Ungefilterte Detektoren für LED-Photometrie – PhotoLED

Schneider, P., Sperling, A.
Fachbereich 4.1 Photometrie und angewandte Radiometrie
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, Germany
philipp.schneider@ptb.de

1 Einleitung

Photometer werden allgemein mit $V(\lambda)$-Anpassung gebaut, um die Hellempfindlichkeitsverteilung des menschlichen Auges zu berücksichtigen. Zur Kalibrierung dieser Empfänger werden meist Lichtverteilungen ähnlich der eines Planck'schen Strahler verwendet. Mit dem Aufkommen von LED-Beleuchtung werden die Messaufgaben häufig weiterhin mit den Photometern erfüllt, wobei neue Anforderungen an die Detektoren gestellt werden. Die Messung von einfarbigen LEDs mit begrenzter spektraler Bandbreite stellt ebenso wie die Verwendung von weißen LEDs eine Herausforderung dar. Um die Abweichung zwischen der Kalibrierung mit thermischen Strahlern (Glühlampen) und der LED Strahlung zu berücksichtigen, wird eine vollständige spektrale Fehlanpassungskorrektur notwendig. Insbesondere die bei LEDs auftretenden starken Gradienten in der spektralen Strahlungsfunktion führen zu erhöhten Messunsicherheiten. Im Rahmen des EURAMET European Metrology Programme for Innovation and Resarch (EMPIR) Projekts „PhotoLED" soll eine verbesserte Messinfrastruktur für LED-Produkte geschaffen werden. Dies soll unter anderem auf Basis von neuen LED-basierten Referenzlichtquellen, einer neuen LED-Lichtart und der Nutzung von ungefilterten Detektoren zur Kalibrierung von Photometern für LED-Lichtquellen geschehen.

2 Normlichtart A und Photometer

Die photometrische Empfindlichkeit von Photometern wird zurzeit immer bezüglich Normlichtart A berechnet. Diese entspricht der Strahlung eines Planckschen Strahlers mit einer Temperatur von 2856 K. Nur ein sehr geringer Anteil des Lichts liegt im kurzwelligen Bereich unterhalb von 450 nm und das Spektrum weist keinerlei starke Gradienten auf (siehe Abbildung 1). Auf Grund des Strahlungsmaximums um 1010 nm ist die Einschränkung der Empfindlichkeit durch die Filterung oberhalb von 700 nm bis zur Bandkante der Silizium-Photodioden von besonderer Bedeutung. Oberhalb dieser Wellenlänge ist der Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ niedriger als 1%, während die Empfindlichkeit der Photodiode weiterhin nahezu linear steigt.

Um den Unterschied zwischen der Empfindlichkeit eines Photometers und der definierten $V(\lambda)$-Kurve zu berücksichtigen, wird die Anpassungskorrektur $F(T_V)$ wie folgt berechnet [1]:

$$F(T_V) = \frac{\int_0^\infty S(\lambda, T_V) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty S(\lambda, T_V) \cdot s_{rel}(\lambda) d\lambda} ,$$

wobei $S(\lambda, T_V)$ die Strahlungsfunktion für die Verteilungstemperatur T_V darstellt, also T_V =2856 K für Normlichtart A, und $s_{rel}(\lambda)$ für die relative spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit des verwendeten Detektors steht.

