

LiTG-Fachgebiet Messen und Bewerten

# AUSGEWÄHLTE THEMEN DER LICHTMESSTECHNIK



27



**Deutsche Lichttechnische  
Gesellschaft e.V.**



# **LiTG-Fachgebiet Messen und Bewerten**

## **Ausgewählte Themen der Lichtmesstechnik**

**27**

Veröffentlichung der  
Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft e.V.

Die Publikation besteht aus fünf Aufsätzen zu aktuellen Themen der Lichtmesstechnik.

Ein Vorwort der Mitglieder des Fachgebiets 09 »Messen und Bewerten« des TWA der LiTG führt in die Thematik ein.

Titelfoto: TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH

**Deutsche Lichttechnische Gesellschaft (LiTG) e.V.**

Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin

Telefon +49 30 / 26 36 95 24

Telefax +49 30 / 26 55 78 73

E-Mail [info@litg.de](mailto:info@litg.de)

1. Auflage Juli 2015, ISBN 978-3-927787-48-3

Nachdruck, elektronische Vervielfältigung oder Weitergabe, auch auszugsweise, ist nur mit Genehmigung der LiTG und mit Quellenangabe gestattet.

# Vorwort und Inhalt

Die Lichtmesstechnik bestimmt die vielfältigen optischen Eigenschaften von Lichtquellen mit den jeweils geeigneten Messgeräten für die lichttechnischen Messgrößen mit Hilfe vereinbarter Messmethoden und beschreibt diese anhand international festgelegter Einheiten.

Das Fachgebiet 09 »Messen und Bewerten« des Technisch-Wissenschaftlichen Ausschusses (TWA) der LiTG würdigt die Bedeutung der Lichtmesstechnik, bietet eine Plattform für den Erfahrungsaustausch und fördert durch Publikationen zu aktuellen Themen das Verständnis über Lichtmesstechnik.

Zur Information und zur Sensibilisierung der Öffentlichkeit wurde nach Beratungen im TWA entschieden, eine Sammlung von Fachartikeln über momentan besonders relevante Sachverhalte der Lichtmesstechnik zu veröffentlichen. Dazu zählen die in der Zeitschrift »LICHT« bereits veröffentlichten Aufsätze über Korrekturmöglichkeiten der spektralen Fehlanpassung von Photometerköpfen und zur Leuchtdichthehomogenität von Organischen Leuchtdioden (OLEDs).

Im – weltweiten – Fokus steht heute u. a. die messtechnische Bewertung von Halbleiterlichtquellen und von orts aufgelösten Informationen photometrischer Größen, die durch digitale Kamerasysteme ermittelt werden. Auch für die photometrische und besonders für die farbmetrische Kennzeichnung moderner Lichtquellen sind Messungen der spektralen Verteilungen erforderlich. Hier hat die Messtechnik mit handlichen und schnellen Array-Spektralradiometern in den letzten Jahrzehnten große Fortschritte gemacht. So kann heute beispielsweise der Streulichtfehler dieser Geräte deutlich reduziert werden.

Vor diesem Hintergrund wurden für die Aufsatzsammlung, die fortgesetzt werden soll, zunächst folgende fünf Beiträge ausgesucht:

## **1. Korrekturmöglichkeiten der spektralen Fehlanpassung von Photometerköpfen**

Dipl.-Ing. Michaela Schuster, PTB, Dr. Saulius Nevas, PTB,  
Dr. Armin Sperling, PTB, Dr. Stefan Winter, PTB

## **2. Die Leuchtdichthehomogenität von Organischen Leuchtdioden (OLEDs)**

Dipl.-Chem. Thorsten Gerloff, PTB, Dipl.-Ing. (FH) Dirk Friedrich, PTB,  
Dr. Karsten Diekmann, Senior Manager, Osram OLED GmbH, Regensburg

## **3. Anwendung von modifizierten Farbmesskameras für photometrische Messungen im mesopischen Bereich**

Dr.-Ing. Udo Krüger, apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Franz Schmidt, TechnoTeam GmbH

## **4. Streulichtkorrektur bei Array-Spektralradiometern**

Dr. Saulius Nevas, PTB

## **5. Justieren, Kalibrieren, Prüfen und Validieren**

Dipl.-Ing. Detlef Lindner, PTB, Dr. Armin Sperling, PTB

Der TWA – insbesondere das Fachgebiet »Messen und Bewerten« – bedankt sich bei allen Autoren für die Mitwirkung und das Verfassen der Beiträge.

*Dipl.-Ing. Detlef Lindner, Dipl.-Ing. Jochen Riepe, Dipl.-Ing. Ingbert Zimmermann  
Fachgebiet 09 »Messen und Bewerten« des TWA der LiTG*

**Ausgewählte  
Themen  
der Licht-  
messtechnik**

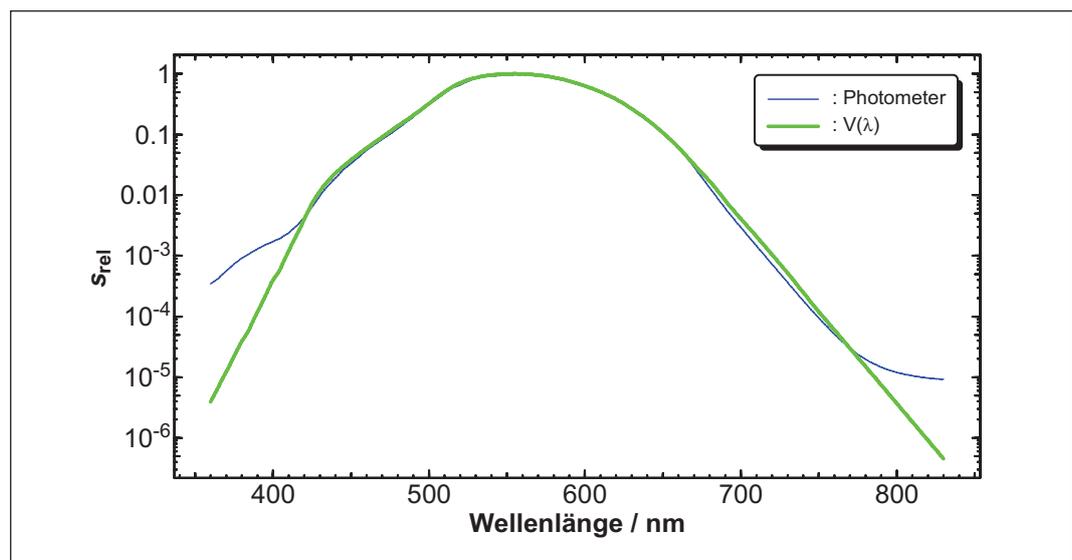
# 1 Korrekturmöglichkeiten der spektralen Fehlanpassung von Photometerköpfen

In diesem Beitrag werden zwei Messverfahren vorgestellt, mit denen die relative spektrale Empfindlichkeit von Photometerköpfen in der PTB bestimmt wird. Zusätzlich wird der Einfluss auf die Anpassungskorrektur für unterschiedliche LEDs gezeigt. Der Hintergrund hierfür ist, dass photometrische Empfänger typischerweise für Normlichtart A klassifiziert und kalibriert werden, was jedoch zu großen Messabweichungen führen kann, wenn schmalbandige Lichtquellen vermessen werden. Im Ergebnis sollte die relative spektrale Empfindlichkeit von Photometerköpfen im gesamten photometrischen Spektralbereich ( $360 \text{ nm} \leq \lambda \leq 830 \text{ nm}$ ) mit möglichst geringer Messunsicherheit bestimmt werden. Dies ist zum Einen wichtig für die Klassifizierung von Photometern hinsichtlich der Güte ihrer Anpassung an den spektralen Hellempfindlichkeitsgrad für Tagessehen  $V(\lambda)$ . Zum Anderen ist die Bestimmung unerlässlich, wenn für die Messungen mit dem Photometer eine Anpassungskorrektur bestimmt werden muss. Das ist immer dann der Fall, wenn die zu messende Lichtquelle ein von der CIE-Normlichtart A abweichendes Spektrum aufweist und die Anpassung nur unvollständig ist.

## 1.1 Einleitung

Bei genauerer Betrachtung sind für viele photometrische Messungen die Kenntnisse über die relative spektrale Empfindlichkeit der verwendeten Photometerköpfe notwendig. Diese Photometerköpfe sind in der Regel großflächige, über optische Filterung an den spektralen Hellempfindlichkeitsgrad  $V(\lambda)$  für Tagessehen angepasste Empfänger.

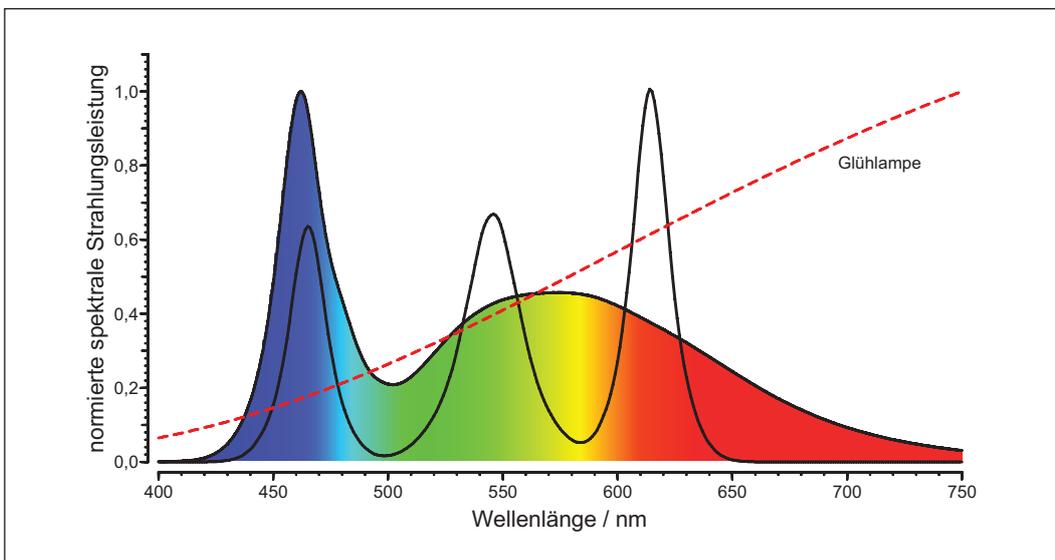
**Abbildung 1-1:** Spektraler Hellempfindlichkeitsgrad und über eine Filterung an die  $V(\lambda)$ -Funktion angepasste relative spektrale Empfindlichkeit  $s_{\text{rel}}$  eines Photometerkopfes



Da der Verlauf der relativen spektralen Empfindlichkeit eines realen Photometerkopfes aber nicht exakt dem der  $V(\lambda)$ -Funktion entspricht (exemplarisch in Abbildung 1-1 dargestellt), muss aus den spektralen Daten von Photometerkopf und

Lichtquelle eine Anpassungskorrektur berechnet werden, die die spektrale Fehlanpassung des Photometerkopfes so korrigiert, als wäre mit einem an die  $V(\lambda)$ -Funktion ideal angepassten Photometerkopf gemessen worden. Bei einem dem Glühlampenlicht ähnlichen Spektrum liegt diese Anpassungskorrektur meistens sehr nahe bei eins und ist daher für den Anwender oft vernachlässigbar.

Durch die zunehmende Verbreitung neuartiger Lichtquellen wie z. B. LEDs (Abbildung 1-2) und OLEDs, welche oft z. B. im blauen Spektralbereich der  $V(\lambda)$ -Funktion relativ hohe Strahlungsanteile (verglichen mit thermischen Strahlern) aufweisen, ergeben sich völlig neue Randbedingungen. Für die photometrische Charakterisierung dieser Lichtquellen kann die Anpassungskorrektur nicht mehr vernachlässigt werden. Zur Bestimmung dieser Korrektur ist die Kenntnis der relativen spektralen Verteilung, kurz Strahlungsfunktion  $S_{\text{rel}}(\lambda)$  der Lichtquelle, und die der relativen spektralen Empfindlichkeit des Photometers nötig.



**Abbildung 1-2:**  
Strahlungsfunktion einer Glühlampe, einer »Phosphor-LED« und einer »RGB-LED« im Vergleich

## 1.2 Die Kenngröße $f_1'$

Nach DIN EN 13032-1:2004 [1-1] kann durch die Kenngröße  $f_1'$  die Güte, mit welcher die relative spektrale Empfindlichkeit  $s_{\text{rel}}(\lambda)$  eines Photometers an den spektralen Hellempfindlichkeitsgrad  $V(\lambda)$  des menschlichen Auges für Tagessehen angepasst ist, beschrieben werden mit:

$$f_1' = \frac{\int_0^{\infty} |s_{\text{rel}}^*(\lambda) - V(\lambda)| d\lambda}{\int_0^{\infty} V(\lambda) d\lambda}$$

Anmerkung: In der Überarbeitung der CIE 69-1987 [1-5] wird derzeit die Festlegung eines zu verwendenden Wellenlängenbereiches diskutiert.

**Gleichung 1-1**

Darin ist  $s_{\text{rel}}^*(\lambda)$  die normierte relative spektrale Empfindlichkeit des Photometers mit:

Gleichung 1-2

$$s_{\text{rel}}^*(\lambda) = s_{\text{rel}}(\lambda) \cdot \frac{\int_0^{\infty} S_A(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} S_A(\lambda) \cdot s_{\text{rel}}(\lambda) d\lambda}$$

$S_A(\lambda)$  bezeichnet hier die CIE-Normlichtart A.

Im idealen Fall gilt:  $s_{\text{rel}}^*(\lambda) = V(\lambda)$  und ohne Berücksichtigung von Messunsicherheiten wäre  $f_1' = 0$ .

Diese Kenngröße darf jedoch nicht als Fehler oder Messunsicherheit bezeichnet oder gar verstanden werden. Leider vermittelt der allgemeine Sprachgebrauch oft die Vorstellung, die Werte der Kenngröße(n) seien maximal auftretende Fehler.

### 1.3 Bestimmung der photometrischen Empfindlichkeit an der Photometerbank

Photometrisch werden Photometer mit Glühlampen kalibriert, d. h. mit einer Strahlungsfunktion, die im Wesentlichen dem Planck'schen Strahlungsgesetz  $P(\lambda, T)$  folgt. Das Kalibrierergebnis, die photometrische Empfindlichkeit  $s_v$  des Photometers, ist das Verhältnis aus seinem Photostrom  $y$  und der Beleuchtungsstärke  $E_v$  seiner Lichteintrittsfläche.

Gleichung 1-3

$$s_v = \frac{y}{E_v} \cdot F(T)$$

$F(T)$  bedeutet hierbei die Anpassungskorrekturfunktion. Die Anpassungskorrektur  $F'(T)$  lässt sich nach Gleichung 1-4 aus der Planck'schen Strahlungsverteilung  $P(\lambda, T)$  der Temperatur  $T$ , der  $V(\lambda)$ -Funktion und der relativen spektralen Empfindlichkeit  $s_{\text{rel}}(\lambda)$  des Photometers berechnen.

Gleichung 1-4

$$F'(T) = \frac{\int_0^{\infty} P(\lambda, T) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} P(\lambda, T) \cdot s_{\text{rel}}(\lambda) d\lambda}$$

Photometer werden grundsätzlich bei CIE-Normlichtart A, entsprechend einer Verteilungstemperatur  $T_A = 2856$  K kalibriert, d. h. der Wert der photometrischen Empfindlichkeit wird für  $T_A$  bestimmt. Es ist daher vorteilhaft, die Anpassungskorrekturfunktion  $F(T)$  bei dieser Temperatur auf Eins zu normieren.

$$F(T) = \frac{F'(T)}{F'(T_A)} = \frac{\int_0^{\infty} P(\lambda, T) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} P(\lambda, T_A) \cdot V(\lambda) d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} P(\lambda, T) \cdot s_{\text{rel}}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} P(\lambda, T_A) \cdot s_{\text{rel}}(\lambda) d\lambda}$$

Gleichung 1-5 lässt sich für den Fall eines thermischen Strahlers durch folgende Näherung beschreiben:

$$F(T) \approx \left( \frac{T}{T_A} \right)^m$$

Typische Werte für den Exponenten  $m$  liegen im Bereich von  $\pm 0,02$  und sind abhängig von der Art der Anpassung an  $V(\lambda)$ . Der Korrekturfaktor  $F(T)$  gilt jedoch nur für diese spezifischen Messbedingungen. Auch angegebene Messunsicherheiten gelten nur dann, wenn mit dem Photometer Lichtquellen charakterisiert werden, die eine Strahlungsfunktion ähnlich der des Planck'schen Strahlers aufweisen.

