

BAND 18 | SPEKTRUM DER LICHTTECHNIK

INCA LEOPOLDO SAYANCA

SENSORFUSION ZUR KOMPENSATION VON MESSFEHLERN  
BEI KAMERABASIERTER FARBVERTEILUNGSMESSUNG





Inca Leopoldo Sayanca

**Sensorfusion zur Kompensation von Messfehlern  
bei kamerabasierter Farbverteilungsmessung**

Lichttechnisches Institut  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

# **Sensorfusion zur Kompensation von Messfehlern bei kamerabasierter Farbverteilungsmessung**

von  
Inca Leopoldo Sayanca

Karlsruher Institut für Technologie  
Lichttechnisches Institut

Sensorfusion zur Kompensation von Messfehlern  
bei kamerabasierter Farbverteilungsmessung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs  
von der KIT-Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik des  
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) genehmigte Dissertation

von M.Sc. Inca Leopoldo Sayanca geb. in Mendoza, Argentinien

Tag der mündlichen Prüfung: 10. Juli 2018  
Hauptreferent: Prof. Dr. Cornelius Neumann  
Korreferent: Prof. Dr. Wilhelm Stork

#### Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
KIT Scientific Publishing  
Straße am Forum 2  
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark  
of Karlsruhe Institute of Technology.  
Reprint using the book cover is not allowed.

[www.ksp.kit.edu](http://www.ksp.kit.edu)



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed  
under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License  
(CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons  
Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2018 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 2195-1152  
ISBN 978-3-7315-0830-4  
DOI 10.5445/KSP/1000085279

*Für meine Tochter  
Ida Pauline*



# KURZFASSUNG

Moderne LED-Lichtquellen und -Leuchten können starke spektrale Variationen im Winkelraum aufweisen, die den gestiegenen ästhetischen Ansprüchen an LED nicht entsprechen. Zur Überprüfung der definierten, meist homogenen Farbanforderung sind Messtechniken erforderlich, die sowohl eine ausreichende kleine Unsicherheit als auch eine hohe Winkelauflösung bei annehmbarer Messdauer aufweisen.

Diese Arbeit stellt eine Messmethodik zur farbmesstechnischen Charakterisierung komplexer LED-Lichtverteilungen anhand Kamerafiltermessungen vor, die als „*Spectral Camera Measurement*“ bezeichnet wird. Hierbei wird ein Goniometer mit der Kameraaufnahme eines diffus reflektierenden Schirms als Empfänger kombiniert. So wird ein größerer Winkelbereich sehr hoch aufgelöst gemessen und der gesamte Raum in mehreren kombinierten Aufnahmen erfasst. Nachteile von kamerabasierten Messtechniken sind die systematischen Fehler der spektralen Anpassung sowie des Streulichtes.

Die fehlerhaft erfassten Kamerawerte werden mit dem „*spectral mismatch correction factor*“ korrigiert. Da diese Korrektur winkelaufgelöste spektrale Informationen benötigt, werden diese Spektren mit dem Konzept der physikalisch motivierten Basisspektren und Sensorfusionstechniken numerisch bestimmt. Die resultierenden Spektren können sowohl für die Korrektur der Kamera-Pixelwerte eingesetzt als auch für die Durchführung optischer Simulationen verwendet werden.



# ABSTRACT

Modern LED sources and luminaires can exhibit strong angular dependent spectral variations that do not meet increased aesthetic requirements. To test defined mostly homogeneous colour requirements, measurement methods are required which are capable of measuring colour distributions with high angular resolutions within an acceptable measurement time.

In this work, we propose a method called *Spectral Camera Measurement* to determine the complete colour information of LED systems combining filter camera measurements with spectral information. We employ a goniometer, a white screen and a luminance camera to measure complex distributions with high angular resolutions. By taking several camera images of the reflexion of the light source on the screen from different viewing angles and merging the set of images using the geometrical information of the system, it is possible to get the complete distribution. Disadvantages of camera-based techniques are the systematic errors of spectral matching and stray light.

The defective measured camera values are corrected using the *spectral mismatch correction factor*. Since this correction requires angular-resolved spectral information, these spectra are determined numerically using the concept of physically motivated basis spectra and sensor fusion techniques. The resulting spectra can be used to correct the measured camera values or to perform optical simulations.



# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Motivation .....	1
1.2	Ziele der Arbeit.....	5
1.3	Gliederung der Arbeit.....	7
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b> .....	<b>9</b>
2.1	Radiometrie, Photometrie und Colorimetrie .....	9
2.1.1	Relative Spektrale Anpassung .....	12
2.1.2	Spectral Mismatch Correction Factor.....	14
2.2	Farbmetrische Grundlagen.....	16
2.3	Licht- und Farbverteilung .....	19
2.4	Lichtemittierende Dioden.....	21
<b>3</b>	<b>Stand der Technik</b> .....	<b>23</b>
3.1	Licht- und Farbmessung: Arten von Empfängern .....	23
3.1.1	Spektrometer .....	24
3.1.2	Photometer und Colorimeter .....	27
3.1.3	Leuchtdichtekamera.....	29
3.2	Winkelaufgelöste Messungen .....	30
3.3	Kalibrierung .....	33
<b>4</b>	<b>Messunsicherheitsanalyse</b> .....	<b>37</b>
4.1	Messunsicherheit .....	37
4.2	GUM.....	39
4.3	GUM Supplement 1: Monte-Carlo-Methode .....	43

4.4	Spektrale Messunsicherheit .....	47
4.4.1	Spectral Mismatch Correction Factor .....	58
4.4.2	Messunsicherheit Farbkoordinaten .....	61
<b>5</b>	<b>Kamerabasierte orts aufgelöste Farbmessung.....</b>	<b>65</b>
5.1	Messsystem .....	65
5.1.1	Kameramodell: Optische Parameter.....	73
5.1.2	Geometrie .....	81
5.1.3	Image-Merging .....	84
5.2	Korrekturen.....	89
5.2.1	Absolute Messwerte.....	90
5.2.2	Streulicht.....	91
5.2.3	Homogenität Schirm.....	96
5.3	Messobjekt.....	97
<b>6</b>	<b>Sensorfusionsansatz.....</b>	<b>107</b>
6.1	Messkonzept .....	107
6.2	PMBS.....	112
6.3	Spectral Camera Measurement (SCM) .....	117
6.3.1	Gleichungssystem .....	123
6.3.2	Charakterisierung optischer Filter .....	130
6.4	SMCF.....	134
6.5	Zusammenfassung .....	139
<b>7</b>	<b>Validierung.....</b>	<b>141</b>
7.1	Validierungsmessungen.....	141
7.1.1	Image-Merging .....	145

7.1.2	Spektrale Modellierung .....	155
7.1.3	Farbwerte .....	169
7.2	LED-Automobilscheinwerfer .....	174
7.3	Auswertung der Messergebnisse .....	179
7.4	Diskussion .....	189
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>193</b>
8.1	Zusammenfassung .....	193
8.2	Ausblick .....	198
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>201</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>213</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>225</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>227</b>
	<b>Formelzeichen .....</b>	<b>229</b>
	<b>Veröffentlichungen .....</b>	<b>233</b>
	<b>Betreute Arbeiten .....</b>	<b>235</b>
	<b>Danksagung .....</b>	<b>237</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>239</b>
	Anhang A: Messunsicherheit .....	241
	Anhang B: SMCF .....	243
	Anhang C: SCM-Methodik .....	247



# Kapitel 1

## EINLEITUNG

*“[...] when you can measure what you are speaking about, and express it in numbers, you know something about it [...]”*

*William Thomson, Lord Kelvin*

### 1.1 MOTIVATION

„Die Photonik zählt zu den wichtigsten Wachstums- und Zukunftsbranchen der deutschen Wirtschaft. [...] Die Branche hat erfolgreich den Paradigmenwechsel zu Festkörperlichtquellen und optischen Halbleiter-Bauelementen gestaltet. Jetzt richten sich die Aktivitäten auf noch umfassendere integrierte photonische Systeme [...]“ [1, pp. 7-8]. Es gibt zahlreiche Anwendungsbeispiele, bei denen die Photonik-Branche eine wichtige Rolle spielt [1]:

- Intelligente Beleuchtungslösungen (smart home und city)
- Flexible und vernetzte Produktion für Industrie 4.0
- Photonische Gesundheitstechnologien
- Licht und Mobilität u.a.