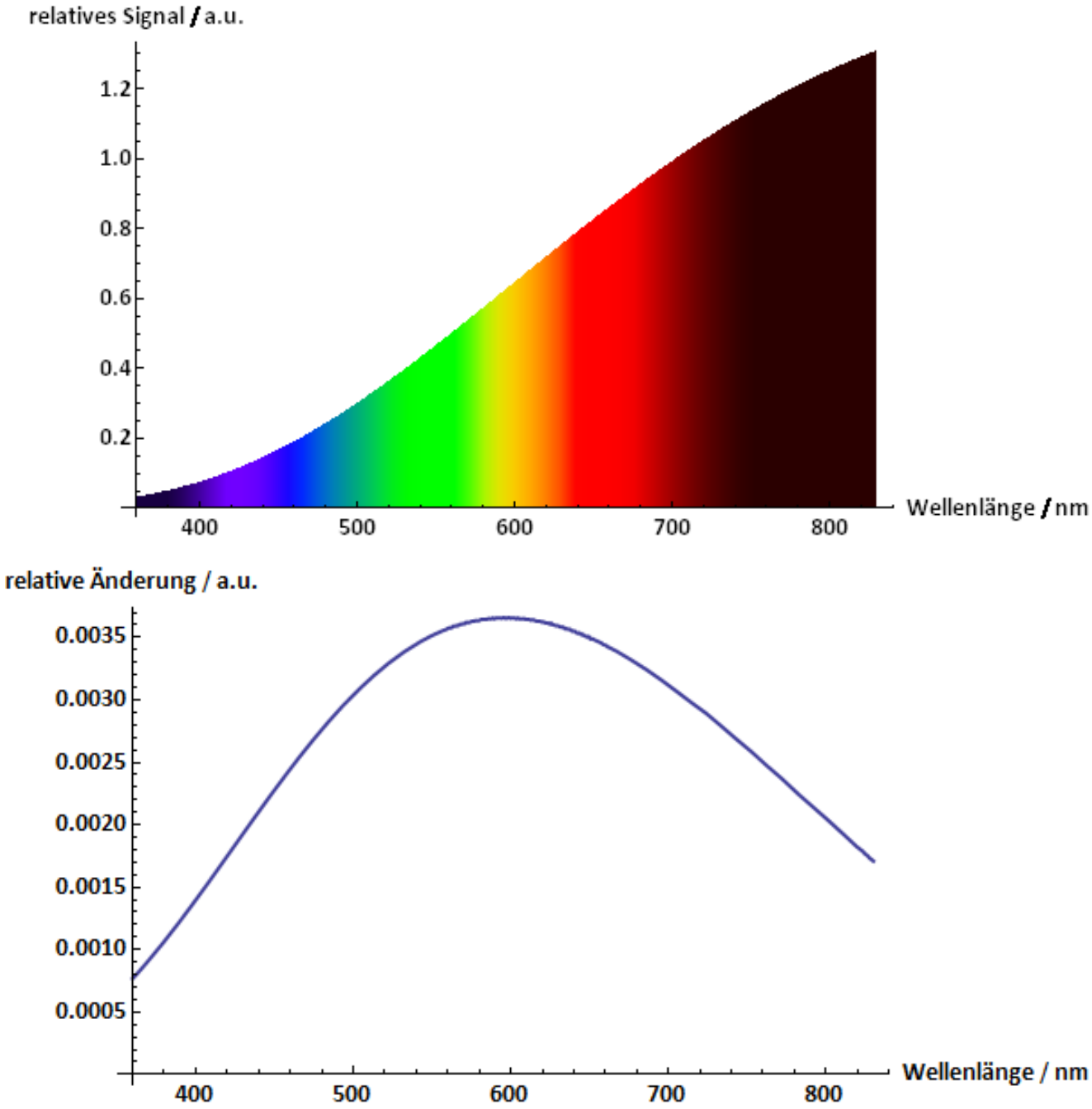

Abbildung 1: Ausschnitt der Strahlungsfunktion eines schwarzen Strahlers bei einer Temperatur von 2856K (oben) und die Ableitung der Strahlungsfunktion (unten) von 360 nm bis 830 nm

Dies führt direkt zur spektralen Fehlanpassungskorrektur c_{spek} für beliebige Quellenspektren $S_Z(\lambda)$, die sich aus der Anpassungskorrektur wie folgt berechnet:

$$c_{spek} = \frac{F(S_Z(\lambda))}{F(T_A)} = \frac{\int_0^\infty S_Z(\lambda) \cdot V(\lambda)\mathrm{d}\lambda}{\int_0^\infty S_Z(\lambda) \cdot s_{rel}(\lambda)\mathrm{d}\lambda} \Big/ \frac{\int_0^\infty S(\lambda, T_A) \cdot V(\lambda)\mathrm{d}\lambda}{\int_0^\infty S(\lambda, T_A) \cdot s_{rel}(\lambda)\mathrm{d}\lambda}$$

Bei der Berechnung der spektralen Fehlanpassungskorrektur kommt es durch starke Gradienten in den Empfindlichkeitskurven der Detektoren oder in den Strahlungsfunktionen der Lichtquellen zu einer Steigerung der Messunsicherheit. Die Messung der Wellenlängen der spektralen Verläufe, sowie die Bandbreite mit der diese gemessen wurden, sollten in der Messunsicherheit berücksichtigt werden. Das Spektrum und dessen Gradienten einer typischen weißen LED sind in Abbildung 2 dargestellt.