Wird mit diesem Photometer aber eine Lichtquelle charakterisiert mit einer anderen Strahlungsfunktion, z. B. LEDs oder OLEDs, müssen z. T. erhebliche Korrekturen vorgenommen werden. Die einfache Näherung der Anpassungskorrektur kann hierfür nicht mehr verwendet werden. Hier wird ein Korrekturfaktor (colour correction factor)  $ccf$  berechnet.

$$ccf = \frac{\int_0^{\infty} S(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} S(\lambda) \cdot s_{\text{rel}}(\lambda) d\lambda} \bigg/ \frac{\int_0^{\infty} P(\lambda, T_A) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} P(\lambda, T_A) \cdot s_{\text{rel}}(\lambda) d\lambda}$$

Dafür muss die Strahlungsfunktion  $S(\lambda)$  der Lichtquelle und die relative spektrale Empfindlichkeit  $s_{\text{rel}}(\lambda)$  des Photometerkopfes bekannt sein.

## 1.4 Bestimmung der relativen spektralen Empfindlichkeit an monochromatorbasierten Messplätzen

Durch den Einsatz unterschiedlicher Lampen und austauschbarer Gitter im Monochromator kann ein großer Wellenlängenbereich abgedeckt werden. Die Ausgangsleistung der Strahlung hinter dem Monochromator liegt dabei typischerweise im  $\mu\text{W}$  Bereich. Der Wellenlängenbereich, in dem die Kalibrierung von Photometern durchgeführt wird, reicht jedoch meist nur von 410 nm bis 740 nm. Dieser eingeschränkte Bereich hängt zum Einen von der spektralen Strahlungsleistung der eingesetzten Lampen und dem Monochromator ab, zum Anderen hat man immer einen Kompromiss zwischen ausreichend hoher Strahlungsleistung auf dem Empfänger und ausreichender Schmalbandigkeit der quasi-monochromatischen Strahlung einzugehen. Eine hohe Strahlungsleistung wird benötigt, da Photometer in den Flanken der  $V(\lambda)$ -Kurve sehr unempfindlich sind. Die Bandbreite der Strahlung liegt hierbei typischer Weise im Bereich von ca. 1 nm – 5 nm. Da ein Photometerkopf immer bezüglich Beleuchtungsstärke kalibriert wird, muss er überstrahlt betrieben werden.

In der PTB erfolgt die Kalibrierung im Substitutionsverfahren mit einem Siliziumempfänger als Referenznormal.

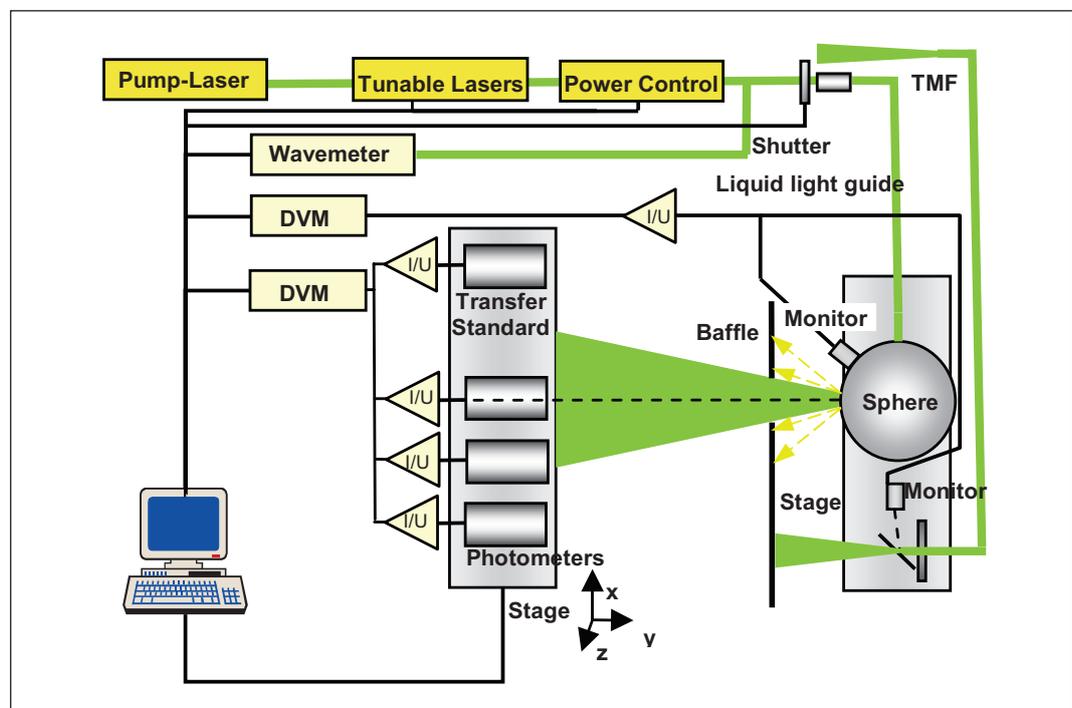
Nachteile dieses Verfahrens sind (1) der begrenzte Spektralbereich, (2) eine geringe Homogenität der Strahlung auf der Empfängerfläche, (3) die große spektrale Bandbreite der quasi-monochromatischen Strahlung sowie (4) die geringe spektrale Bestrahlungsstärke. Im Ergebnis führt dies zu hohen Messunsicherheiten insbesondere in den Wellenlängenbereichen unterhalb von 450 nm und oberhalb von 700 nm.

Durch die Verwendung eines durchstimmbaren Lasersystems kann die spektrale Bestrahlungsstärke deutlich erhöht werden. Zusätzlich kann die Bandbreite der quasi-monochromatischen Strahlung mit einem Lasersystem deutlich verringert werden, so dass Unsicherheiten durch eine nachträgliche Entfaltung der Messdaten entfallen.

### 1.5 Bestimmung der relativen spektralen Empfindlichkeit am TULIP-Messplatz der PTB

Durch den in Abbildung 1-3 dargestellten TULIP-Aufbau (Tunable Lasers in Photometry) soll die direkte und lückenlose Kalibrierung von Photometerköpfen und anderen photometrischen und radiometrischen Empfängern mit spektral kontinuierlich einstellbaren Lasern im gesamten Spektralbereich von UVC bis hin zum NIR ermöglicht werden [1-3].

**Abbildung 1-3:** TULIP-Messplatz für die Kalibrierung und Charakterisierung von großflächigen Empfängern unter der Verwendung gleichförmiger Strahlung aus entweder einer Ulbricht-Kugel oder einer Tapered Multimode Fiber (TMF)



Dabei wird zur Zeit das CW-Lasersystem mit einem Quasi-CW-Lasersystem dergestalt ergänzt, dass die im CW-Betrieb nicht kontinuierlich erreichbaren Spektralbereiche (230 nm – 360 nm sowie 440 nm – 570 nm und oberhalb 920 nm) ausgefüllt werden können.

Das homogene, möglichst unpolarisierte und aufgeweitete Strahlungsfeld, das für die Messungen an großflächigen Empfängern nötig ist, wird dadurch erreicht, dass der Laserstrahl zunächst entweder in eine Ulbrichtkugel oder in eine »Tapered Multimode Fiber« (TMF) eingekoppelt wird.

Die Bestimmung der relativen spektralen Empfindlichkeit des zu charakterisierenden Empfängers erfolgt wie beim Monochromatoraufbau nach dem Substitutionsverfahren mit einem Referenzempfänger. Das bedeutet, dass der Photostrom  $y_i(\lambda)$  des zu kalibrierenden Photometerkopfes gemessen und mit dem Photostrom  $y_N(\lambda)$  eines Referenzempfängers mit bekannter spektraler Empfindlichkeit  $s_N(\lambda)$  verglichen wird, der an der gleichen Position angeordnet ist. Zeitliche Drift der Bestrahlungsstärke während der Messung werden über die Photoströme  $y_{M,i}(\lambda)$  und  $y_{M,N}(\lambda)$  aus einer Monitormessung korrigiert. Die relative spektrale Empfindlichkeit des Photometers bzw. Photometerkopfes kann so für jede Wellenlänge bestimmt werden:

Gleichung 1-8

$$s_{\text{rel}}(\lambda) = s_N(\lambda) \cdot \frac{y_i(\lambda) \cdot y_{M,N}(\lambda)}{y_N(\lambda) \cdot y_{M,i}(\lambda)}$$

Ist der Referenzempfänger absolut kalibriert, dann kann in gleicher Weise auch die absolute spektrale Empfindlichkeit  $s(\lambda)$  des Photometers bestimmt werden.

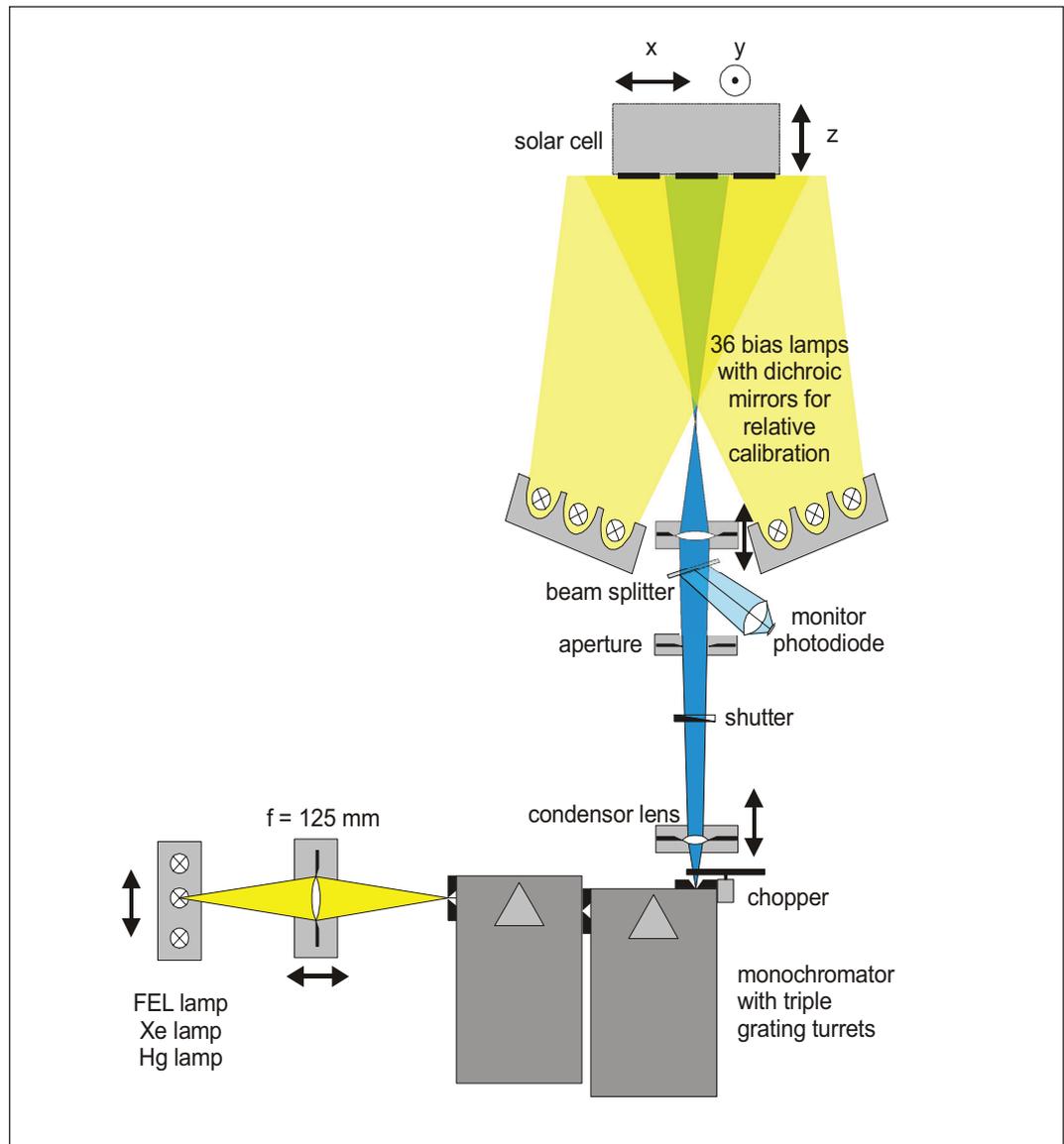
## 1.6 Vergleichende Messungen am monochromatorbasierten Messplatz und am laserbasierten Messplatz

Der monochromatorbasierte Messplatz der PTB (Abbildung 1-4) wird hauptsächlich zur Kalibrierung von Solarzellen eingesetzt, da er die Möglichkeit bietet, über eine Zusatzbeleuchtung den Arbeitspunkt der Empfänger einzustellen. Ohne den Einsatz dieser Biasbestrahlung wird der Messplatz auch zur Bestimmung der absoluten oder auch relativen spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit von radiometrischen und photometrischen Empfängern verwendet [1-4].

Als Strahlungsquellen vor dem Monochromator dienen in der Regel Halogenglühlampen oder Xenon-Bogenlampen (für kurze Wellenlängen). Damit kann der Wellenlängenbereich von 210 nm bis 1900 nm abgedeckt werden. Die Strahlung dieser Lampen wird auf den Eingangsspalt eines Doppelmonochromators (der in subtraktiver Anordnung aufgebaut ist) abgebildet. Über Blenden und Linsen wird die quasimonochromatische Strahlung auf die Probenebene abgebildet. Durch eine geeignete Verstärkertechnik ist die Kalibrierung von z. B. Photometern im Wellenlängenbereich von 360 nm bis 830 nm möglich.

An den beiden vorgestellten Messplätzen wurde exemplarisch die relative spektrale Empfindlichkeit und daraus die Kenngröße  $f_1'$  für drei Photometer mit unterschiedlichem Aufbau und von verschiedenen Herstellern bestimmt. Alle ausgewählten Photometer haben einen Diffusor direkt hinter der Eintrittsblende, so dass der Einfluss der unerwünschten laserbedingten Interferenzerscheinungen im laserbasierten Aufbau unterdrückt wird. Der Durchmesser der Blenden der Photometer variiert zwischen 8 mm und 30 mm. Auch die Art der Filterung ist bei den Photometern unterschiedlich. Zum Beispiel erfolgt bei Photometer Nr. 3 die spektrale Anpassung an  $V(\lambda)$  durch eine Vollfilterung.

**Abbildung 1-4:** Monochromator-basierter Messplatz (DSR-Messplatz genannt), hauptsächlich genutzt zur Kalibrierung von Solarzellen



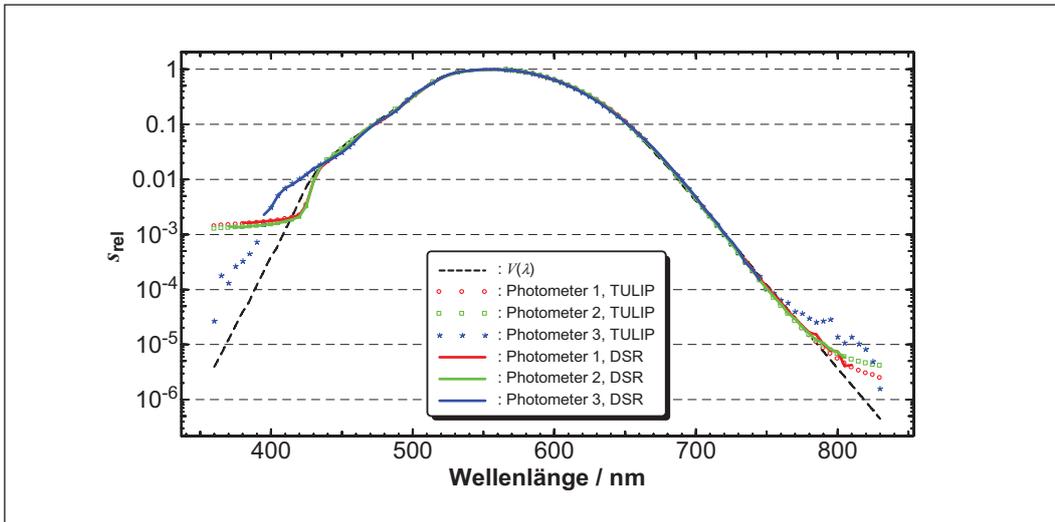
Bei den Photometern Nr. 1 und Nr. 2 wird die spektrale Anpassung über eine Partialfilterung erreicht. Tabelle 1-1 zeigt die gewonnenen Ergebnisse in einer Übersicht.