Auf die Bedeutung dieser Themen für die deutsche und internationale Photonik-Industrie macht die **Agenda Photonik 2020** des

Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) aufmerksam [1]. Hier wird das öffentliche Interesse formuliert, in die Forschung dieser Themen weiter und intensiver zu investieren.

Laut des Bundesverbandes der Deutschen Industrie steht der Begriff **Industrie 4.0** für die vierte industrielle Revolution nach der Mechanisierung, der Massenproduktion und der Automatisierung und ist mit dem „Internet of Things“ eng verbunden. Die rapide Entwicklung von Steuergeräten in den letzten Jahren, und dementsprechend leistungsstärkere Mikroprozessoren mit schnellerer Elektronik und Software, macht eine Echtzeit-Kommunikation in der Fabrik zwischen den Werkzeugmaschinen und den zu fertigenden Produkten möglich. Diese Echtzeit-Kommunikation bietet eine Echtzeit-Qualitätskontrolle der Produkte, hauptsächlich durch die Anwendung und Kombination von mehreren Sensoren durch **optische Messtechniken**, um Qualitätsabweichungen in Echtzeit zu entdecken und zu beheben [2, p. 1 vgl.].

Die Tendenz liegt also in einer starken Digitalisierung in der Metrologie, die eine vollständige Erfassung und entsprechende Verarbeitung großer Mengen von Daten erlaubt, ohne Messwerte schätzen oder interpolieren zu müssen. Moderne **optische Sensorik** und **Kameras** spielen eine wichtige Rolle im Bereich der Datenerfassung, da sie hohe Messauflösungen ermöglichen. Um eine bestimmte optische Messaufgabe korrekt durchzuführen, werden heute in der Regel teure und komplexe Hardwareelemente eingesetzt. Ungenauere Messsignale von kostengünstigen Messgeräten können aber durch Algorithmen kompensiert werden. Dies stellt Anforderungen an die Software, die weniger kostspielig ist. Effizientere Algorithmen, höhere Rechenleistung und die Vernetzung der Datenerfassung ermöglichen die Kompensation dieser Messungenauigkeiten [1]. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es mit der Benutzung von sogenannten

Sensorfusionstechniken möglich ist, mittelmäßige Messgeräte durch die Kombination der Informationen anderer Messsysteme und durch Datenverarbeitung zu verbessern und zu korrigieren. Dies spielt eine besondere Rolle bei der Entwicklung neuer Messtechniken im speziellen Bereich der Photometrie und Colorimetrie.



**Abbildung 1.1:** Hell-Dunkel-Grenze eines LED Automobilscheinwerfers

Moderne LED-Beleuchtungssysteme sowie Multi-Beam- bzw. Matrix-Beam-LED-Automobilscheinwerfer sind imstande, eine große Vielfalt möglicher Kombinationen von definierten Farbverteilungen mit sehr großen Auflösungen im Megapixelbereich, wie z. B. adaptives blendfreies Fernlicht oder OP-Beleuchtungen, zu erzeugen. Diese optischen Systeme müssen den gesetzlichen Rahmen und die internationalen Standards bezüglich Lichtstärkeverteilungen, maximalen Werten und Farbeigenschaften einhalten, bevor sie vermarktet werden. Um sicherzustellen, dass die fixierten Grenzen eingehalten werden, sind **zuverlässige Messtechniken** erforderlich. Die Konformität mit den internationalen Standards wird in der Regel mit Hilfe von scannenden Messsystemen wie Gonio-Photometer oder Gonio-Colorimeter überprüft. Diese Systeme liefern sehr präzise absolute Messwerte und sind imstande, große Dynamikbereiche zu messen. Bei scannenden Systemen müssen, wie der Name impliziert,

alle Punkte der Lichtverteilung einzeln mit Hilfe eines Goniometers gemessen werden [3]. Im Fall von unregelmäßigen Lichtverteilungen, wie bei den genannten Matrix-Beam-Systemen, Lichtverteilungen mit starken Gradienten, wie die Hell-Dunkel-Grenze bei Automobilscheinwerfern (s. Abbildung 1.1) oder Beleuchtungssystemen mit stark variierender spektraler Information (s. Abbildung 1.2) sind große Messauflösungen notwendig. Diese verursachen bei diesem Typ von Systemen aber eine sehr lange Messdauer, die nicht nur zu hohen Kosten führt, sondern auch Probleme bezüglich der Stabilität des zu messenden Testobjektes während der Messung auslösen kann.