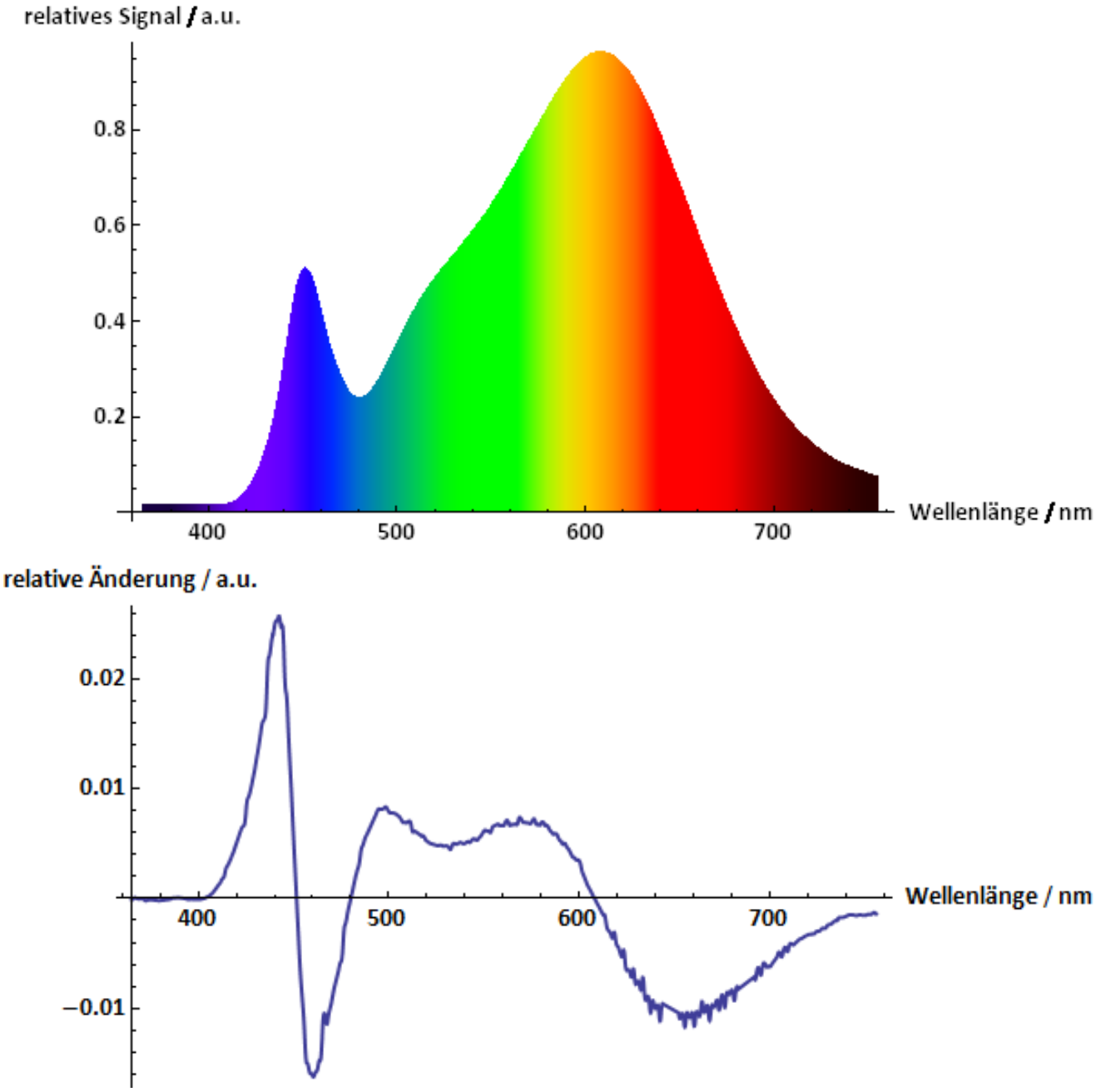

Abbildung 2: Strahlungsfunktion einer weißen LED (oben) und deren Ableitung (unten)

3 PhotoLED Referenzlichtart und Lichtquellen

Das Projekt „PhotoLED“, das von einem Konsortium aus europäischen nationalen Metrologieinstituten und Firmen bearbeitet wird, stellt sich derzeit die Aufgabe, eine neue