Die relative erweiterte Messunsicherheit ergibt sich aus der Standardmessunsicherheit durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor  $k = 2$ . Dies entspricht bei einer Normalverteilung einem Vertrauensniveau von 95 %. Sie wird gemäß dem »Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement« [1-7] ermittelt.

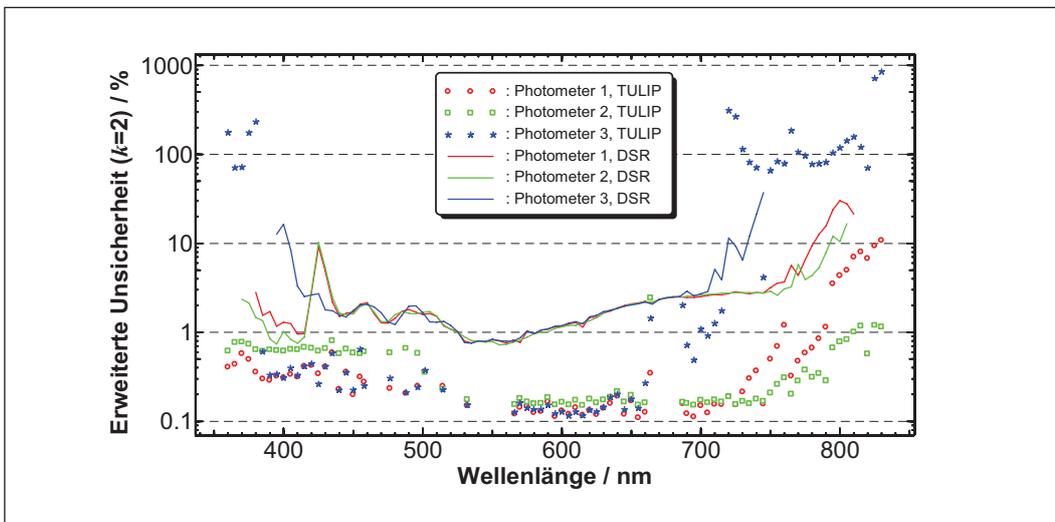
**Tabelle 1-1:** Für die Messungen eingesetzte Photometer und Kenngröße  $f_1'$  mit jeweils beigeordneter erweiterter Unsicherheit ( $k = 2$ ) der Photometer für beide Messplätze

Nummer	Filter	Durchmesser	$f_1'$ , TULIP	$f_1'$ , monochromatorbasierter Messaufbau
1	partial	11 mm	(1,685±0,040) %	(1,93±0,62) %
2	partial	30 mm	(1,620±0,052) %	(1,89±0,62) %
3	voll	8 mm	(1,664±0,049) %	(1,66±0,38) %

Abbildung 1-5 zeigt die relative spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit der Photometer gemessen am laserbasierten TULIP-Messplatz und am monochromator-basierten DSR-Messplatz.



**Abbildung 1-5:** Relative spektrale Empfindlichkeit von drei Photometerköpfen gemessen am laserbasierten TULIP-Messplatz und am monochromatorbasierten DSR-Messplatz



**Abbildung 1-6:** Erweiterte Messunsicherheit ( $k = 2$ ) der relativen spektralen Empfindlichkeit der drei Photometer gemessen an beiden Messplätzen

In Abbildung 1-6 sind die beigeordneten erweiterten Messunsicherheiten ( $k = 2$ ) aufgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, dass im kurzwelligen Spektralbereich die monochromatorbasierten Messungen deutlich höhere Messwerte liefern, da die Messunsicherheit unter 400 nm stark ansteigt. Die Unsicherheit für die relative spektrale Empfindlichkeit und für die Kenngröße  $f_1'$  wurde nach der CIE-Definition [1-5] ermittelt, wobei zur Bestimmung der Messunsicherheit das Monte-Carlo-Verfahren gemäß [1-6] angewendet wurde. Die Unsicherheiten in der Peak-Region von  $V(\lambda)$  sind im Wesentlichen bestimmt durch die Unsicherheit des eingesetzten Referenz-Trapempfängers.

Aus den gemessenen Empfindlichkeiten in Abbildung 1-5 wurden die zugehörigen Werte für  $f_1'$  nach Gleichung 1-1 berechnet. In Tabelle 1-1 ist die Kenngröße  $f_1'$  und die zugehörige Unsicherheit für alle drei Photometer angegeben. Es ist zu erkennen, dass die Unsicherheit der Kenngröße am monochromatorbasierten Messplatz um ungefähr eine Größenordnung höher liegt als am laserbasierten Messaufbau. Oft sind die Werte für  $f_1'$ , die von Herstellern angegeben werden, deutlich geringer. Das liegt daran, dass in monochromatorbasierten Messplätzen der Wellenlängenbereich durch das geringe Signal-Rausch-Verhältnis begrenzt ist. Die Kenngröße wird für einen kleineren Wellenlängenbereich bestimmt und ein Teil der Fehlanpassung wird dann nicht berücksichtigt. Des weiteren werden im Allgemeinen Unsicherheitsbeiträge bei Monochromatormessungen oft zu klein angegeben, da Wellenlängenfehler oft zu klein abgeschätzt werden!

Die geringere Unsicherheit am lasergestützten TULIP-Messplatz ist durch die geringe Bandbreite und eine sehr genau bekannte Wellenlänge der zur Messung eingesetzten Strahlung, durch die bessere Homogenität der Strahlung und durch die höhere Bestrahlungsstärke und das damit bessere Signal-Rausch-Verhältnis, verglichen mit dem monochromatorbasierten Messverfahren, zu erklären.

## 1.7 Messungen an LEDs

Um den Einfluss der Fehlanpassung auf die Messergebnisse für von CIE-Normlichtart A abweichende Lichtquellen zu verdeutlichen, wurden mit einem Photometer (Photometer 3) unterschiedliche LEDs gemessen und die Anpassungskorrektur bestimmt.

Tabelle 1-2 zeigt eine Übersicht über die gemessenen LEDs und deren Peakwellenlänge. In Abbildung 1-7 ist die spektrale Verteilung der vier LEDs, gemessen mit einem Spektroradiometer, dargestellt.

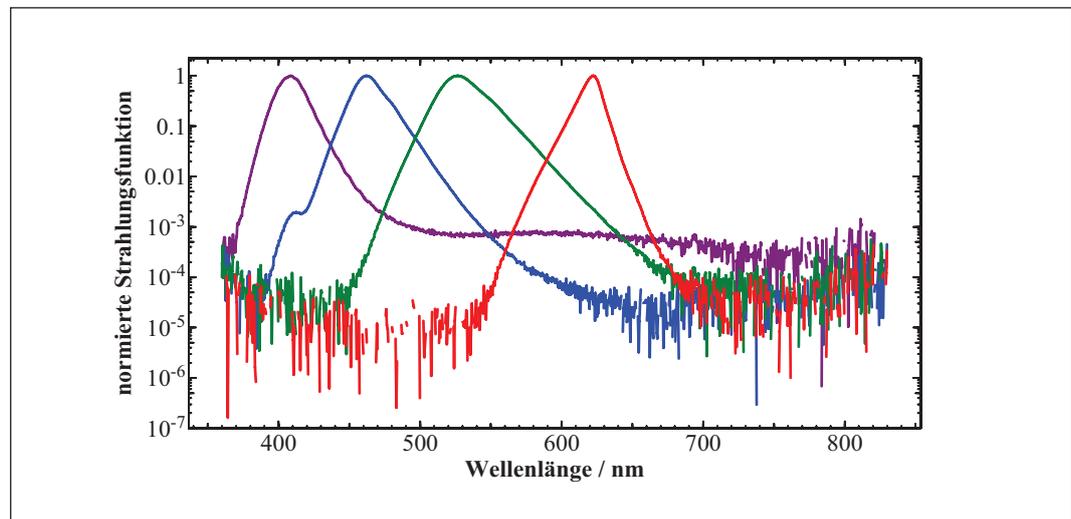
**Tabelle 1-2:**

Für die Messungen verwendete LEDs und ermittelte  $ccf$  mit jeweils beigeordneter erweiterter Messunsicherheit ( $k = 2$ )

Nummer	LED	Peakwellenlänge	$ccf$
1	LED blau	ca. 409 nm	0,58±0,20
2	Hochleistungs-LED blau	ca. 463 nm	1,077±0,014
3	Hochleistungs-LED grün	ca. 529 nm	1,0101±0,0064
4	Hochleistungs-LED rot	ca. 621 nm	1,001±0,016

**Abbildung 1-7:**

Normierte spektrale Verteilung von vier LEDs



Für die vier LEDs wurde die Anpassungskorrektur nach Gleichung 1-7 bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1-2 dargestellt. Für Strahlungsquellen, die ihren Hauptstrahlungsanteil in einem Wellenlängenbereich haben, in dem das Photometer gut an  $V(\lambda)$  angepasst ist, ergibt sich ein Korrekturfaktor sehr nahe bei eins. Der gemessene Photostrom muss für jede Wellenlänge mit dem Korrekturfaktor  $ccf$  multipliziert werden. Wird diese Korrektur jedoch nicht vorgenommen, ergibt sich unter Umständen eine extreme Fehlbewertung photometrischer Größen. Z. B. ergibt sich eine Fehlbewertung für LED Nr. 1 von ca. 42 %, und das, obwohl  $f_1'$  für dieses Photometer nur 1,664 % beträgt. Die Fehlbewertung ist immer dann sehr

groß, wenn der Hauptstrahlungsanteil der Quelle in den Bereichen liegt, in denen das Photometer schlecht an  $V(\lambda)$  angepasst ist.

## 1.8 Zusammenfassung

Die zunehmende Verbreitung neuartiger Lichtquellen erfordert die genaue Bestimmung der relativen spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit der zu Messungen eingesetzten Photometer, um daraus eine Anpassungskorrektur berechnen zu können. Wird diese Anpassungskorrektur nicht durchgeführt, kann sich die Fehlbeurteilung photometrischer Größen deutlich erhöhen. Wie die dargestellten Ergebnisse verdeutlichen, darf die Kenngröße  $f_1'$  nicht als Fehler oder Messunsicherheit interpretiert werden. Sie dient nur dazu, ein Maß für die Güte der Anpassung an  $V(\lambda)$  für breitbandige Lichtquellen zu liefern.

Nationale Metrologieinstitute haben meistens die Möglichkeit, verlässliche photometrische bzw. radiometrische Charakterisierungen, z. B. von Photometerköpfen, mit zertifizierten Verfahren (Kalibrierung) auf TransfERNormale zu übertragen und in einem Ergebnisbericht (Kalibrierschein) zu dokumentieren. Somit wird die Herkunft der Einheit eines Referenznormals durch eine lückenlose Kette von Kalibrierungen bis hin zu einem anerkannten nationalen oder internationalen Normal nachgewiesen. Derartige Nachweise sind Grundlage der Qualitätssicherung für Prüf- und Kalibrieraufgaben (auch in nichtstaatlichen Laboratorien) gemäß DIN EN 17025.

## 1.9 Literatur

- [1-1] DIN EN 13032-1\_2004, *Licht und Beleuchtung – Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten*, Teil 1: *Messung und Datenformat*.
- [1-2] CIE Publication 127-1997 *Measurement of LEDs*, ISBN 3 900 734 84 4.
- [1-3] Sperling, A.; Larinov, O.; Grusemann, U.; Winter, S.: *Stray-light correction of array spectrometers using tunable pulsed and cw lasers*, Proceedings of the 9<sup>th</sup> international conference on new developments and applications in optical radiometry (NEWRAD), S. 93, Davos, 2005, ISBN-10 3-033-00570-5.
- [1-4] Winter, S.; Lindner, D.; Sperling, A.; Sauter, G.; Brown, S.; Larason, T.; Zong, Y.; Ohno, Y.: *Comparison of photometer calibrations at six different facilities of PTB and NIST*, Proceedings of the 9<sup>th</sup> international conference on new developments and applications in optical radiometry (NEWRAD), S. 243, Davos, 2005, ISBN-10 3-033-00570-5.
- [1-5] CIE Publication 69-1987 *Method of characterizing illuminance meters and luminance meters*, ISBN 978 3 900734 04 6.
- [1-6] *Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the »Guide to the expression of uncertainty in measurement« – Propagation of distributions using a Monte Carlo method*, BIPM JCGM 101:2008.
- [1-7] *Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*, ISO/IEC Guide 98:1995.

## 2 Die Leuchtdichtehomogenität von Organischen Leuchtdioden (OLEDs)

### 2.1 Einleitung

OLEDs sind in der Regel sehr flache Leuchtmittel, die im Gegensatz zu anorganischen Leuchtdioden große Emissionsflächen von mehreren Quadratdezimetern besitzen können. Diese herausragende Eigenschaft unterscheidet sie von den meisten üblichen Leuchtmitteln, deren Licht aus punkt- oder linienförmigen Strukturen austritt.

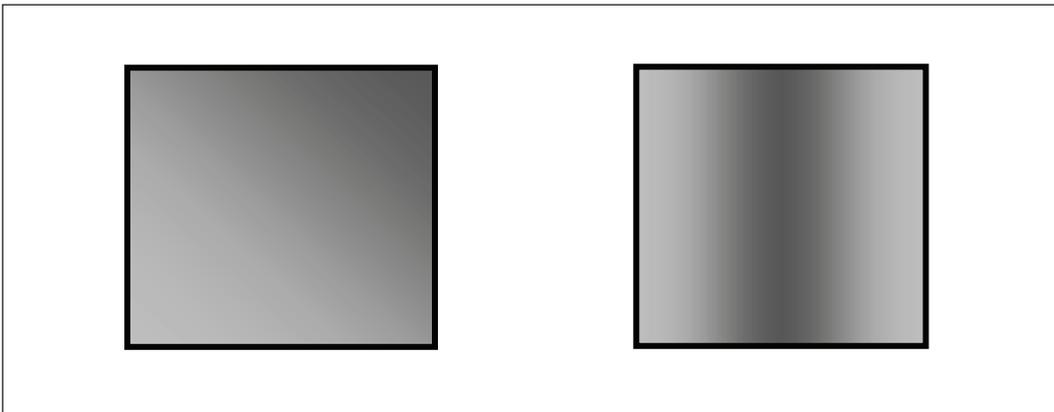
Gebräuchliche Leuchtmittel werden gewöhnlich entsprechend normierter Messverfahren charakterisiert. Physikalische Größen wie die Lichtausbeute, ähnliche Farbtemperatur oder der Lichtstrom sind eindeutig definiert und die angewandten Messverfahren müssen so aufgebaut sein, dass die physikalischen Randbedingungen dieser Größen eingehalten werden. Für klassische Leuchtmittel wie Glüh- oder Entladungslampen gibt es viele Normen und Beispiele für entsprechende Messmethoden.

Bei großflächigen Lichtquellen wie OLEDs sind neben den genannten Größen auch weitere Eigenschaften für die Charakterisierung wichtig. Eine wichtige Forderung an hocheffiziente weiße OLEDs ist beispielsweise eine gleichmäßig hell erscheinende Leuchtfläche. Während andere Leuchtmittel üblicherweise in Leuchten eingebaut werden, um beispielsweise das Licht zu lenken oder Blendung zu vermeiden, können OLEDs für besondere Anwendungen direkt betrachtet werden. Daher spielt die Homogenität der Oberflächenleuchtdichte einer OLED sowohl für die gewünschten Eigenschaften der Beleuchtung als auch für das ästhetische Empfinden eine wichtige Rolle.

Analog zu den OLEDs ist eine gleichmäßige Ausleuchtung der Hintergrundbeleuchtung von Flüssigkristallbildschirmen und anderen Anzeigegeräten wichtig, da sie ebenfalls direkt betrachtet werden. Entsprechende Richtlinien und Empfehlungen für Messaufbau und -durchführung zur Beurteilung und Beschreibung der Qualität einer solch gleichmäßigen Ausleuchtung wurden für Displays entwickelt und werden verwendet.