Eine zeitsparende Alternative, um Lichtverteilungen hochaufgelöst zu messen, sind kamerabasierte Messtechniken. Mit Hilfe einer Farb- und Leuchtdichtemesskamera werden gleichzeitig mehrere Punkte der Lichtverteilung erfasst. Hierbei ist allerdings ein transparenter oder reflektierender Schirm nötig, um die Verteilung messen zu können.



**Abbildung 1.2:** Beispiel LED-Leuchte mit stark richtungsabhängiger spektraler Information

Im Gegensatz zu den goniophotometrischen Messungen wird die Messdauer mit kamerabasierten Messsystemen deutlich verringert. Diese Systeme erfassen aber normalerweise ungenauere Messwerte als

scannende Systeme mit Photometer, da für Kameras das Streulicht sowohl im Messraum als auch innerhalb der Optik und die Reflexions- bzw. Transmissionseigenschaften des verwendeten Schirmes einen wichtigen Einfluss haben. Die optische Filterung der photosensitiven Elemente der Kamera kann in der Regel nicht so genau wie bei Photometern erreicht werden. Diese und andere Effekte verursachen Messabweichungen bei der erfassten Lichtverteilung.

Dieselben Prinzipien gelten auch für winkelaufgelöste Farbmessungen. In diesem Fall muss bei scannenden Systemen statt eines Photometers ein sogenannter Colorimeter verwendet werden, der optisch filtrierte Silizium-Photoelemente enthält, um die drei Farbkanäle zu erfassen. Bei Kamerasystemen werden über den Einsatz eines Filterrades die entsprechenden Farbwerte-Bilder hochaufgelöst gemessen [3].

## **1.2 ZIELE DER ARBEIT**

Das Ziel dieser Dissertation liegt in der vollständigen und möglichst präzisen licht- und farbmestechnischen Charakterisierung von LED-Beleuchtungssystemen, die im Idealfall mit minimalem Zeit- und Messaufwand durchgeführt werden soll. Eine komplette Charakterisierung gelingt, wenn die verwendete Messtechnik sowohl winkelaufgelöste Farbwerte als auch eine winkelaufgelöste spektrale Deskription der untersuchten Beleuchtungssysteme liefern kann. Um dieses Ziel zu erreichen, muss eine neue Messmethodik entwickelt werden, die die Vorteile beider vorgestellten Messsysteme kombiniert und auf dem Sensorfusionsansatz basiert. Zur Darstellung der Bedeutung von Sensorfusionstechniken wird eine Messmethodik vorgestellt, die Filterkammermessungen mit einer spektralen Messung und einer

photometrischen Punktmessung fusioniert, um beispielhaft den systematischen Fehler der relativen spektralen Anpassung von kamerabasierten Licht- und Farbmessungen zu beheben. Der Schwerpunkt liegt hier in der Entwicklung von Algorithmen zur Minimierung der Messabweichungen anhand von Korrekturfaktoren. Anhand der Monte-Carlo-Methode wird eine Messunsicherheitsanalyse der zu erfassenden Größen und der entsprechenden Korrekturfaktoren durchgeführt. Hier richtet sich die Aufmerksamkeit speziell auf die Messunsicherheit von spektralen Größen.

Wenn Kameramethoden mit einem Goniometer kombiniert werden, um den gesamten Winkelraum zu erfassen, resultieren daraus mehrere Aufnahmen, welche mit einander kombiniert werden müssen. Wie diese Kombination korrekterweise vorgenommen werden kann, wird ebenfalls methodisch vorgestellt. Mit dem Ziel, die gesamte Messmethodik darzustellen und zu validieren, wird ein spezielles Test-Objekt entwickelt, das kontrollierbare lichttechnische Parameter besitzt, wie eine bekannte und mathematisch modellierbare Lichtstärkeverteilungskurve und eine definierte spektrale Information.

Die mit dieser Methodik gemessenen Licht- und Farbverteilungen ermöglichen die Überprüfung gesetzlicher Anforderungen und werden in der Regel auch verwendet, um optische Simulationen mit hohen Auflösungen durchzuführen (Digital Lighting Systems) oder um Nachtfahrtsimulatoren mit echten Messdaten zu programmieren. Weitere wichtige Anwendungsfelder sind Farbhomogenitätsanalysen z. B. von LED-Automobilscheinwerfern (s. Abbildung 1.1).