Messrückführungskette basierend auf LED-Lichtquellen zu etablieren, die unabhängig von der Normlichtart A ist. Die Festlegung einer oder mehrerer neuer Lichtarten als Referenz für die Kalibrierung von Photometern wird hierzu diskutiert. Basierend auf dem Spektrum von weißen LEDs sollen diese Referenzen gezielt für die Photometrie an LED-Lichtquellen genutzt werden. Dies senkt die Notwendigkeit einer spektralen Fehlanpassungskorrektur und kann so zu einer Reduzierung der Messunsicherheit bei der Allgemeinbeleuchtung um mehr als die Hälfte führen.

Ergänzend werden in dem Projekt auch neue Lichtstärke- und Lichtstromnormale entwickelt, welche einerseits auf LED-Basis der neuen Referenzlichtart möglichst nahekommen bzw. mittels LED-Lichtquellen den vollständigen $V(\lambda)$-Bereich abdecken sollen. Diese können dann auch für die Bestimmung der Lichtausbeute von LED-Lichtquellen genutzt werden.

4 Ungefilterte und gefilterte Detektoren

Ungefilterte Detektoren auf Basis von Silizium-Photodioden werden bereits seit langem als Transferdetektoren für spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit und spektrale Strahlungsleistungsempfindlichkeit in der Radiometrie eingesetzt. In Abbildung 3 ist die spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit eines solchen Detektors dargestellt.

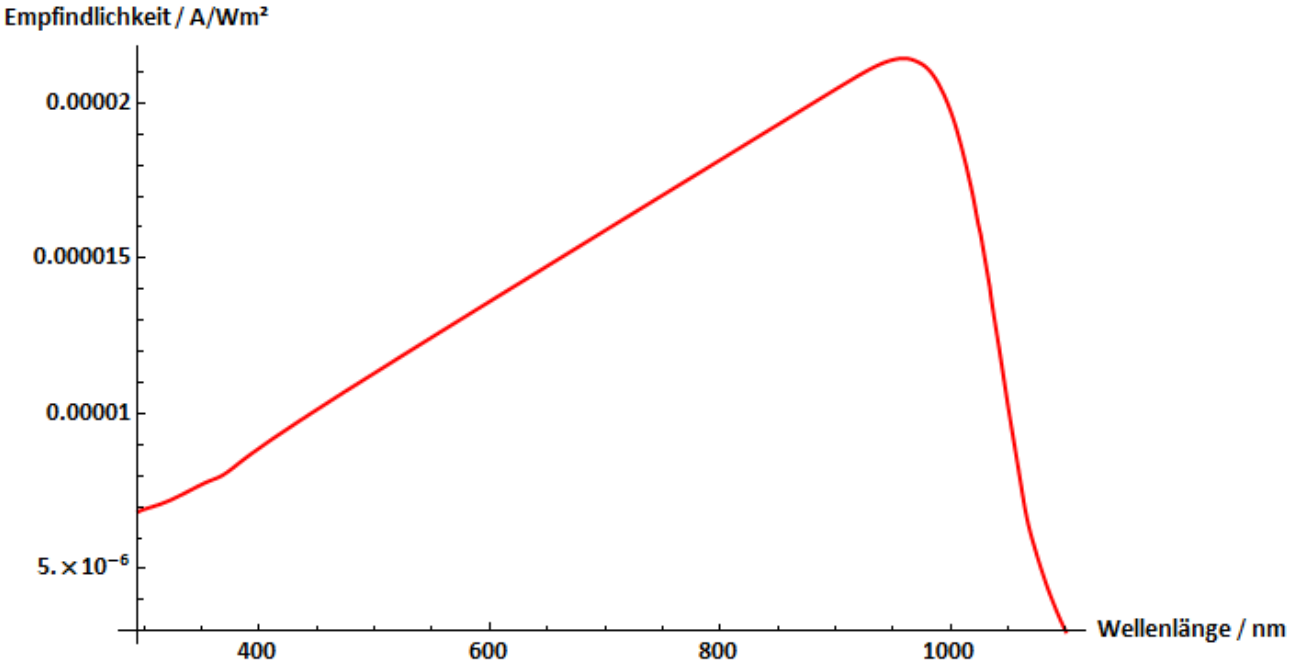

Abbildung 3: spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit eines Trap-Detektors aus Silizium-Photodioden mit 6 mm Blende im Bereich von 295 nm bis 1100 nm