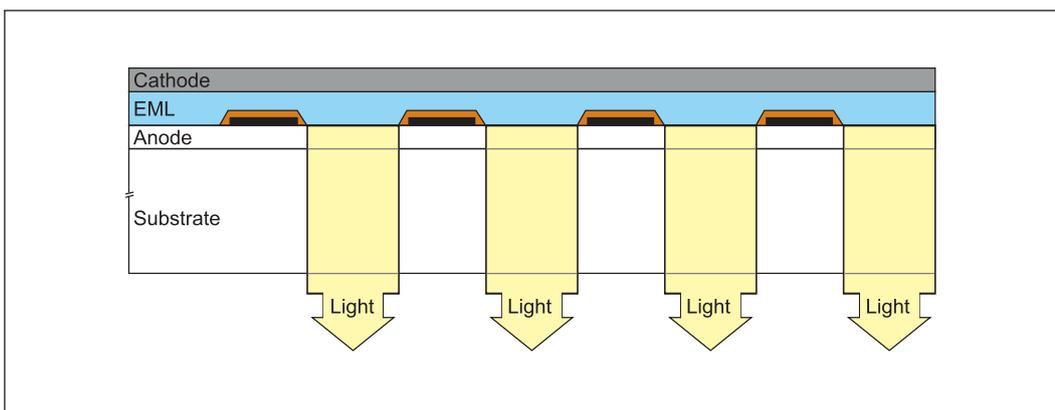
Bildschirme sollen allerdings Informationen durch Darstellung von Schriften, Symbolen oder Bildern übermitteln, die sich häufig verändern. Der Mensch empfindet bei der Wahrnehmung von Multimediainhalten eine inhomogene Hintergrundbeleuchtung weniger störend als bei einer unbewegten, gleichförmigen Lichtquelle. Wahrnehmungs- und Toleranzschwellwerte können demzufolge bei großflächigen OLEDs erheblich kleiner sein als bei ähnlich großen Flachbildschirmen.

Viele verbreitete Definitionen zur Beschreibung der Gleichmäßigkeit der Leuchtdichte von Displays setzen die minimale und die maximale Leuchtdichte eines Bildschirms in Beziehung und vernachlässigen dabei Strukturen oder Gradienten. Für den Fall, dass man nur den minimalen und den maximalen Wert der Leuchtdichte betrachtet, liefern zwei unterschiedliche Leuchtdichtemuster (siehe Abbildung 2-1) den gleichen Wert für deren Gleichmäßigkeit (engl. uniformity). Die wahrgenommene Homogenität ist aufgrund der sich deutlich unterscheidenden Helligkeitsgradienten allerdings vollkommen unterschiedlich.



**Abbildung 2-1:** Zwei unterschiedliche Leuchtdichteprofile mit gleichem Minimal- und Maximalwert der Leuchtdichten; das linke Bild erscheint homogener als das rechte, da der Leuchtdichtegradient nur etwa ein Drittel des rechten beträgt

Die inhomogenen Leuchtdichtepprofile von OLEDs, die in Abbildung 2-1 beispielhaft dargestellt sind, ergeben sich primär aus der begrenzten elektrischen Leitfähigkeit der halbleitenden Indium-Zinn-Oxid-Elektrode (ITO). Eine Möglichkeit, die Leitfähigkeit zu erhöhen, ist das Aufbringen zusätzlicher Leiterbahnen aus einem Metall (Busbar) auf die ITO-Schicht. Diese reduzieren den effektiven elektrischen Widerstand der Elektrode signifikant und führen zu einem deutlich besseren Ladungstransport vom Rand zum Zentrum der Elektrode. Da diese Busbars im Gegensatz zur ITO-Schicht nicht transparent sind, kann man sie als schwarze Linien auf der leuchtenden Fläche erkennen (Abbildung 2-2). Das OLED-Design kann sich in Abstand und Dicke der Busbars unterscheiden, obwohl die Leuchtdichte der sichtbaren Emissionsfläche eine ähnliche Homogenität besitzt. Daher kann das Layout der Busbarstrukturen dem ästhetischen Empfinden des Verbrauchers angepasst werden oder sogar eine besonders auffällige Form besitzen. Bei der Definition der Homogenität stellt die Berücksichtigung von Busbars, welche in Abhängigkeit des OLED-Designs im Prinzip beliebig aussehende dunkle Strukturen auf der leuchtenden Emissionsfläche darstellen können, eine besondere Herausforderung dar.



**Abbildung 2-2:** OLED mit Busbars (schwarz) und dazugehöriger Isolationsschicht (orange); hierdurch wird die Leuchtdichtehomogenität der aktiv leuchtenden Fläche (gelb) erhöht; diese vereinfachte Darstellung berücksichtigt keine Effekte von Lichtleitung, -brechung, Streulicht oder ähnlichem

Gängige Busbardesigns für verfügbare OLEDs mit ähnlicher Substratform sind linienförmig, quadratisch oder hexagonal. Obwohl noch viele weitere Strukturen denkbar sind, sollte jede direkt sichtbare OLED für Beleuchtungszwecke eine homogene Lichtabgabe aufweisen. Daher ist es notwendig, eine allgemeingültige Methode für Homogenitätsmessungen zu entwickeln, welche nach Möglichkeit bestehende und auch zukünftige unterschiedliche Designs und Formen der Emissionsflächen und Busbarstrukturen berücksichtigt.

Das Arbeitspaket »Anwendungsentwicklung« des OLED100.eu-Projektes untersucht verschiedene Aspekte der Homogenität von organischen Leuchtdioden. Das Arbeitspaket wird von Osram OS geleitet und vereint die produktspezifischen Anforderungen industrieller Hersteller mit der messtechnischen Kompetenz der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB). Das Hauptaugenmerk der PTB liegt dabei auf der Entwicklung von Messverfahren photometrischer Größen, die auf die SI-Einheiten rückführbar sind.

Eine Teilaufgabe von OLED100.eu ist die Entwicklung einer Messmethode zur Beschreibung der Leuchtdichtehomogenität von großflächigen OLEDs, welche die Anforderungen der Beleuchtungstechnik und Qualitätsansprüche der Verbraucher berücksichtigt.

Bei der internationalen Beleuchtungskommission CIE (Commission Internationale d'Eclairage) wurde in diesem Zusammenhang ein Technisches Komitee unter Führung der PTB eingerichtet, welches die Entwicklung von Methoden zur photometrischen Charakterisierung von großflächigen Lichtquellen für Beleuchtungszwecke zum Ziel hat. [2-1]

## 2.2 Leuchtdichtehomogenität - Definition und Messung

Der Ausgangspunkt aller photometrischen Messmethoden ist die Definition des CIE-Standardbeobachters. Diesem liegt die eindeutig definierte Hellempfindlichkeitsfunktion  $V(\lambda)$  zugrunde, die einen Zusammenhang zwischen der Wahrnehmung des Menschen und einem physikalischen Messgerät (Photometer) schafft. Dieser Zusammenhang gilt allerdings nicht für ein einzelnes Individuum und vernachlässigt auch viele Effekte, die die Wahrnehmung eines Menschen unter bestimmten Sehbedingungen beeinflussen.

Der große Vorteil bei der Verwendung photometrischer Größen liegt allerdings in einer neutralen Beurteilung von Lichtquellen, die, unter korrekter Berücksichtigung der zugrunde liegenden physikalischen Definitionen, für verschiedene Messmethoden, -geometrien und -geräte zu identischen Werten führen muss.

Die Bestimmung der Leuchtdichtewerte von organischen Leuchtdioden ist eine der meist verbreiteten photometrischen Messungen. Ein Grund dafür ist, dass OLEDs direkt betrachtet werden können und die Leuchtdichte von allen photometrischen Größen der menschlichen Helligkeitswahrnehmung am nächsten kommt.

Eine Möglichkeit zur Bestimmung einer orts aufgelösten Leuchtdichteverteilung ist der Einsatz einer Leuchtdichtekamera (Imaging Luminance Measurement Devices ILMD). Die Nutzung von bildgebenden CCD-Kameras erlaubt den Vergleich verschiedener Teilflächen innerhalb einer großen leuchtenden Fläche mit nur einer Messung.

## 2.3 Homogenität und Gleichmäßigkeit

Die Homogenität wird als Größe die Unterschiede der Leuchtdichte oder Farbe auf der Oberfläche einer OLED beschreiben. Eine alleinige Berücksichtigung von maximalen und minimalen Leuchtdichtewerten reicht allerdings nicht aus, um die empfundene Homogenität einer OLED ausreichend zu beschreiben. Als wesentliches Kriterium konnte der Gradient der Leuchtdichteänderung über der leuchtenden Fläche identifiziert werden. Wie Abbildung 2-1 zeigt, wirken große Leuchtdichteänderungen zwischen zwei eng benachbarten Punkten wesentlich störender auf einen Betrachter als die gleiche Leuchtdichteänderung zwischen zwei weiter voneinander entfernten Punkten.

Verbreitete Messmethoden für Displays bestimmen die Gleich- bzw. Ungleichmäßigkeit der leuchtenden Fläche, allerdings wird in diesen Definitionen nicht die Wirkung des Gradienten auf den Betrachter berücksichtigt. Daher wird im Folgenden zwischen den Begriffen Gleichmäßigkeit (engl. uniformity) und Homogenität (engl. homogeneity) unterschieden:

Gleich- bzw. Ungleichmäßigkeit beschreibt Verhältnisse von Leuchtdichten und berücksichtigt nur die Definition des CIE-Standardbetrachters. Weitere Einflüsse der visuellen Wahrnehmung werden nicht bewertet. Homogenität bzw. Inhomogenität bewerten die Änderungen der Leuchtdichte unter Beachtung weiterer Einflussgrößen auf die visuelle Wahrnehmung, wie z. B. den Leuchtdichtegradienten.

## 2.4 Anforderungen

Die Bestimmung der Homogenität darf nicht zu kompliziert oder zeitaufwändig sein. Ist ein entsprechendes Messsystem zu komplex, wird es niemand einsetzen. Mit anderen Worten: Es ist nicht hilfreich, eine Formel mit allen möglichen Einflussgrößen zu definieren, wie z. B.:

*Homogenität = f (mittlere Leuchtdichte, maximale Leuchtdichte, minimale Leuchtdichte, Leuchtdichtegradient, umgebende Leuchtdichte, Ort, Alter des Betrachters, Stimmung des Betrachters ...)*

Eine solche Formel mag zwar im Endeffekt die Homogenität möglichst genau beschreiben können, dennoch ist sie nicht praktikabel. Ein hinreichend genaues Modell zur Beschreibung der Homogenität sollte nur die dominanten Parameter, welche die visuelle Wahrnehmung der Homogenität maßgeblich beeinflussen, berücksichtigen. Das OLED100.eu-Projekt ist zu dem Ergebnis gekommen, dass ein wesentlicher Parameter zur Beschreibung der Homogenität der Leuchtdichtegradient ist.

Im Folgenden werden Modelle zur Beschreibung der Homogenität unter Berücksichtigung der Leuchtdichte und des Leuchtdichtegradienten entwickelt.

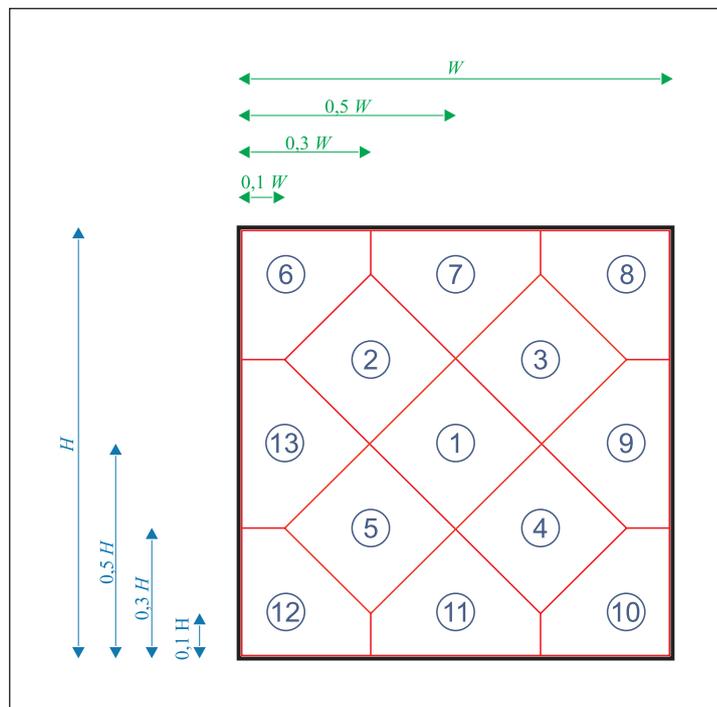
Für die Bestimmung der Homogenität einer OLED ist die symmetrische Unterteilung der Leuchtfläche notwendig. Aus messtechnischer Sicht bietet es sich bei einer rechtwinkligen, flachen Emissionsfläche an, einen Messpunkt in das Zentrum zu

legen und weitere vier, acht oder zwölf zusätzliche Messpunkte symmetrisch um das Zentrum zu verteilen. Die Nutzung von mehr als 13 Messpunkten macht die Messung unverhältnismäßig komplex, ohne zu erkennbaren zusätzlichen Vorteilen zu führen. Die Zahl der Messpunkte zu erhöhen, würde den Arbeitsaufwand erhöhen und insbesondere die Rückführung der Werte und die Bestimmung der beizulegenden Messunsicherheiten erschweren.

Die Positionen der Messpunkte werden nach folgenden Regeln für beliebige rechteckige, ebene Emissionsflächen abgeleitet:

- Die aktive Leuchtfläche wird, wie in Abbildung 2-3 zu sehen, in 13 Segmente (fast) gleichgroßer Fläche unterteilt.
- Jeder Messpunkt  $L_i$  liegt im Zentrum des jeweiligen Segmentes oder so nah wie möglich am Zentrum und muss repräsentativ für das Segment sein.
- Die Messpunktfläche sollte mindestens 10 % der Segmentfläche betragen.

**Abbildung 2-3:**  
Unterteilung des Messobjektes –  $W$  ist die Breite und  $H$  die Höhe der aktiven Leuchtfläche



Die Positionen der Messpunkte in Abbildung 2-3 sind gerundete Werte, die auf optimierten Abständen für exakt gleichgroße Flächen jedes einzelnen Segmentes beruhen. Aufgrund der einfachen Abstandsverhältnisse kann die gezeigte Aufteilung leicht auf andere quadratische oder rechteckige OLEDs übertragen werden. Für nicht rechteckige Lichtaustrittsflächen muss man Anpassungen durchführen, darf dabei aber die oben aufgeführten Grundüberlegungen nicht vernachlässigen. Durch die ausgedehnte Größe des Messpunktes ist sichergestellt, dass Busbarstrukturen die mittlere Leuchtdichte in allen Messpunkten ähnlich reduzieren. Sämtliche Busbarstrukturen gängiger OLED-Designs besitzen Füllfaktoren  $>75\%$ . Dies bedeutet, dass mehr als 75 % der Lichtaustrittsfläche real leuchtende Bereiche und weniger als 25 % mit Busbarstrukturen bedeckt sind. Diese wirken im geringen Umfang als Graufilter auf die Einzelmessung und haben keinen Einfluss auf die makroskopische Bestimmung der Homogenität.

Dieses Modell berücksichtigt keine kleinen Defekte in Form nichtleuchtender Punkte (Dark Spots) auf der leuchtenden Fläche, da diese Defekte nicht reproduzierbar sind und entsprechende OLEDs bereits im Produktionsstadium mittels Qualitätsprüfungen erkannt und aussortiert werden sollten. Diese Mängel sollten bei zum Verkauf angebotenen Produkten nicht auftreten, weshalb sie in der Definition und Messung der Homogenität nicht berücksichtigt werden.

## 2.5 Homogenitäts- und Gleichmäßigkeitsmodelle

Im Folgenden werden gebräuchliche Verfahren zur Bestimmung der Gleichmäßigkeit von Flachbildschirmen mit dem hier vorgestellten Verfahren zur Bestimmung der Homogenität von OLEDs verglichen.

### 2.5.1 Etablierte Gleichmäßigkeitsstandards

In der Industrie wird sehr häufig der VESA-Standard (Video Electronics Standard Association) für FPDM (Flat Panel Display Measurements) [2-2] zur Beschreibung der Gleichmäßigkeit von Flachbildschirmen verwendet. Die Anforderungen für die Bestimmung der Gleichmäßigkeit  $U_{\text{VESA}}$  legen fest, dass das Leuchtdichtemessgerät fünfmal (oder optional neunmal) senkrecht über der Displayoberfläche positioniert wird.