## 1.3 GLIEDERUNG DER ARBEIT

Diese Arbeit gliedert sich in acht Kapitel. Nach diesem ersten einleitenden Kapitel folgen zwei Kapitel, die sich mit den theoretischen Grundlagen und dem Stand der Technik für photometrische und farbmessungsmessungen beschäftigen. Der Fokus liegt dabei auf den Licht emittierenden Dioden und auf den messtechnischen Möglichkeiten, deren photometrische Eigenschaften zu bestimmen. Am Rande wird auf die Kalibrierung der Messgeräte und auf die zu diesem Zweck verwendeten Normallampen eingegangen.

Im vierten Kapitel werden wichtige theoretische und praktische Konzepte der GUM-Methodik und ihre Erweiterungsmöglichkeiten erklärt, die für die systematische Bestimmung der Messunsicherheit von spektralen Größen essentiell sind. Dafür werden spektrale Messungen und typische Messfehlerquellen ausführlich modelliert.

Das fünfte Kapitel führt in die entwickelte Methodik der kamerabasierten Licht- und Farbverteilungsmessung ein. Es wird sowohl das verwendete Messsystem als auch das für Validierungszwecke entwickelte Testobjekt in allen Einzelheiten beschrieben. Hier werden ein mathematisches Kameramodell und die komplette Geometrie des Messsystems definiert, welche für das sogenannte Image-Merging Verfahren zur Kombination von Kameraaufnahmen essentiell sind.

Das sechste Kapitel beschreibt mathematisch die Grundidee des Sensorfusionsansatzes und erläutert, wie die SMCF-Korrektur berechnet und angewendet wird. Kapitel sieben bietet eine Validierung der kompletten Messmethodik anhand des Testobjekts und eines Vergleiches mit Messgeräten, die dem Stand der Technik entsprechen.

Die generierte Farbinformation wird in Bezug auf Messgenauigkeit, Messauflösung und Messdauer ebenfalls ausgewertet.

Im letzten Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst, offene Fragen und Probleme diskutiert und mögliche Lösungen vorgestellt.

## Kapitel 2

# THEORETISCHE GRUNDLAGEN

*Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den theoretischen Grundlagen, die zu einem besseren Verständnis der vorliegenden Arbeit beitragen. Zunächst wird auf den Unterschied zwischen Radiometrie und Photometrie und auf die bedeutende Rolle der spektralen Anpassung des menschlichen Auges eingegangen. Im Anschluss daran werden klassische Darstellungen der Messdaten in einer Lichtverteilungskurve oder in einem Lichtverteilungskörper eingeführt und bedeutende farbmimetrische Grundlagen sowie verwendete Farbsysteme zusammengefasst. Abschließend werden grundlegende Konzepte lichtemittierender Dioden und deren wichtigsten Eigenschaften, vor allem ihre charakteristische spektrale Verteilung, vorgestellt.*

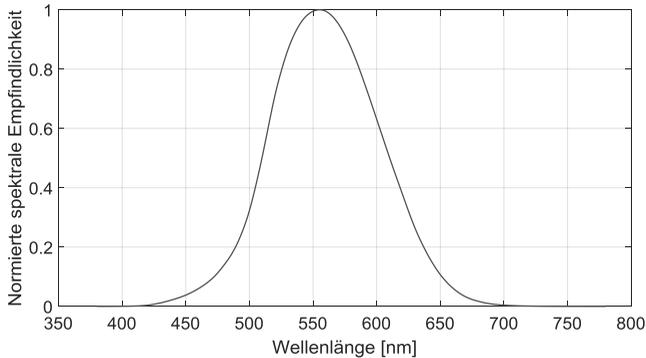
### 2.1 RADIOMETRIE, PHOTOMETRIE UND COLORIMETRIE

Elektromagnetische Größen gehen von hochenergetischer Gamma- und Röntgenstrahlung über sichtbare Strahlung bis hin zu Mikro-, Radio- und TV-Wellen. **Radiometrie** ist die allgemeine physikalische Messung aller Arten von elektromagnetischer Strahlung. Hier wird die Ausbreitung der Strahlung einer Quelle in Bezug auf Leistung in Watt und Geometrie beschrieben. Im Gegensatz dazu besteht die Aufgabe der **Photometrie** in der quantitativen Charakterisierung der **elektromagnetischen Strahlung** einer Quelle in einem definierten