Im Gegensatz zu einem photometrisch angepassten Empfänger (siehe Abbildung 4) ist der Verlauf der Empfindlichkeit im sichtbaren Bereich zwischen 360 nm und 830 nm nahezu linear. Starke Gradienten in der Empfindlichkeit gibt es besonders oberhalb von 900 nm in Richtung der Bandkante der verwendeten Photodioden. Für die Messung von thermischen Lichtquellen ist insbesondere der Verlauf der Empfindlichkeit im nahen Infraroten wichtig, da hier das Strahlungsmaximum liegt. Auf Grund des starken Gradienten in der Detektorempfindlichkeit hin zur Bandkante lässt sich der langwellige Strahlungsanteil nur mit größerer Unsicherheit bestimmen. Die Empfindlichkeit eines solchen Detektors unterhalb von 360nm ist ebenfalls nur ungenau zu bestimmen, unter anderem auf Grund von Stabilitätsproblemen bei Si-Photodioden nach Bestrahlung in diesem Wellenlängenbereich oder durch Photonen die ausreichend Energie zur Erzeugung von zwei Ladungsträgerpaaren haben. Um einen thermischen Strahler zu messen, ist es von Vorteil einen gefilterten Detektor zu nutzen, der aus der bekannten Strahlungsfunktionen einen Spektralbereich ausschneidet. Bei Benutzung eines ungefilterterten Detektors hingegen bietet es sich an eine Lichtquelle mit eingegrenztem Spektralbereich zu benutzen.

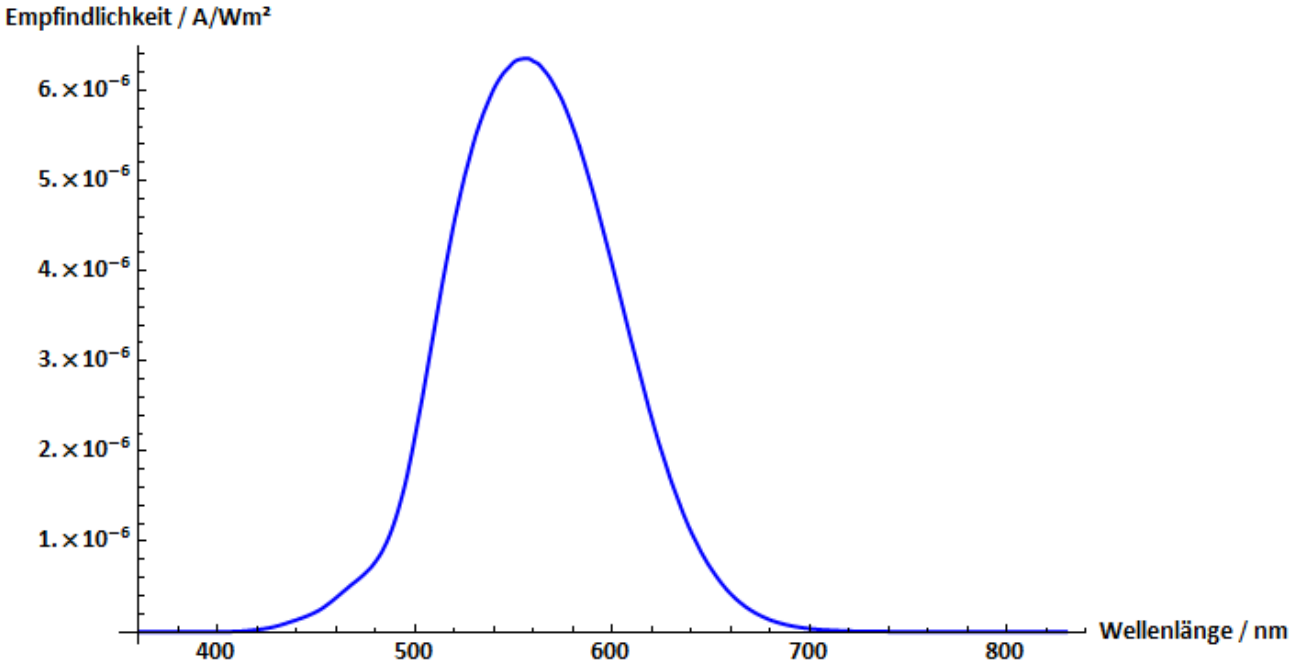

Abbildung 4: spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit eines Photometers mit 6 mm Blende im Bereich von 360 nm bis 830 nm