Eine zweite Definition ist in der ISO 13406-2 (International Organization Of Standardization) [2-3] beschrieben. Der Messablauf ist komplex und abhängig von der Displaygröße, dem Blickwinkel, der empfohlenen Position der Augen und einigen anderen Parametern. Im einfachsten Fall, der Bestimmung des Gleichmäßigkeitsverhältnisses  $U_{\text{ISO}}$ , sind drei Messpunkte vorgeschrieben. Dieses Gleichmäßigkeitsverhältnis  $U_{\text{ISO}}$  wird gegen einen maximal erlaubten Grenzwert bewertet. Dieser hängt von verschiedenen Rahmenbedingungen ab und variiert zwischen 1,3 und 1,7. Diese Norm spezifiziert Flachbildschirme für Büroanwendungen.

Die SPWG (Standard Panels Working Group) empfiehlt für die Messung der Gleichmäßigkeit von Bildschirmen 13 Messpunkte [2-4]. Die Anordnung entspricht im Wesentlichen den hier gezeigten Anforderungen für die Homogenitätsmessung, unterscheidet sich aber in der Größe der einzelnen Segmente. Diese sind nicht gleich groß. Ein weiterer Unterschied zu allen anderen Normen ist die Definition des Wertes 0 % für  $U_{\text{SPWG}}$  als perfekt gleichmäßige Leuchtdichteverteilung.

$$U_{\text{VESA}} = \frac{L_{\text{min}}}{L_{\text{max}}} \times 100\% \quad U_{\text{ISO}} = \frac{L_{\text{max}}}{L_{\text{min}}} \quad U_{\text{SPWG}} = \frac{L_{\text{max}} - L_{\text{min}}}{L_{\text{max}}} \times 100\%$$

Gleichung 2-1  
Gleichung 2-2  
Gleichung 2-3

### 2.5.2 Modelle zur Beschreibung der Homogenität

In den folgenden Modellen wird die Leuchtdichtehomogenität als Kennzahl für die homogene Leuchtdichteverteilung der aktiv leuchtenden Oberfläche von OLEDs vorgestellt. Dabei wird unter anderem der Leuchtdichtegradient berücksichtigt. Wie anfangs erklärt, ist dieser Wert maßgeblich für die Definition der Homogenität. Außerdem wird gezeigt, dass alternative Näherungen möglich sind. Im ersten

Modell wird nur der maximale Leuchtdichtegradient berücksichtigt, während das zweite Modell einen mittleren Leuchtdichtegradienten beachtet. Konsequenterweise wird das erste Modell als Homogenität und das zweite als mittlere Homogenität definiert.

Der Abstand zweier Messpunkte folgt dem Satz des Pythagoras. Nutzt man  $i$  und  $j$  als Positionen der Messpunkte, so erhält man:

**Gleichung 2-4** 
$$d_{ij} = \sqrt{(\vec{i} - \vec{j})^2}$$

Die mittlere Leuchtdichte der OLED ergibt sich aus:

**Gleichung 2-5** 
$$L_{\text{mean}} = \frac{1}{13} \left( \sum_{i=1}^{13} L_i \right)$$

Daraus folgend kann man die Homogenität  $H$  wie folgt definieren:

**Gleichung 2-6** 
$$H = 1 - \text{Max} \left[ \frac{|L_i - L_j|}{(d_{ij})^\varepsilon} \right] \bigg/ \frac{L_{\text{mean}}}{(\text{Max}[d_{ij}])^\varepsilon}$$

Hierbei stellen  $L_i$  und  $L_j$  die Leuchtdichtewerte der Messpunkte  $i$  und  $j$  dar. Im Zähler wird der größte Gradient zwischen den einzelnen Messpunkten ermittelt. Der Quotient im Nenner dient zum Normieren der Werte.

Im zweiten Modell wird der Mittelwert aller Gradienten berücksichtigt:

**Gleichung 2-7** 
$$H_{\text{mean}} = 1 - \sum \left[ \frac{|L_i - L_j|}{(d_{ij})^\varepsilon} \right] \bigg/ \frac{L_{\text{mean}}}{(\text{Max}[d_{ij}])^\varepsilon}$$

Der Exponent  $\varepsilon$  kann in beiden Formeln verwendet werden, um die Homogenitätswerte an die visuelle Wahrnehmung anzupassen. Die Variation von  $\varepsilon$  ändert allerdings nicht eine Rangfolge verschiedener OLEDs, sondern nur die relativen Abstände der Homogenitätswerte zueinander. Durch vernünftige Wahl von  $\varepsilon$  soll damit die Bewertung der Homogenität auch für Laien möglich sein. Ein mögliches Bewertungsschema für die Homogenität wird in Tabelle 2-1 gezeigt.

**Tabelle 2-1:**  
Bewertungs-  
schema für die  
Homogenität

Homogenität	Visuelle Wahrnehmung der leuchtenden Fläche
100 % - 80 %	Sehr homogen. Es kann keine Helligkeitsschwankung auf der leuchtenden Fläche mit dem Auge erkannt werden.
80 % - 60 %	Homogen. Es ist eine leichte, aber nicht störende Änderung der Helligkeit zu bemerken.
60 % - 40 %	Inhomogen. Die Änderungen der Helligkeit auf der leuchtenden Fläche wirken störend.
Kleiner 40 %	Sehr inhomogen.

## 2.6 Ergebnisse der Simulation

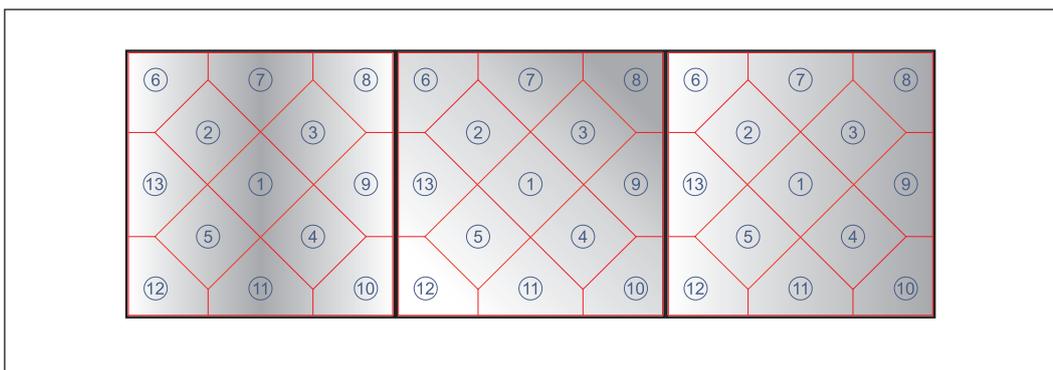
Tabelle 2-2 gibt eine Übersicht über die Werte, die mittels der vom OLED100.eu-Projekt vorgeschlagenen Formeln ermittelt wurden. Die Werte  $L_{\text{min}}$  und  $L_{\text{max}}$  sind für

alle dargestellten Leuchtdichteverteilungsmuster gleich. Diese liegen konstant bei 950 cd/m<sup>2</sup> und 1050 cd/m<sup>2</sup>. Es ist offensichtlich, dass die Standards für Displays nicht zwischen unterschiedlichen Mustern differenzieren, was die Notwendigkeit zur Verwendung einer anderen Methode für Beleuchtungszwecke unterstreicht. Die beiden Homogenitätsformeln ermitteln eine Rangfolge zwischen den Leuchtdichteverteilungsmustern. Diese Rangfolge ist auch bei unterschiedlichen Werten für  $\varepsilon$  gleich. Als Bezug dienen die drei in Abbildung 2-4 dargestellten, simulierten Muster. Die Unterschiede sind offensichtlich. Die Formel für die Homogenität fokussiert auf den maximalen Leuchtdichtegradienten, woraus sich eine große Streuung der Werte ergibt. Die mittlere Homogenitätsformel berücksichtigt den mittleren Leuchtdichtegradienten, so dass die unterschiedlichen Werte näher beieinander liegen. Im Allgemeinen liefert die zweite Formel auch höhere Werte. Weiterhin ist der Einfluss von  $\varepsilon$  auf die mittlere Homogenitätsformel eher gering, während er einen starken Einfluss auf die Homogenität hat.

Distribution Pattern	Bathtub	Corner to Corner	Side to Side
$H_{\varepsilon = 1}$	72.0 %	90.0 %	85.9 %
$H_{\varepsilon = 0.5}$	83.3 %	90.0 %	88.1 %
$H_{\text{mean}} \varepsilon = 1$	95.3 %	97.4 %	96.2 %
$H_{\text{mean}} \varepsilon = 0.5$	95.3 %	97.2 %	95.9 %
$U_{\text{VESA}}$	90.5 %	90.5 %	90.5 %
$U_{\text{ISO}}$	110.5 %	110.5 %	110.5 %
$U_{\text{SPWG}}$	9.5 %	9.5 %	9.5 %
$1 - ((L_{\text{max}} - L_{\text{min}}) / (L_{\text{max}} + L_{\text{min}}))$	95.0 %	95.0 %	95.0 %
$1 - ((L_{\text{max}} - L_{\text{min}}) / (L_{\text{ave}}))$	90.1 %	90.0 %	90.0 %

Grün markiert sind die Werte mittels der von OLED100.eu vorgeschlagenen Formeln; Orange sind die Werte, die mittels verschiedener Verfahren aus der Displaycharakterisierung ermittelt wurden. Die Homogenitätswerte wurden zur besseren Vergleichsmöglichkeit in Prozent angegeben. In allen Fällen wurden  $L_{\text{min}}$  und  $L_{\text{max}}$  konstant gehalten (950 cd/m<sup>2</sup> und 1050 cd/m<sup>2</sup>).

Als erstes Ergebnis kann man sagen, dass die Formel für die Homogenität mit einem Gewichtungsfaktor  $\varepsilon = 0,5$  akzeptable Werte mit vernünftiger Streuung liefert, die mit den hier gezeigten Leuchtdichtemustern korrelieren. Hiermit ist die allgemeine Anwendbarkeit der Formeln natürlich noch nicht bewiesen. In naher Zukunft werden umfassende Wahrnehmungsstudien durchgeführt, um die Korrelation zwischen der empfundenen Helligkeitsverteilung und den entsprechenden Homogenitätswerten zu bestimmen.



**Tabelle 2-2:** Simulationsergebnisse der Homogenität und Gleichmäßigkeit für die drei Leuchtdichteverteilungsmuster

**Abbildung 2-4:** »Bathtub«-Leuchtdichteverteilungsmuster (links), »Corner to corner«-Leuchtdichteverteilungsmuster (Mitte) und »Side to Side«-Leuchtdichteverteilungsmuster (rechts)

## 2.7 Zusammenfassung

Der Bedarf eines neuen Standards, welcher die Homogenität für flächenhafte Strahler definiert, ist klar erkennbar. Die hier gezeigten und häufig verwendeten Methoden aus der Bildschirmindustrie sind allerdings nicht geeignet. Die hier vorgestellten Modelle des OLED100.eu-Projektes stellen einen Anfang der Beschreibung der Homogenität von OLEDs für Beleuchtungszwecke dar. Beide Modelle verwenden bildgebende Leuchtdichtemessgeräte und berücksichtigen unterschiedliche Helligkeitsverteilungen bei den Leuchtdichtegradienten. Hierdurch kann trotz gleicher Maximal- und Minimalleuchtdichte zwischen verschiedenen Leuchtdichteprofilen differenziert werden.

Die Formeln enthalten den Exponenten  $\varepsilon$ , der einen Zusammenhang zwischen der resultierenden Homogenität und der menschlichen Wahrnehmung herstellen soll. Zur Bestimmung realistischer Werte dieses Exponenten und einer allgemeinen Anwendbarkeit der Modelle sind noch Wahrnehmungsstudien notwendig. Anregungen und Kommentare zu den hier vorgestellten Modellen sind erwünscht.

## 2.8 Literatur

- [2-1] CIE Division 2 TC2-68: *Optical Measurement Methods for OLEDs used for Lighting*, TC-Chair: Thorsten Gerloff (PTB, Germany).
- [2-2] Video Electronics Standards Association (VESA), Flat Panel Display Interface Committee, Flat Panel Display Measurements Standard Working Group, *Flat Panel Display Measurements Standard FPDM Version 2*, 2005.
- [2-3] International Organization for Standardization, *ISO 13406-2:2001 and EN ISO 13406-2:2003*, 2001.
- [2-4] Standard Panels Working Group, *SPWG 3.8*, 2007.

## Danksagung

The work leading to these results has received funding from the European Community's Seventh Framework Programme under grant agreement n° FP7-224122 (OLED100.eu).

Diese Veröffentlichung ist auf Anregung des Technisch-Wissenschaftlichen Ausschusses der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft e.V. entstanden.

*Dipl.-Chem. Thorsten Gerloff, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)*  
*Dipl.-Ing. (FH) Dirk Friedrich, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)*  
*Dr. Karsten Diekmann, Senior Manager, Osram OLED GmbH, Regensburg*

# 3 Anwendung von modifizierten Farbmesskameras für photometrische Messungen im mesopischen Bereich

## 3.1 Einleitung

Mit der Schrift CIE81-1989 [3-1] stellte die CIE einen Bericht zur Verfügung, der eine Vielzahl von Modellen für die verschiedensten Einsatzfälle im mesopischen Leuchtdichtebereich enthält. Dabei wurde klargestellt, dass es nicht eine Methode geben kann, um eine Bewertung von Szenen vorzunehmen, sondern die Methode auf der Basis der Aufgabenstellung ausgewählt werden muss. In den letzten beiden Jahren wurden von der CIE zwei weitere Reports veröffentlicht [3-2] [3-3], die sich der mesopischen Modellierung widmen und aufgabenspezifische Modelle vorschlagen, die auf der Basis umfangreicher Untersuchungen entstanden sind.

## 3.2 Photometrie

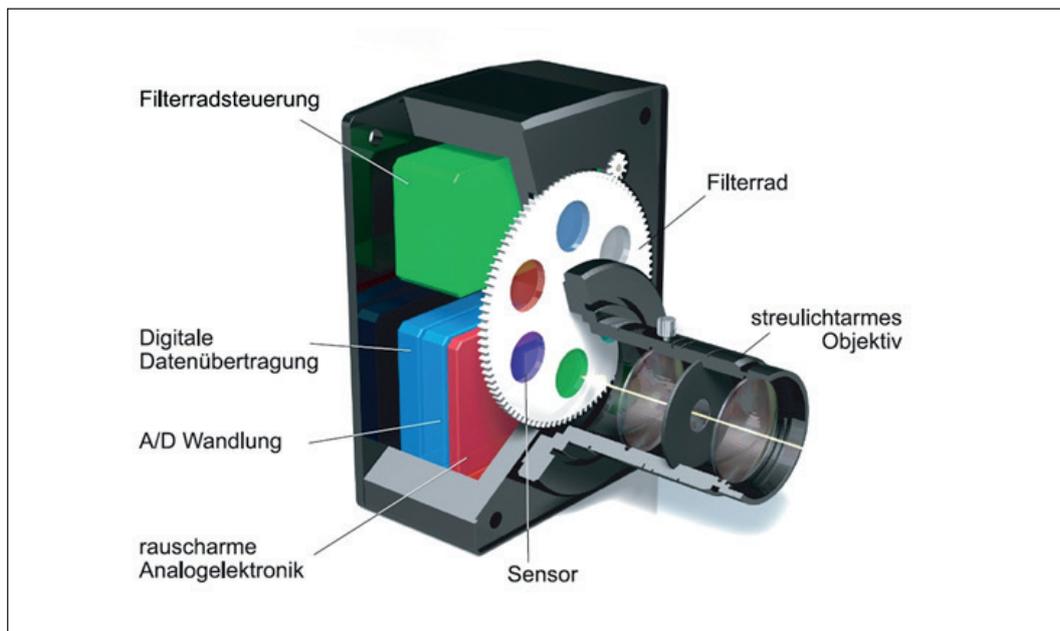
Die Erfassung einer Szene mit ortsauflösenden Leuchtdichtekameras [3-4] ist derzeit bei vielen Anwendungen schon Stand der Technik. Dabei wird in der Regel mit Hilfe eines Vollfilters die spektrale Empfindlichkeit des Gesamtsystems (bestehend aus Objektiv, Anpassungsfilter und Sensor) auf die spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges für das Tagsehen ( $2^\circ$ -Normalbeobachter;  $V(\lambda)$ ) angepasst [3-5]. Man erhält dabei, mit kalibrierten und rückgeführten Geräten, Leuchtdichtebilder, bei denen die einzelnen Pixel Leuchtdichtewerte in  $\text{cd}/\text{m}^2$  enthalten (Abbildungen 3-1 und 3-2).