Frequenz- bzw. Wellenlängenbereich, in dem das **menschliche Auge** empfindlich ist. Hier müssen sowohl spektrale als auch geometrische Randbedingungen eines sogenannten **Normalbeobachters** betrachtet werden. Der für Menschen sichtbare Wellenlängenbereich zwischen  $360\text{ nm}$  bis  $830\text{ nm}$  wird als **Licht** definiert. Die **subjektive** Photometrie beschreibt **qualitativ** die Effekte elektromagnetischer Strahlung auf das menschliche Auge. Der Empfänger bzw. das Messinstrument ist hier das Auge, welches aufgrund seiner hohen Empfindlichkeit verschiedene Effekte sehr präzise wahrnehmen kann. Mit der Entwicklung und Anwendung von spektral gewichteten und empfindlichen Photozellen und Halbleiterempfängern wurde es möglich, Licht **quantitativ** und **objektiv** zu messen. Hier spielt die spektrale Gewichtung der photosensitiven Empfänger eine bedeutende Rolle [4] [5] [6].

Die von der *Commission Internationale de l'Eclairage* (CIE) definierte **Hellempfindlichkeitsfunktion**  $V(\lambda)$  ist eine durch Probandenstudien bestimmte Gewichtungsfunktion, die die spektrale Empfindlichkeit eines Normalbeobachters bei Tageslicht beschreibt. Diese Gewichtungsfunktion beschreibt die unterschiedliche Hellwahrnehmung von gleich großen Strahlungsmengen. Sie besitzt ihre maximale Empfindlichkeit bei  $\lambda_m = 555\text{ nm}$ . Dort wird das maximale photopische Strahlungsäquivalent  $K_m = 683\text{ lm/W}$  definiert. Die  $V(\lambda)$  Kurve (s. Abbildung 2.1) verbindet die Radiometrie mit der Photometrie [4] [5] [6]. Die photometrische SI-Basiseinheit **Candela** ist das Maß für **Lichtstärke**  $I$ , welche eine von vier photometrischen Größen ist und beschreibt, wieviel Licht von einer Lichtquelle in eine definierte Richtung emittiert wird. Aus diesem Grund spielt die korrekte Bestimmung der **geometrischen Messbedingungen** eine wichtige Rolle in der Photometrie. Die restlichen photometrischen Größen sind

**Lichtstrom  $\Phi$**  (gesamtes emittiertes Licht), **Beleuchtungsstärke  $E$**  (Lichtmenge, die auf eine definierte Oberfläche fällt) und **Leuchtdichte  $L$**  (Lichtmenge, die von einem Oberflächenelement in eine bestimmte Richtung abgegeben wird). Zusätzliche Informationen diesbezüglich können der Literatur entnommen werden [5] [3] [7].



**Abbildung 2.1:** Hellempfindlichkeitsfunktion  $V(\lambda)$

Die  $V(\lambda)$ -Funktion liefert jedoch keine Informationen in Bezug auf Farbsehen. Hierfür sind zusätzliche spektrale Gewichtungsfunktionen nötig, die die subjektive Farbempfindlichkeit des Auges betrachten. Die CIE definiert diesbezüglich die sogenannten Spektralwertfunktionen des farbmetrischen Normalbeobachters  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  und  $\bar{z}(\lambda)$ , welche die spektrale Empfindlichkeit der Farbrezeptoren im Auge modellieren. Diese Funktionen stellen die Grundlage des CIE-Farbvalenzsystem (s. 2.2) dar. Wie können jedoch die genannten spektralen Gewichtungsfunktionen messtechnisch in der Praxis realisiert werden?

