abbildung 15: Spektrum der Hochleistungs-LED und $V(\lambda)$ -Kurve

Die Emission des grünen Lichtes der LED hat eine Halbwertsbreite von etwa 100 nm und entspricht aufgrund der Nähe zum Maximum der Hellempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ einer hohen Lichtausbeute. Zudem ist die Messung der Beleuchtungsstärke gegenüber einer direkt grünen LED breiteren Spektralverteilung weniger anfällig für monochromatische Effekte oder Interferenzen, z.B. innerhalb des Photometers. Da keine Spektralverteilung entsprechend Normlichtart A oder anderen weißen Lichtarten vorliegt kann diese LED jedoch nur für Relativmessungen bzw. nicht ohne genauere Betrachtung der spektralen Fehlanpassung verwendet werden. Mithilfe von zusätzlichen Messungen und Umrechnungen kann die LED später ggf. dennoch einen entsprechenden Zweck erfüllen.

5 Fazit

In der Arbeitsgruppe 4.12 besteht die Möglichkeit, mit den unterschiedlichsten Lichtquellen einen gewissen Beleuchtungsstärkebereich darzustellen. Der Bereich bis 2000 lx ist durch glühlampenbasierte Normallampen mit allen gewünschten Eigenschaften gut abgedeckt. Bei der Erzeugung von hohen Beleuchtungsstärken treten allerdings vermehrt Herausforderungen auf, die z.B. durch die hohe Abwärme, die elektrische Versorgung beim Betrieb der Lampe oder zusätzliche Optiken entstehen. Um Beleuchtungsstärken bis 10 klx mit weniger Aufwand bereitzustellen oder das

Leistungsangebot für die Kalibrierung von Photometern nach oben zu erweitern, werden alternativen Lichtquellen erprobt. Beispielhaft wurde dafür eine Hochleistungs-LED auf Stabilität, Wiederholbarkeit, Spektrum sowie dem photometrischen Entfernungsgesetz untersucht

Bei der LED-Alternative sind noch Fragen offen und weitere Anpassungen möglich. Zum einen gibt es noch Grenzen bei der Höhe der Beleuchtungsstärke. Die Lichtstärke der Hochleistungs-LED ist zu gering, um bei großen Abständen hohe Beleuchtungsstärken zu erreichen, jedoch werden Unsicherheiten des Abstands (z.B. die Lage der wirksamen Referenzebenen der beiden Photometer) bei kleinen Abständen signifikant und es treten ggf. anderen Schwierigkeiten, wie Streulicht und Rückreflexionen, auf. Die Lichtstärke der Lampe könnte durch eine leistungsfähigere Kühlung, die einen Betrieb bei höheren Stromstärken ermöglicht, sowie durch Vorsatz einer Linse erheblich erhöht werden.

Zudem müssen auch hinsichtlich der relativen Spektralverteilung der grünkonvertierten LED weitere Überlegungen und Messungen erfolgen. Das Substitutionsverfahren ermöglicht in Verbindung mit parallelen Messungen von Glühlampen ein Referenzieren auf Normlichtart A. Bei Verwendung von Abstandsänderungen zur Abdeckung eines großen Bereichs von Beleuchtungsstärken ist dabei allerdings auch die Winkelabhängigkeit berücksichtigten. Ebenso sind mögliche Unterschiede der Nichtlinearität gegenüber der Normlichtart A zu evaluieren, z.B. aufgrund Erwärmung von Komponenten des Photometers.

6 Referenzen

- [1] OSRAM GmbH, Produktdatenblatt WI WI 41/G, 2021
- [2] OSRAM GmbH, Produktdatenblatt 64818 20000 W 230 V, 2023
- [3] OSRAM GmbH, Produktdatenblatt 64743 1000 W 120 V, 19.06.2023
- [4] OSRAM Opto Semiconductors GmbH, OSRAM OSTAR® Projection Power, LE CG P3A 01, 30.06.2020
- [5] OSRAM Opto Semiconductors GmbH, OSRAM OSTAR® Projection Power, LE CG P3AQ, 15.07.2021
- [6] D. Lindner, A. Sperling, Photometer als Transfer-Normale zur Messung von sehr kleinen bis hin zu sehr hohen Beleuchtungsstärken, 2010, Lux Junior, Ilmenau
- [7] CIE 198-SP1.2:2011, Determination of measurement uncertainties in photometry, CIE - Commission internationale de l'Eclairage, Wien/Österreich