Diese Systeme können mit weiteren Filtern erweitert werden, sodass auch Bilder mit Farbinformationen (spektrale Anpassung entsprechend  $2^\circ$ -Normalbeobachter [3-6]) und Bilder mit skotopisch angepasster spektraler Empfindlichkeit ( $V'(\lambda)$ ; [3-7]) erstellt werden können.

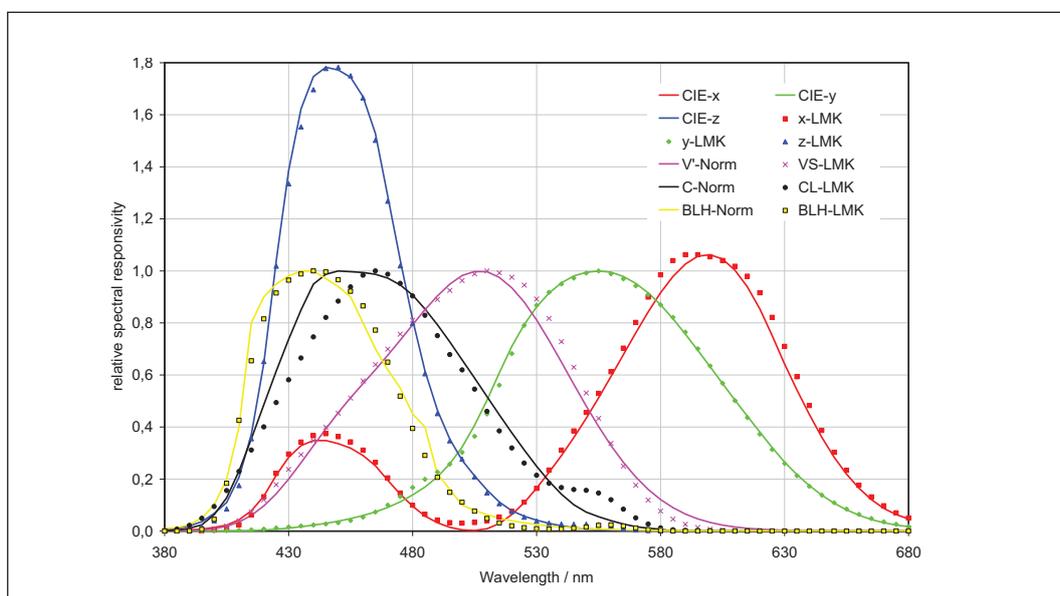
Dabei ist zu beachten, dass die Leuchtdichte und die weiteren definierten Größen reine messtechnische Größen darstellen. Es handelt sich hier jeweils um das Integral der bewerteten spektralen Strahldichte mit verschiedenen Bewertungsfunktionen. Eine Verbindung zu wahrnehmungsphysiologischen Größen wie Helligkeit, Erkennbarkeit, Kontrasten oder Reaktionszeiten kann in der Regel nicht direkt angegeben werden und unterliegt starken Abhängigkeiten von weiteren Größen wie Adaptation, Sehwinkel u.v.m. (siehe u. a. [3-8] und [3-9]).

Weiterhin ist anzumerken, dass sich die Einheit der verwendeten Größen bei Änderung der Wichtungsfunktion nicht verändert. Es gibt keine skotopischen oder mesopischen  $\text{cd}/\text{m}^2$  oder gar mesopische  $\text{lm}$  o.ä.! Durch die Beschreibung der Messgröße (Symbol oder Erläuterung) muss die verwendete Wichtungsfunktion daher deutlich zum Ausdruck gebracht werden. Bestimmte Messgrößen ergeben aber auch wahrnehmungsphysiologisch keinen Sinn (z. B. mesopischer Lichtstrom [ $\text{lm}$ ]) und sind daher nicht anzugeben [3-10].

**Abbildung 3-1:**  
Schematische  
Zeichnung einer  
Farbkamera mit  
Filterrad



**Abbildung 3-2:**  
Zusammenfassung  
der derzeit reali-  
sierten spektralen  
Empfindlichkeiten  
(Vergleich von  
Soll- und Ist-  
Funktion) für das  
Filterradsystem  
aus Abbildung 3-1



Weiterhin wird in einigen Modellen (z. B. von Kokoschka) der 10°-Normalbeobachter [3-11] verwendet, für den es aber kein photometrisches Äquivalent gibt, d. h. dieser Beobachter kann in der Regel nicht für photometrische Messungen verwendet werden [3-12]. Da es aufgrund der Verteilung von Zapfen und Stäbchen auf der Netzhaut jedoch zu Unterschieden in der spektralen Empfindlichkeit des Auges und somit auch in den abhängigen wahrnehmungsphysiologischen Größen kommt [3-9], sollte der Unterschied zwischen den 2°- und 10°-Normalbeobachtern ggf. mit Hilfe spektraler Korrekturfaktoren berücksichtigt werden (SMCF; [3-13]).

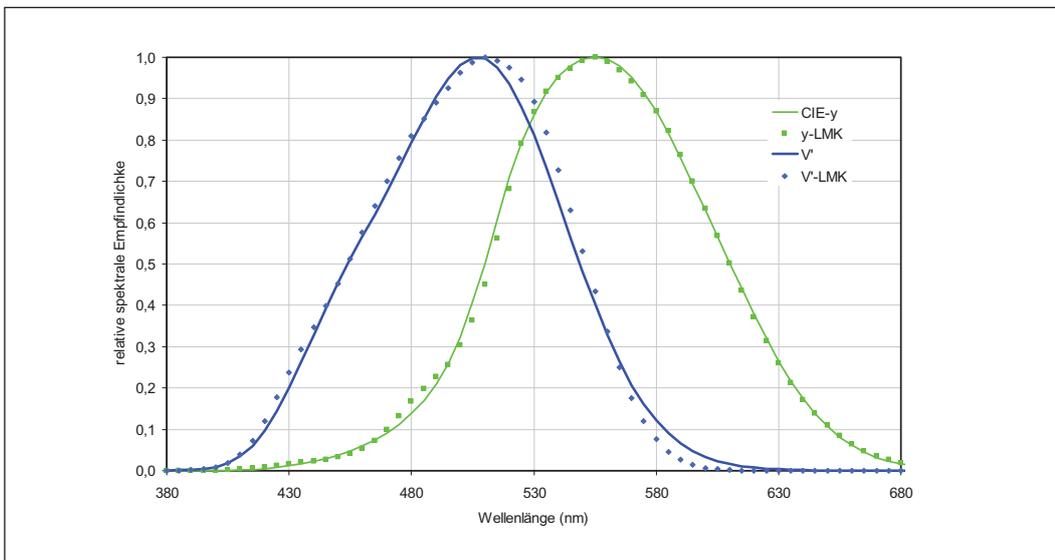
In Zukunft könnte auch der Ort des Reizes eine immer größere Rolle [3-9] spielen und somit Geräte erfordern, die nicht nur die Leuchtdichte und Farbbilder zur Verfügung stellen, sondern auch den Ort der Reize. Hierzu sind dann Leuchtdichte- und Farbmesskameras vom Type II einzusetzen, die neben der photometrischen Kalibrierung auch eine geometrische Kalibrierung mitbringen [3-4].

Die Modelle aus [3-3] sind in der Regel für die Bestimmung äquivalenter Leuchtdichten nicht geeignet, da hier zwar eine Entscheidung der Art Heller/Dunkler getroffen werden kann, aber keine Skala zur Verfügung steht, d. h. man nicht entschei-

den, ob ein Objekt doppelt so hell wie ein anderes ist. Daher werden für die messtechnische Realisierung wohl die Modelle aus [3-2] bevorzugt werden, obwohl bei der Verwendung des Begriffes äquivalente Leuchtdichte stets Erklärungsbedarf bestehen wird, um dem Anwender zu erläutern, dass dies nicht in Bezug auf die Helligkeit gemeint ist.

### 3.2.1 Realisierte Systeme

Mit den vorwiegend von Universitäten eingesetzten Farbkamerasystemen mit zusätzlichen skotopischen Filtern ist es also möglich, neben einem Leuchtdichte-Farbbild auch ein Bild mit skotopischer spektraler Wichtung  $V'(\lambda)$  der Szene zu erfassen (Abbildung 3-3).



**Abbildung 3-3:** Unterschied zwischen realisierter (Einzelpunkte) und vorgegebener (durchgezogene Linien) spektraler Empfindlichkeit für den photopischen und skotopischen Filter einer Filterradkamera

### 3.2.2 Vorgehen bei der Messung

Für die Messung der mesopischen Größen sind Geräte erforderlich, mit denen auf die verschiedenen Aspekte der Modellierung eingegangen werden kann:

- Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte
- Bestimmung der Farbwerte (je nach Modell)
- Bestimmung photopischer und skotopischer Leuchtdichten
- Berechnung eines mesopischen Leuchtdichtebildes mit äquivalenten Leuchtdichten

Wie die Adaptationsleuchtdichte inhomogener Szenen bestimmt werden muss, ist derzeit noch stark umstritten. Es wird sich jedoch allgemein gesprochen um eine örtlich gewichtete Leuchtdichte handeln, die aus dem Y-Kanal des Farbbildes bzw. aus dem Leuchtdichtebild bestimmt werden kann. Für erste praktische Messungen könnte man auf Größen wie  $L_{20}$  oder die Augenbeleuchtungsstärke zurückgreifen. Mit Hilfe der Modellparameter, die neben der Adaptationsleuchtdichte ggf. noch vom Blickwinkel des Betrachters (bzw. von der Winkeldifferenz zwischen Betrachterblickwinkel und Objektwinkel) oder den jeweiligen Leuchtdichte- und Farbwerten abhängen, können dann mesopische Leuchtdichtebilder für die verschiedenen Anwendungen bestimmt werden.

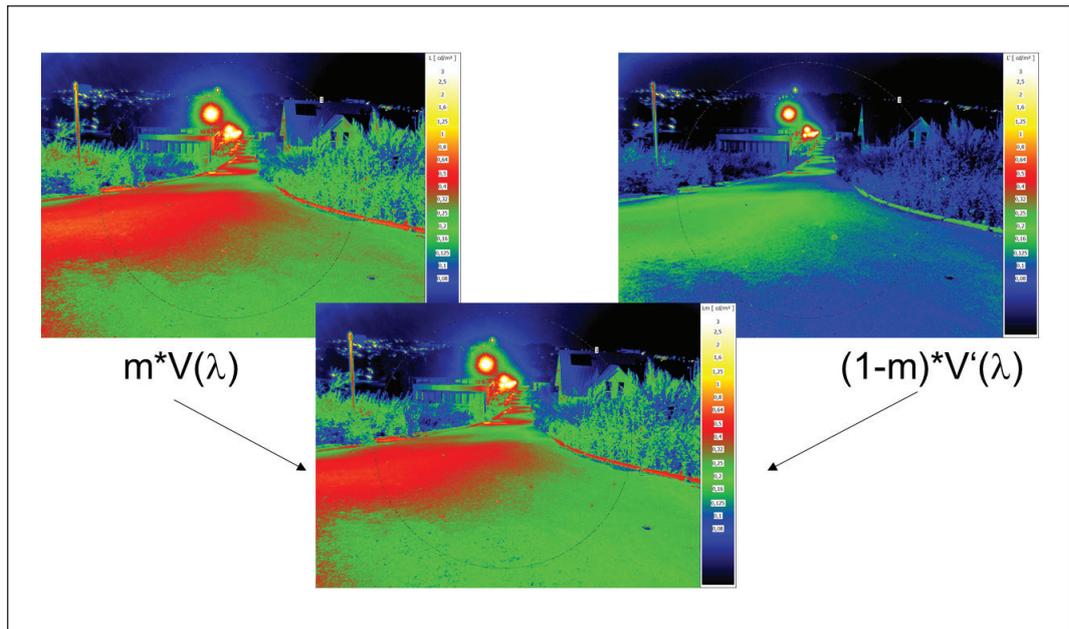
### 3.3 Beispiel

Am Beispiel der Bewertung einer Straßenszene (Nebenstraße in Ilmenau) mit Hilfe des Modells aus [3-2], das schon in [3-14] vorgestellt wurde, wird dieses Vorgehen erläutert (Abbildungen 3-4 und 3-5).

**Abbildung 3-4:** Leuchtdichtebild (photopisch) mit  $L_{20}$ -Kreis zur Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte (lineare Skalierung)



**Abbildung 3-5:** Zusammenfassung des photopischen (links oben) und des skotopischen (rechts oben) Leuchtdichtebildes zum Bild mit der äquivalenten mesopischen Leuchtdichte entsprechend des verwendeten Modells; alle Bilder dieser Abbildung mit logarithmischer Skalierung



Mit den Eingangsgrößen  $L_{20} = 0,67 \text{ cd/m}^2$  und  $L'_{20} = 0,33 \text{ cd/m}^2$  wurde das S/P Verhältnis zu 0,49 bestimmt und damit der Modellparameter  $m$  zu 0,69. Es ist anzumerken, dass diese Berechnung aufgrund der nicht vorhandenen Orts- oder Richtungsabhängigkeit des gewählten Modells nur einmal für das Bild ausgeführt werden muss und dann das ganze Bild mit der äquivalenten Leuchtdichte bestimmt werden kann. Dass dies für den Bereich der Fovea nicht zutreffen wird, ist schon in [3-2] vermerkt. Mit der modifizierten Farbmesskamera können nicht nur mesopische Leuchtdichten entsprechend eines Modells ermittelt werden, sondern es können mit Hilfe der zu Grunde liegenden Messdaten (Farbbild, skotopisches Leuchtdichtebild, Winkelzu-

ordnung der Pixel) die Werte nach verschiedenen Modellen bestimmt werden. Die Messung geht dabei sehr schnell (wenige Minuten) und die Auswertung kann im Labor erfolgen, wobei durch die erfasste Bildinformation die Zuordnung der Auswertebereiche zur Szene jederzeit kontrolliert werden kann.

### 3.4 Ausblick

Die genaue messtechnische Umsetzung des Modells aus [3-2] wird derzeit im CIE TC 2-65 »Photometric Measurements in the Mesopic Range« unter Leitung von Teresa Goodman diskutiert.

Die Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte inhomogener Szenen, des entscheidenden Parameters für die Modellanwendung, ist Inhalt des JTC 001 »Implementation of the CIE 191:2010 Mesopic Photometry in Outdoor Lighting« unter Leitung von Liisa Halonen.

Aus messtechnischer Sicht sind entsprechend modifizierte Farbmesskameras bei mehreren Instituten im Einsatz und werden für die Validierung und die Entwicklung von neuen Modellen aktiv eingesetzt, wobei die Modellierung meist über externe Software erfolgt, die direkt auf die Kamerasteuerung zugreifen kann. In Zukunft ist die Implementierung wichtiger Modelle direkt in der Software der Kameraansteuerung geplant, um die Auswertung auch einem breiteren Benutzerkreis zugänglich zu machen.

### 3.5 Literatur

- [3-1] CIE Technical Report, Mesopic Photometry: History, Special Problems and Applications. Publ. CIE 81-1989, 1989.
- [3-2] CIE Technical Report, Recommended System for Mesopic Photometry based on Visual Performance. Publ. CIE 191-2010, 2010.
- [3-3] CIE Technical Report, CIE Supplementary System of Photometry. Publ. CIE 200-2011, 2011.
- [3-4] CIE Characterization of Imaging Luminance Measurement Devices (ILMD). Draft 1.5, Div. 2, TC2-59, 2011.
- [3-5] CIE, 6<sup>e</sup> Session, 1924, Commission Internationale de l'Eclairage Compte Rendu des Séances, Cambridge University Press, S. 67-70, 1926.
- [3-6] CIE Technical Report, Colorimetry, Publ. CIE 15.2-1986, 1986.
- [3-7] CIE: Compte Rendu. 12<sup>th</sup> Session, Stockholm V3, S. 32-40, CIE Central Bureau Vienna, 1951.
- [3-8] Schierz, Ch.: Wie wird Leuchtdichte subjektiv als Helligkeit wahrgenommen? Lux- Junior, Dörnfeld bei Ilmenau, 2007.
- [3-9] Raphael, S.: Characterization of Mesopic Vision for Luminance Photometry. Diss., Universität Paderborn, 2010.
- [3-10] Goodman, T: The Mesopic Lumen: Fact or Fiction? Proceedings of the 27<sup>th</sup> Session of the CIE, SunCity / South Africa, S. 192-196, 2011.
- [3-11] CIE: 10 Degree Photopic Photometric Observer. CIE 165:2005, 2005.
- [3-12] CIE: Proceedings of the CIE 15<sup>th</sup> session, Vienna, Vol. A, 1963, CIE, 1964.