### 2.1.1 RELATIVE SPEKTRALE ANPASSUNG

Für die elektronische Messwerterfassung von photometrischen Größen können Halbleiter-Empfänger eingesetzt werden. Hierfür wird normalerweise Silizium oder Germanium für die photosensitive Sensorik verwendet, da diese Elemente eine gute spektrale Empfindlichkeit im sichtbaren Wellenlängenbereich aufweisen. Diese spektrale Empfindlichkeit entspricht jedoch nicht der von der CIE definierten Hell- oder Farbempfindlichkeit des menschlichen Auges. Folglich wird eine spektrale Anpassung des Empfängers mittels optischer Filterung benötigt, welche entweder durch Voll- oder durch Partialfilterung erreicht wird. Dazu kommen eventuell Diffusoren für eine Homogenisierung des einfallenden Lichtes auf die Sensoroberfläche zum Einsatz. Eine gute spektrale Anpassung wird erreicht, wenn die gesamte spektrale Empfindlichkeit des Empfängers (Diffusor, optische Filter und Halbleiter), auch Systemfunktion genannt, der spektralen Empfindlichkeit einer Gewichtungsfunktion entspricht [8]. Eine Partialfilterung ermöglicht eine **sehr feine** Anpassung an eine entsprechende Gewichtungsfunktion. Mit dieser Technik werden verschiedene Filterkomponenten nebeneinander angeordnet, sodass nur ein Teil des Lichts durch jeden Filter transmittiert wird. Der Transmissionsgrad durch den Filter ist additiv und abhängig sowohl von der Größe der Filterfläche als auch vom Transmissionsgrad der einzelnen Filterelemente. Dies ermöglicht eine einfachere Manipulation der spektralen Eigenschaften und damit eine sehr genaue spektrale Anpassung. Der Transmissionsgrad ist jedoch in diesem Fall stark vom Einfallswinkel des Lichtes auf die Filteroberfläche abhängig. Aus diesem Grund wird diese Art von spektraler Anpassung mit einem Diffusor kombiniert, welcher das Licht auf die gesamte Filteroberfläche homogenisiert, aber mit dem

entsprechenden Verlust von Messsignalstärke am Diffusor einhergeht [3, pp. 44, 45 vgl.]. Beispiele von spektraler Anpassung durch Partialfilterung werden in Abbildung 2.2 für verschiedene Gewichtungsfunktionen gezeigt.



**Abbildung 2.2:** Partielle Filterung für: a)  $V(\lambda)$  Funktion und b) Normalspektralwertfunktionen  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  und  $\bar{z}(\lambda)$

Bei der Vollfilterungsanpassung werden verschiedene Schichten von optischen Filtern kombiniert, sodass das einfallende Licht immer durch alle Filter transmittiert wird. Hierfür werden fünf oder mehr Schichten aufeinander platziert. Der Transmissionsgrad ist mit dieser Technik multiplikativ. Dies bedeutet, dass der gesamte Transmissionsgrad von kleinen Differenzen des Transmissionsgrads der einzelnen Filter stark beeinflusst wird. Eine korrekte spektrale Anpassung ist somit schwieriger zu erreichen. Im Gegensatz zur Partialfilterung ist in diesem Fall kein Diffusor nötig, da das Licht immer über alle Filter transmittiert wird [3].

Die hohe spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges erfordert je nach Anwendung des Beleuchtungssystems eine mehr oder weniger genaue spektrale Anpassung. Allerdings ist die Realisierung der spektralen Anpassung an eine Gewichtungsfunktion in der Praxis

normalerweise mit einer spektralen Fehlanpassung behaftet. Die Fehlanpassung verursacht einen wellenlängenabhängigen systematischen Fehler, der korrigiert werden muss [9]. Eine Quantifizierung der Fehlanpassung und die nachfolgende Korrektur wird mit Hilfe des sogenannten „spectral mismatch correction factor“ durchgeführt [10]. Für Lichtquellen mit Spektren ähnlich der zur Kalibrierung des Empfängers verwendeten Normlichtart A ist diese Korrektur vernachlässigbar [11]. Für LED-Lichtquellen ist dies aber nicht der Fall, da es sich hier um schmalbandige Spektren handelt, welche zudem noch hohe Anteile in Spektralbereichen aufweisen, bei denen die spektrale Fehlanpassung kritisch sein kann [12].