Die gesteigerte Messunsicherheit, die durch Gradienten in den Strahlungs- oder Empfindlichkeitsfunktionen verursacht werden, lassen sich zum einen auf die Messunsicherheit der Wellenlänge zurückführen, stammen aber auch zum Beispiel von der Temperaturabhängigkeit der Bandkante. Bei einer spektralen Messung, ob Quellspektrum oder Detektorempfindlichkeit, kann ein Korrekturfaktor c_{wl} für die Wellenlänge berechnet werden, dessen Messunsicherheit $u(c_{wl})$ sich aus der Unsicherheit der Wellenlänge $u(\lambda)$ und dem spektralen Verlauf der Empfindlichkeit $s(\lambda)$ und deren Ableitung $s'(\lambda)$ zusammensetzt:

$$u(c_{wl}(\lambda)) = u(\lambda) \cdot {}^{s'(\lambda)}\Big/_{s(\lambda)}$$

Für die Empfindlichkeit der beiden gezeigten Detektoren (Abbildung 3 und Abbildung 4) ergeben sich die Unsicherheiten der Wellenlängenkorrektur nach dieser Formel wie in Abbildung 5. Es zeigt sich eindeutig, dass die Unsicherheit der Wellenlängenkorrektur bei einem gefilterten Detektor um bis zu zwei Größenordnungen über der Unsicherheit des ungefilterten Detektors liegen kann.