- [3-13] CIE DS 023/E:2012: Characterization of the Performance of Illuminance Meters and Luminance Meters, Commission Internationale de L'Eclairage, 2012.
- [3-14] Krüger, U.; Bieske, K.: Combining Imaging Measurement Results for Vision Evaluation in the Field of Mesopic Vision and Colour Evaluation. 2<sup>nd</sup> CIE Expert Symposium on Appearance. Gent, 2010.

*Dr. Ing. Udo Krüger, apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Franz Schmidt,  
TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH*

## 4 Streulichtkorrektur bei Array-Spektralradiometern

### 4.1 Einleitung

Die spektralen Eigenschaften der Strahlung von Lichtquellen, z. B. LEDs, d. h. ihre Strahlungsfunktionen, können mit Hilfe von Array-Spektralradiometern innerhalb sehr kurzer Zeit bestimmt werden. Die Geräte sind daher, z. B. in der Fertigungskontrolle, besonders gut einsetzbar. Im Vergleich mit konventionellen (scannenden) Doppelmonochromatoren haben Array-Spektralradiometer aber auch Nachteile. Einer der wichtigsten ist die oft nicht ausreichende Unterdrückung des Fehlstrahlungsanteils oder des sogenannten »spektralen Streulichts« [4-1].

Als spektrales Streulicht bezeichnet man den im Messwert bei einer Wellenlänge  $\lambda$  des Spektralradiometers enthaltenen Anteil, der durch Strahlung aus anderen Wellenlängenbereichen hervorgerufen wird. Dieser Anteil wird durch den Aufbau des Array-Spektralradiometers und den Eigenschaften der weiteren darin enthaltenen optischen Komponenten beeinflusst. Solange die zur Kalibrierung verwendete Strahlungsfunktion der zu messenden sehr ähnlich ist, heben sich die Fehler durch das spektrale Streulicht – wie bei jeder Substitution – weitgehend auf.

Bei der Messung von LEDs unterscheiden sich die Strahlungsfunktionen der zur Kalibrierung verwendeten Halogenlampe mit Planck-ähnlicher Strahlungsfunktion sowie der zu messenden LED erheblich und die Messfehler können aufgrund der nicht ausreichenden Unterdrückung des Fehlstrahlungsanteils das Messergebnis signifikant verfälschen. Die Streulichteigenschaften eines Array-Spektralradiometers können mit Hilfe von Lasern bestimmt werden, die in der Wellenlänge durchstimmbare sind. Die Kenntnis der Streulichteigenschaften kann zur numerischen Korrektur der streulichtbedingten Messfehler verwendet werden [4-2, 4-3].

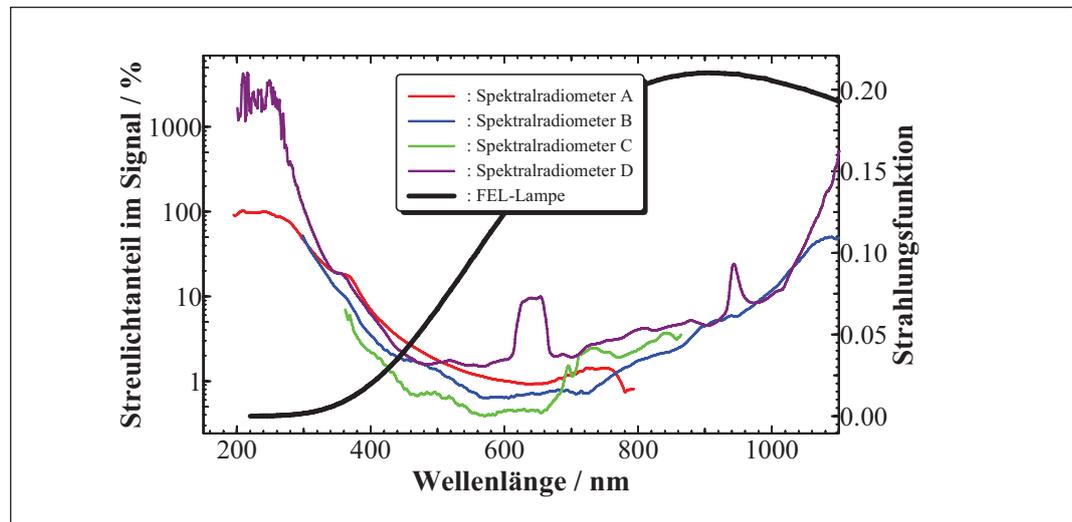
### 4.2 Ursachen und Wirkung des spektralen Streulichts

Spektrales Streulicht im Array-Spektralradiometer wird erzeugt durch nicht ideale Eigenschaften der Beugungsgitter und Streuung der eingebrachten Strahlung an optischen Bauteilen. Maßgeblich sind Umlenk- und Kollimationsspiegel sowie unkontrollierte mehrfache Reflektionen zwischen optischen Komponenten mit reflektierenden Oberflächen, aber auch Rückwirkungen im Inneren der optischen Zellen des Detektors im Spektralradiometer und eine Verstärkung durch die kompakte Bauart.

Der Anteil des Streulichts in den Messsignalen eines Array-Spektralradiometers variiert bei der Bestrahlung mit schmalbandiger Laserstrahlung von mindestens  $10^{-5}$  bis typischerweise von  $10^{-3}$ . Bei der Messung einer breitbandigen Strahlungsquelle summieren sich die Streulichtbeiträge von jeder einzelnen Wellenlänge, wodurch der gesamte Streulichtbeitrag das Messsignal signifikant verfälschen kann. Der Fehler durch das spektrale Streulicht wächst in dem Maße, wie sich die Strahlungsfunktion des Messobjektes von derjenigen der Kalibrierlichtquelle zur Bestimmung der Empfindlichkeit des Array-Spektralradiometers unterscheidet.

Beim Substitutionsverfahren wird die Wirkung des Streulichts minimal, wenn die Kalibrier- sowie Messlichtquellen eine sehr ähnliche Strahlungsfunktion haben. Eine Halogenlampe, die typischerweise für die Empfindlichkeitskalibrierung des Gerätes verwendet wird, erzeugt viel Streulicht im Array-Spektralradiometer (siehe Abbildung 4-1). Die Wirkung des Fehlers durch das Streulicht wird aber minimal, falls eine Lampe gleichen Typs mit dem so kalibrierten Gerät gemessen wird. Wird aber eine tiefblaue LED mit dem kalibrierten Spektralradiometer gemessen, so kann der relative Fehler durch Streulicht sogar bis zu 100 % des Messsignals betragen.

**Abbildung 4-1:** Streulichtanteile in den Messsignalen von vier unterschiedlichen Spektralradiometern bei der Kalibrierung mit einer Halogenlampe des FEL-Typs

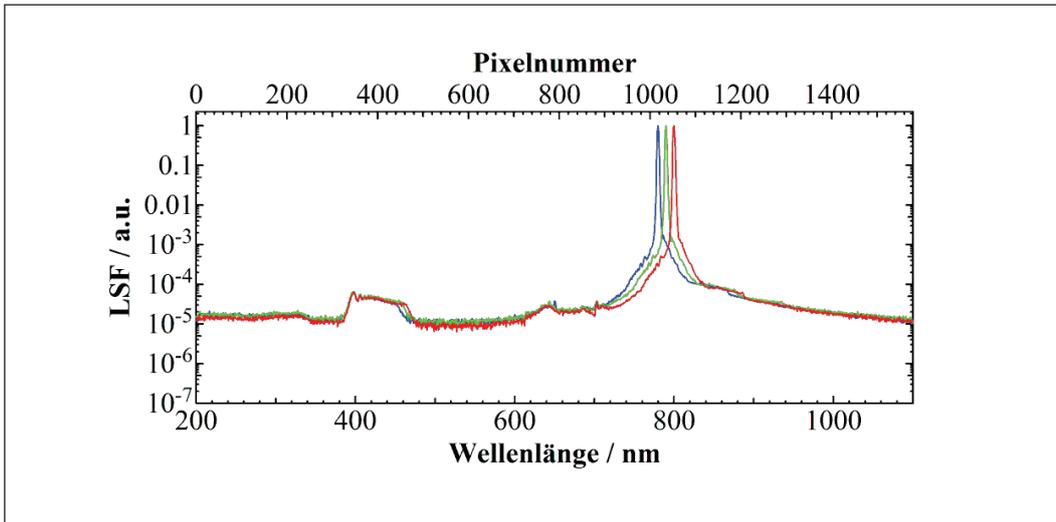


### 4.3 Bestimmung der Streulichtkorrekturmatrix

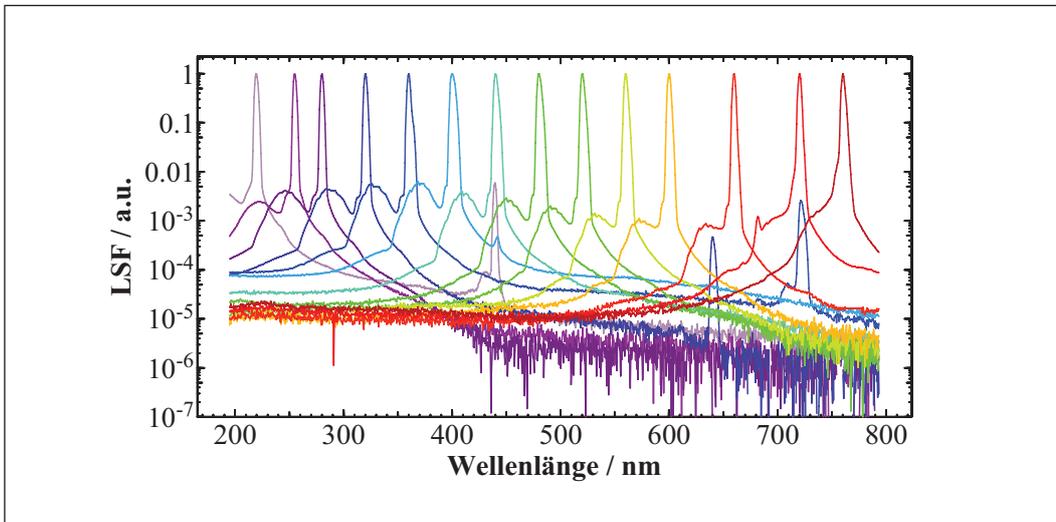
Das spektrale Ansprechverhalten des Spektralradiometers – die sogenannte »Line Spread Function« (LSF) – kann für jeden Anregungspixel bestimmt werden (siehe Abbildungen 4-2 bis 4-4). Die LSF kann zu einer Matrix, wie z. B. in [4-2] beschrieben, zusammengefasst werden, die zur numerischen Korrektur der Streulichtfehler in den Messsignalen dient und eine Reduzierung des Streulichtanteils im Signal um den Faktor 10 bis 100 ermöglicht.

Die Linienausdehnungsfunktion LSF wird als spektrale Antwort  $f_{LSF,i,j}$  des Gerätes auf die Anregung mit der monochromatischen Strahlung einer Wellenlänge  $\lambda_j$  definiert. Der Index »i« im Symbol  $f_{LSF,i,j}$  steht für die Nummer des ausgelesenen Pixels im Detektor eines CCD-Spektralradiometers. Die LSF kann mit einer schmalbandigen Strahlungsquelle mit durchstimmbarer Wellenlänge bestimmt werden, d. h. mit einem in der Wellenlänge durchstimmbaren Laser. Die LSF bei der Anregung der benachbarter Pixel sind sich meist sehr ähnlich (siehe Abbildung 4-2), daher kann der Aufwand zur Bestimmung der LSF-Matrix reduziert werden. Meist reicht es, die LSF nur für eine deutlich reduzierte Anzahl von Pixeln wirklich zu messen und die LSFs für dazwischen liegende Pixel jeweils aus den gemessenen LSF benachbarter Pixel  $j$  zu interpolieren.

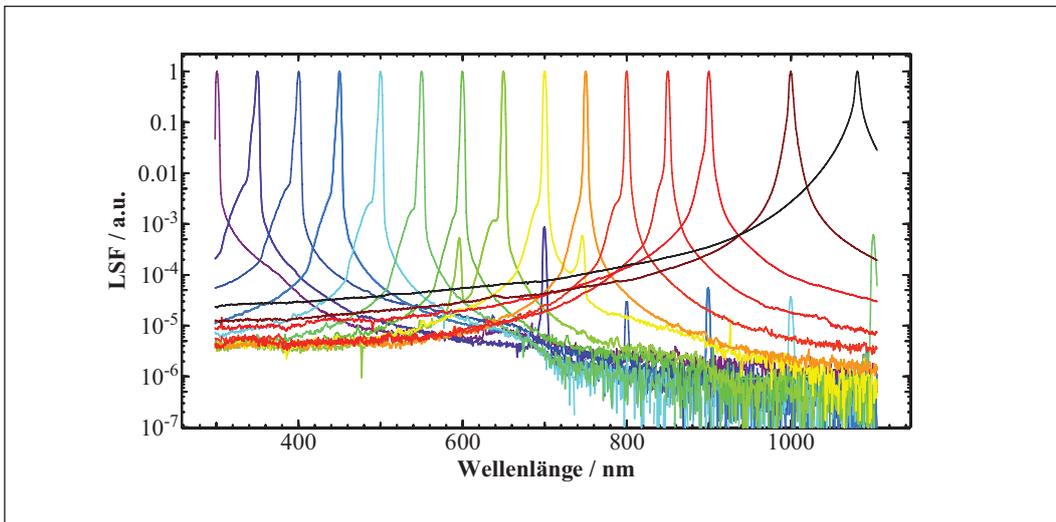
Wesentlich bei der Bestimmung der LSF ist eine ausreichende Auflösung, deshalb erfolgt die Messung im zweistufigen Verfahren: Zunächst wird eine LSF so gemessen, dass der Messbereich voll ausgenutzt wird. Anschließend wird mit mindestens zehnfacher Übersteuerung im Peakbereich eine zweite Messung ausgeführt.



**Abbildung 4-2:** Linienausdehnungsfunktionen (LSF) des Array-Spektralradiometers D für Anregungen mit Laserstrahlung der Wellenlängen 780 nm, 790 nm und 800 nm



**Abbildung 4-3:** Linienausdehnungsfunktionen (LSF) des Array-Spektralradiometers A bei ausgewählten Anregungswellenlängen



**Abbildung 4-4:** Linienausdehnungsfunktionen (LSF) des Array-Spektralradiometers B bei ausgewählten Anregungswellenlängen

Diese hat zum Ziel, Messsignale im Bereich der Flanken des Peaks und zu den Pixeln hin zu den Rändern besser zu konditionieren. Das Ergebnis der Streulichtcharakterisierung eines  $N$ -Pixel-Array-Spektralradiometers, beispielsweise in den Abbildungen 4-3 und 4-4, ist Grundlage, um zunächst eine  $N \times N$  Streulichtverteilungsmatrix  $\mathbf{D}$  und daraus schließlich die Streulichtkorrekturmatri  $\mathbf{C}$  zu berechnen [4-2].

## 4.4 Anwendung der Streulichtkorrekturmatrix

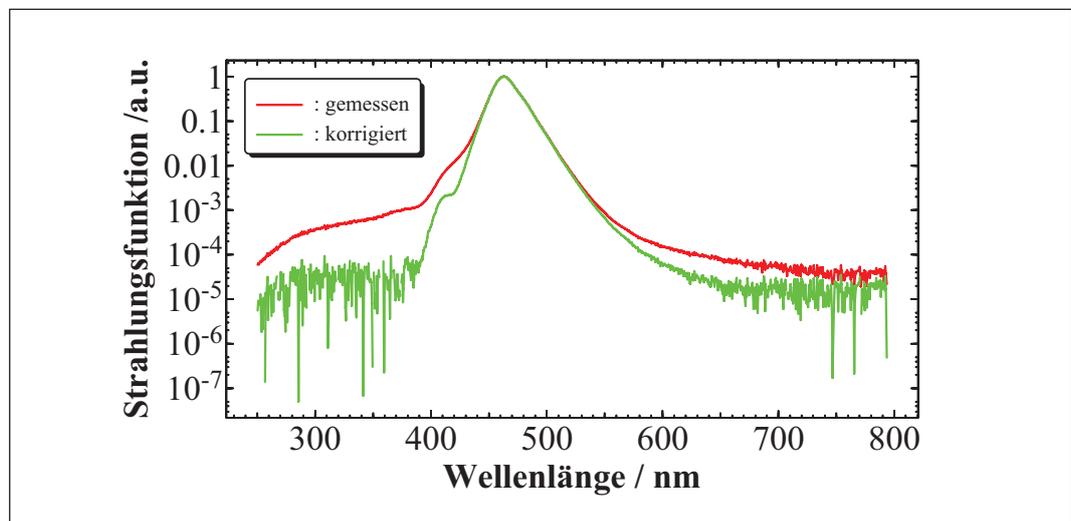
Werden die Messsignale eines Array-Spektralradiometers als Vektoren symbolisiert sowie die gemessenen Funktionswerte  $\mathbf{X}'$  um die zugehörigen Dunkelsignale  $\mathbf{X}'_0$  korrigiert und als Vektor zusammengefasst, dann liefert die (Matrix-) Multiplikation mit der Streulichtkorrekturmatrix  $\mathbf{C}$  das Messsignal  $\mathbf{Y}$ , welches bezüglich Dunkelwert und Streulicht korrigiert ist.

Gleichung 4-1

$$\mathbf{Y} = \mathbf{C} \cdot (\mathbf{X}' - \mathbf{X}'_0)$$

Die vorstehende Korrektur muss auf **jeden** Vektor von Messsignalen des Array-Spektralradiometers angewandt werden, also sowohl bei der Kalibrierung als auch bei jeder Messung. Abbildung 4-5 zeigt die Wirkung der Streulichtkorrektur am Beispiel der Messergebnisse für eine blaue LED, wobei die Empfindlichkeit des Spektralradiometers mit einer Halogenlampe als Transfernormal korrigiert wurde.

**Abbildung 4-5:** Messwerte der Strahlungsfunktion einer blauen LED gemessen mit einem Spektralradiometer vor und nach der Streulichtkorrektur



## 4.5 Literatur

- [4-1] CIE TC 2-51: Calibration, Characterisation and Use of Array Spectroradiometers; *Der Technische Bericht ist in Bearbeitung.*
- [4-2] Zong, Y.; Brown, S. W.; Johnson, B. C.; Lykke, K. R.; Ohno, Y.: Simple Spectral Stray Light Correction Method for Array Spectroradiometers, *Appl. Opt.* 45 (2006), S. 1111-1119.
- [4-3] Nevas, S.; Wübbeler, G.; Sperling, A.; Elster, C.; Teuber, A.: Simultaneous Correction of Bandpass and Stray Light Effects in Array Spectroradiometer Data, *Metrologia* 49 (2012), S. S43 – S47.

*Dr. Saulius Nevas, Physikalisch- Technische Bundesanstalt (PTB)*

# 5 Justieren, Kalibrieren, Prüfen und Validieren

Die Begriffe **Justieren**, **Kalibrieren**, **Prüfen** und **Validieren** wurden international klar definiert. Eine entsprechende Auswahl an Literatur ist am Ende des Beitrags gelistet. Folgende Ausführungen dienen zum besseren allgemeinen Verständnis und sollen wichtige Unterschiede herausstellen.

## 5.1 Justieren

Justieren bezeichnet jede Art von Tätigkeit, eine geforderte Eigenschaft durch Einstellungen an einem Messsystem zu erreichen. Dieses Messsystem, beispielsweise ein Photometer, steht hier für ein »Messgerät zur Bestimmung des Wertes einer Messgröße (wie z. B. die Beleuchtungsstärke)«. Justieren kann demzufolge eine manuelle Verschiebung bis zu einer bestimmten Abstandsmarke auf der Photometerbank sein, die elektronische Einstellung des Lampenstroms am Versorgungsgerät oder die Einstellung des Offsets der Anzeigeeinheit eines Photostromverstärkers.

In jedem Fall gibt es beim Justieren eine Vorgabe, die erfüllt werden muss. Die Umsetzung dieser Vorgabe gelingt in der Regel nicht vollständig, sondern nur mit einer Unsicherheit oder – bei Prüfungen – innerhalb eines über die Prüfbedingungen definierten Toleranzintervalls. Dieses Einstellungsunsicherheitsintervall muss in der Regel deutlich kleiner sein als das Toleranzintervall. Die Bestimmung der Messunsicherheit, bzw. der Nachweis zur Einhaltung der Toleranzen, erfordert gesonderte Untersuchungen. Justierungen sind unter Umständen nur in größeren Zeitabständen, z. B. einmal jährlich, auszuführen. Dies gilt u. a. bei der Ausrichtung einer feststehenden Messapparatur oder beim einmaligen Justieren nach Fertigung, bzw. nach Reparatur, eines Messgerätes durch beispielsweise die Einstellung der Anzeige eines Photometers. Das Justierverfahren sorgt u. a. bei Messgeräten dafür, dass die Anzeige nicht nur proportional zur Messgröße ist, sondern auch den Zahlenwert der vorgegebenen Messgröße anzeigt. Dies wird manchmal fälschlich als Kalibrieren bezeichnet. Im Allgemeinen muss beim Justieren die Messgröße aber weder eine metrologisch eindeutige Eigenschaft beschreiben, noch muss der Zahlenwert zu einer rückgeführten Verkörperung der Einheit gehören. So werden beispielsweise Nullinstrumente justiert, aber nicht kalibriert.

## 5.2 Kalibrieren

Der Prozess des Kalibrierens verändert anders als das Justieren nichts am Messsystem oder an dessen Einstellung. Er bestimmt statt dessen über eine Messung ein Messergebnis, d. h. einen oder mehrere Werte mit ihren beigeordneten Messunsicherheiten. Bei Kalibrierobjekten, wie z. B. Lampen, ist es der verkörperte Wert der Messgröße unter den festgelegten Betriebsbedingungen, der beispielsweise über eine Substitutionsmethode mit Hilfe eines Referenznormalis bestimmt wird. Bei Messgeräten ist es der Wert des Kalibrierfaktors für die metrologisch eindeutig

definierte Messgröße. Der Kalibrierfaktor ist hierbei der Quotient aus dem Wert der Messgröße, die z. B. durch ein Normal verkörpert wird, und der Anzeige des Messgerätes.

Beim (klassischen) Kalibrierverfahren werden für alle im Modell der Auswertung angegebenen Einflussgrößen die momentanen Messwerte zusammen mit den beigeordneten Messunsicherheiten und Korrelationen bestimmt. (Kleine) Abweichungen vom Sollwert jeder Einstellgröße, z. B. minimale Abweichungen vom Lampennennstrom zum Zeitpunkt der Messung, können bei Kenntnis der zugehörigen Sensitivitätskoeffizienten korrigiert werden. Die entstandenen Abweichungen werden erfasst, im Modell der Auswertung berücksichtigt und unter Verwendung der separat bestimmten Sensitivitätskoeffizienten für jede Einflussgröße numerisch korrigiert. Die den Werten der Einflussgrößen zugeordneten Messunsicherheiten werden im vollständigen individuellen Messunsicherheitsbudget verwendet.

*Hinweis: Die Internationale Beleuchtungskommission (CIE) hat im Jahr 2011 in dem Dokument CIE 198 (siehe Literaturverweis) detaillierte Erläuterungen und Beschreibungen zur Bestimmung von Messunsicherheiten in der Photometrie herausgegeben. In diesem Dokument werden an Hand konkreter Beispiele Messunsicherheitsberechnungen durchgeführt.*

Der ermittelte Wert der Kalibriergröße gilt streng nur für den Zeitpunkt der Kalibrierung des Objektes und für die im Kalibrierschein angegebenen Betriebsbedingungen. Bei jeder späteren Verwendung des Kalibrierobjektes kann dieser Wert, z. B. durch (geringfügig) modifizierte Betriebsbedingungen oder durch »Alterung« des Objektes, vom angegebenen Wert im Kalibrierschein abweichen.

### 5.3 Prüfen

Prüfen, wie das Kalibrieren, verändert nichts am jeweiligen (Prüf-) Objekt. Die Tätigkeit des Prüfens weist nach, dass – zum Zeitpunkt der Prüfung und der hierbei tolerierten Variationen der Betriebsbedingungen – die geprüften Ergebnisse innerhalb eines durch das Prüfverfahren zugestandenen Toleranzintervalls liegen.

Bei der Durchführung eines Prüfverfahrens muss die Einhaltung der zugelassenen Toleranzen für die Einstellgröße, bzw. die Gültigkeit der Einstellung aller Randbedingungen, nachgewiesen werden (Konformität). Wesentlich sind hier nicht die momentanen Werte der Eingangsgrößen, sondern die im Prüfverfahren zugelassenen Toleranzintervalle – also jeweils der Wert einer Einflussgröße und das umschließende Intervall. Dieser Betrieb innerhalb der Toleranzintervalle umfasst sowohl die Betriebs- und Umgebungsbedingungen des verwendeten Normals, z. B. einer Normallampe, als auch des Prüfobjektes und schließt die Justierung der Anzeige und die Erzeugung der Messgröße mit ein.

Die Angabe der dem Messwert beigeordneten erweiterten Messunsicherheit erfolgt dann aus den zugelassenen (und nachweislich eingehaltenen) Toleranzintervallen und nicht aus den während der Messung vorliegenden Messwerten mit den beigeordneten Messunsicherheiten. Die Toleranzintervalle werden als Rechteckverteilung für eine 95 %-Wahrscheinlichkeit angegeben und in einem vereinfachten generellen Messunsicherheitsbudget zusammengefasst. Daher sind für Prüfverfah-

ren die Messunsicherheiten durch die im Verfahren zugelassenen Toleranzen bedingt.

*Hinweis: »Eichen« ist eine Tätigkeit, die der Prüfung ähnlich ist, jedoch auf der Basis eines gesonderten Eichgesetzes beruht. »Eichen« schließt in der zugesicherten Messfehlergrenze die Messunsicherheit während der Messung und die maximale Änderung während des zugesicherten Eichzeitraums mit ein.*

## 5.4 Validieren

Die Validierung ist mit etwas unterschiedlichen Zielen als zusätzliche Bestätigung gleichermaßen für Kalibrier- und Prüfverfahren erforderlich. Durch Validierung wird der Nachweis erbracht, dass sowohl das Modell der Auswertung für das durchgeführte Kalibrier- bzw. Prüfverfahren vollständig als auch die dem Ergebniswert beigeordnete Messunsicherheit angemessen ist. Grundsätzlich muss dazu der Wert der Messgröße durch ein weiteres unabhängiges Verfahren bestätigt werden – also eine getrennte Rückführung auf (nationale oder internationale) Normale mit einem möglichst unabhängigen Ergebnis.

Eine solche Validierung kann regelmäßig innerhalb des Laboratoriums erfolgen oder extern je nach Maßgabe der Möglichkeiten bzw. der akkreditierenden Organisation. Wird innerhalb eines Laboratoriums beispielsweise zur Rückführung des Kalibrierfaktors eines Beleuchtungsstärkemessgerätes eine Lichtstärke-Normallampe verwendet, so kann die Validierung des Kalibrierverfahrens u. a. durch ein rückgeführtes Photometer im Substitutionsverfahren erfolgen.

Die Ergebnisse von Prüfverfahren könnten wie die Ergebnisse von Kalibrierverfahren erfasst und untereinander verglichen werden. Eine Bewertung der Äquivalenz zwischen Prüf- und Kalibrierergebnis entfällt jedoch, da im Fall der Prüfung keine Messwerte sondern Toleranzintervalle vorliegen. Falls die Prüfverfahren in Normen beschrieben sind, genügt der Nachweis, dass alle normativen Vorgaben des Verfahrens eingehalten werden. Durch die Validierung wird die Gültigkeit der Prüfbedingungen bestätigt, die in ihrer Gesamtheit sicherstellen, dass die Einzeltoleranzen und Einzelmessunsicherheitskomponenten unter Einbeziehung ihrer Sensitivitäten und Korrelationen im Rahmen des vereinfachten generellen Messunsicherheitsbudget liegen und somit auch das Ergebnis der Prüfung rückgeführt ist. Damit ist insbesondere die Validierung des Prüfverfahrens und nicht die der Messergebnisse fundamental. Dies kann bei den komplexen Messgrößen der Photometrie jedoch sehr aufwändig sein.

## 5.5 Literatur

- [5-1] JCGM 200:2012. International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM3).
- [5-2] JCGM 106:2012. Evaluation of Measurement Data – The Role of Measurement Uncertainty in Conformity Assessment.
- [5-3] ISO/IEC 17000:2004. Conformity Assessment – Vocabulary and General Principles.
- [5-4] JCGM 100:2008. Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM).  
Mit folgenden Anhängen:
- JCGM 101:2008. Propagation of Distributions using a Monte Carlo Method.
  - JCGM 102:2008. Extension to any Number of Output Quantities.
- [5-5] CIE 198:2011. Determination of Measurement Uncertainties in Photometry.  
Mit folgenden Anhängen:
- CIE 198-Sp1.1:2011; Modules for the Construction of Measurement Equations.
  - CIE 198-Sp1.2:2011; Examples for Models with Individual Inputs.
- [5-6] CIE 198-Sp1.3:2011; Examples for the Solving of Systems of Equations.
- [5-7] CIE 198-Sp1.4:2011; Examples for Models with Distributions.

*Dipl.-Ing. Detlef Lindner, Dr. Armin Sperling,  
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)*



Die **Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. (LiTG)** mit über 100-jähriger Tradition versteht sich als dynamisches Netzwerk und Wissensplattform für alle Licht-Interessierten. Sie gliedert sich in 16 Bezirksvertretungen mit rund 2300 Mitgliedern. Sie wird geleitet durch einen Vorstand und einen Vorstandsrat. Fachliche Belange behandelt der Technisch-Wissenschaftliche Ausschuss (TWA).

Die **LiTG** verbindet Wissenschaftler aus Forschung und Lehre, Ingenieure und Techniker aus Entwicklung, Fertigung, Projektierung und Vertrieb, Mitarbeiter aus Bundes- und Landesministerien sowie Kommunalverwaltungen, Architekten, Innenarchitekten, Lichtplaner, Elektrofachplaner, Handwerker, Produktdesigner, Mediziner, Künstler und Studierende. Zu ihren korporativen Mitgliedern zählen wissenschaftliche Institutionen, Fachverbände und Organisationen, Unternehmen aus allen Bereichen der Lichtindustrie, Stadtverwaltungen, Energieversorger, Architektur-, Ingenieur- und Lichtplanungsbüros.

Die **LiTG** fördert die Lichttechnik in Theorie und Praxis auf regionaler, nationaler und internationaler Ebene. Sie engagiert sich sowohl in der fachlichen Aus- und Weiterbildung als auch in der Forschung. Sie bietet ein lokal orientiertes, breitgefächertes Programm aus Schulungen, Vorträgen, Diskussionen, Exkursionen und Besichtigungen, das über innovative lichttechnische Anwendungen, Entwicklungen, Produkte,

Dienstleistungen und Forschungsvorhaben informiert und über gültige lichttechnische Vorschriften, Normen und Gesetze aufklärt.

Die **LiTG** beteiligt sich an der Erarbeitung nationaler und internationaler Normen und Vorschriften und kooperiert dazu mit nationalen und internationalen Fachorganisationen (z.B. DIN, CEN, ISO, CIE) sowie den lichttechnischen Gesellschaften aus aller Welt. Sie veranstaltet wissenschaftliche Fachtagungen zu aktuellen Themen auf nationaler und internationaler Ebene.

Die **LiTG** erstellt und verbreitet Arbeits- und Forschungsergebnisse mit neuesten lichttechnischen Erkenntnissen in Form allgemein verständlicher technisch-wissenschaftlicher Publikationen zu folgenden Schwerpunkten:

- **Außenbeleuchtung**
- **Melanopische Lichtwirkungen**
- **Betriebsgeräte und Steuerungen**
- **Fahrzeugbeleuchtung**
- **Farbe**
- **Innenbeleuchtung**
- **Lichtarchitektur**
- **Lichtquellen und Leuchten**
- **Messen und Bewerten**
- **Physiologie und Wahrnehmung**
- **Tageslicht**

LiTG-Publikationen sind frei von kommerziellen Zielen.



## Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V.

Burggrafenstraße 6  
10787 Berlin  
Telefon +49 30 / 26 36 95 24  
Telefax +49 30 / 26 55 78 73  
E-Mail [info@litg.de](mailto:info@litg.de)

[www.litg.de](http://www.litg.de)