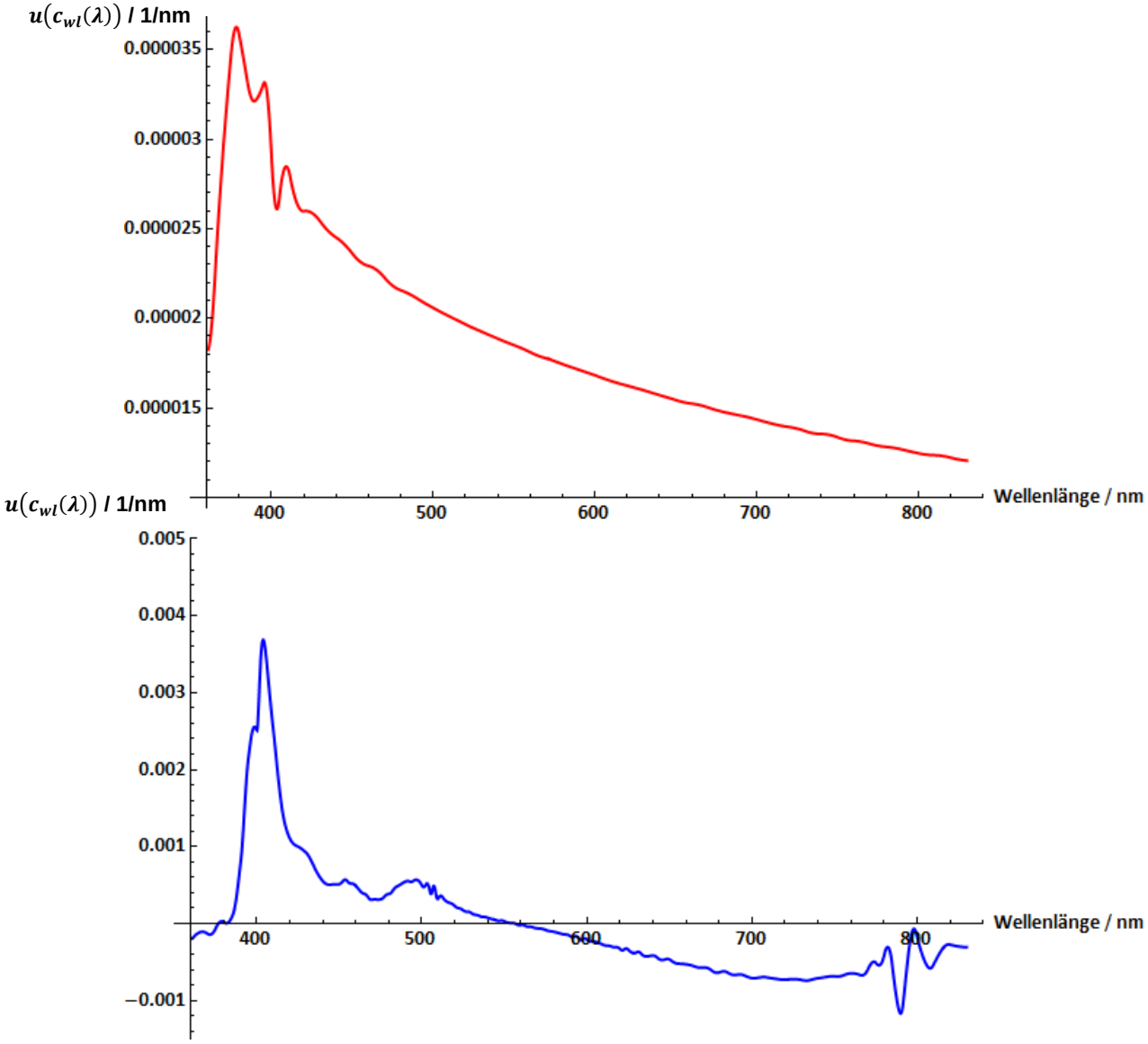

Abbildung 5: Messunsicherheit der Wellenlängenkorrektur für einen ungefilterten Detektor (oben, rot) und einen $V(\lambda)$-gefilterten Detektor (unten, blau) bei einer konstanten Wellenlängenunsicherheit von 0,01 nm

Während bei thermischen Lichtquellen die Einschränkung auf den sichtbaren Bereich mit den gefilterten Detektoren durchgeführt wird, können bei Lichtquellen mit eingeschränkten Spektralbereich, wie LEDs, auch Detektoren ohne Filterung genutzt werden. Die spektrale Fehlanpassungskorrektur zur entsprechenden Lichtart muss in jedem Fall berücksichtigt werden. Unter Verwendung von ungefilterten Detektoren sollen die photometrischen Eigenschaften der neuen LED-Lichtquellen im Rahmen des „PhotoLED“ Projektes mit verringerter Messunsicherheit bestimmt werden. Dies erlaubt dann auch die Kalibrierung der Empfindlichkeit von Photometern gegen die ungefilterten Detektoren für die Verwendung mit den LED-Lichtquellen.

Als Grundlage für die Detektoren im Rahmen von „PhotoLED“ sollen die im Projekt „NEWSTAR“ verwendeten berechenbaren Detektoren (predictable quantum-efficient detector = PQED) [2] genutzt werden. Zur Realisierung einer photometrischen Größe wird neben der berechneten Empfindlichkeit dann nur die Blendenfläche sowie das Quellenspektrum benötigt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein Überblick über die Ansätze des EMPIR-Projektes „PhotoLED“ gegeben. Im Laufe des Projekts soll eine neue Messinfrastruktur für die Photometrie an LED-Lichtquellen geschaffen werden, die sowohl die Rückführung an den nationalen Metrologieinstituten betrifft, die aber auch Anwendung in Kalibrierlaboren finden kann. Zu diesem Zweck sollen neue Referenzlichtquellen entwickelt werden, die möglichst gut an eine neue Normlichtart angepasst sind. Dies reduziert die Messunsicherheit der notwendigen spektralen Fehlanpassung. Auf Seite der Detektortechnologie sollen auch ungefilterte Detektoren genutzt werden, die in Kombination mit LED-Lichtquellen eine Reduzierung der Messunsicherheit in der photometrischen Rückführung ermöglichen.

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Projekts “Future Photometry Based on Solid-State Lighting Products” (15SIB017 PhotoLED) des EURAMET European Metrology Programme for Innovation and Resarch (EMPIR) gefördert.

[1] G. Sauter, “Die Candela: Erläuterungen zum Verständnis der Definition und der Realisierung,” *PTB-Mitteilungen*, vol. 107, pp. 397–408.

[2] T. Dönsberg, T. Pulli, T. Poikonen, H. Baumgartner, A. Vaskuri, M. Sildoja, F. Manoocheri, P. Kärhä, and E. Ikonen, “New source and detector technology for the realization of photometric units” *Metrologia*, vol. 51, pp. 276–281, 2014.