### 2.1.2 SPECTRAL MISMATCH CORRECTION FACTOR

Photometrische und colorimetrische Empfänger werden standardmäßig mit Normlichtart A kalibriert, d.h. für das breitbandige Spektrum eines thermischen Strahlers mit  $T = 2685\text{ K}$ . Die relative spektrale Verteilung von LED-Quellen unterscheidet sich signifikant von der Normlichtart A und verursacht dementsprechend einen systematischen Anpassungsfehler. Dieser wird mit dem Mismatch-Index  $f'_1$  quantifiziert und mit dem „spectral mismatch correction factor“, kurz SMCF, korrigiert [9] [10] [13] [14]. Der Korrekturfaktor ist in der Literatur nur für die  $V(\lambda)$ -Funktion gegeben, das Prinzip ist aber auch für die Normspektralwertfunktionen  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  und  $\bar{z}(\lambda)$  anwendbar. Folgende Faktoren  $a^*$  beschreiben das Verhältnis der Bestrahlung des Empfängers mit Normlichtart A zur Bestrahlung mit einer anderen Art von Lichtquelle [10]:

$$\begin{aligned}
 a^*_X &= \frac{S_Z}{S_A} = \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S_Z(\lambda) \cdot x_{rel}(\lambda) \cdot d\lambda / \int_{360}^{830} S_Z(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S_A(\lambda) \cdot x_{rel}(\lambda) \cdot d\lambda / \int_{360}^{830} S_A(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot d\lambda} \\
 a^*_Y &= \frac{S_Z}{S_A} = \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S_Z(\lambda) \cdot y_{rel}(\lambda) \cdot d\lambda / \int_{360}^{830} S_Z(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S_A(\lambda) \cdot y_{rel}(\lambda) \cdot d\lambda / \int_{360}^{830} S_A(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda} \\
 a^*_Z &= \frac{S_Z}{S_A} = \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S_Z(\lambda) \cdot z_{rel}(\lambda) \cdot d\lambda / \int_{360}^{830} S_Z(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S_A(\lambda) \cdot z_{rel}(\lambda) \cdot d\lambda / \int_{360}^{830} S_A(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot d\lambda}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

wobei  $S_A(\lambda)$  der Strahlungsfunktion von Normlichtart A entspricht. Hier sollte erwähnt werden, dass die spektrale Empfindlichkeit der  $V(\lambda)$ -Funktion der Funktion  $\bar{y}(\lambda)$  entspricht. Das SMCF wird in [9] [10] als der reziproke Wert dieser Faktoren definiert:

$$SMCF = 1/a^* = S_A/S_Z \tag{2.2}$$

Durch die Normierung innerhalb des SMCF sind nur die relative Strahlungsfunktion  $S_Z(\lambda)$  der zu messenden Lichtquellen und die relative spektrale Empfindlichkeit der Farbkanäle  $x_{rel}(\lambda)$ ,  $y_{rel}(\lambda)$  und  $z_{rel}(\lambda)$  notwendig. Die relative Strahlungsfunktion  $S_Z(\lambda)$  wird anhand einer spektral auflösenden Messung bestimmt. Die mit dem spektral integrierenden Empfänger gemessenen Farbwerte werden mit den so berechneten Faktoren korrigiert, indem die einzelnen Werte mit den SMCF multipliziert werden [10].

## 2.2 FARBMETRISCHE GRUNDLAGEN

Für die Messung farbmetrischer Größen können verschiedene Messverfahren eingesetzt werden. Der Standard für LED-Messungen CIE S025 [9] nennt die folgenden typischen Messmethoden:

- Ulbrich-Kugel mit einem Spektrometer für integrale Messungen, d.h. ohne winkel-aufgelöste Information, oder
- Goniometer in Kombination mit einem Spektrometer oder einem Farbmesskopf (Colorimeter) als Detektor, um eine räumliche Farbverteilungskurve zu erfassen.

Für absolute Farbmessungen empfiehlt der Standard [9] die Benutzung eines Spektrometers. Colorimeter sollten nur für relative Farbmessungen bzw. für winkelabhängige Farbhomogenitätsanalysen eingesetzt werden. Ein Colorimeter verwendet in der Regel drei oder vier optisch filtrierte Si-Photoelemente. Somit ist jeder Kanal ein Filter-Radiometer mit der entsprechend spezifischen aktinischen Bewertungsfunktion  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  und  $\bar{z}(\lambda)$  (s. Abbildung 2.3 oben). Die Filter-Radiometer führen die bei Spektrometern durchgeführte numerische Integration über einen spezifischen Spektralbereich physikalisch durch und liefern so direkt die sogenannten **Farbwerte** X, Y und Z beim **CIE-Normvalenzsystem** gemäß [9] [15] [3] [16]:

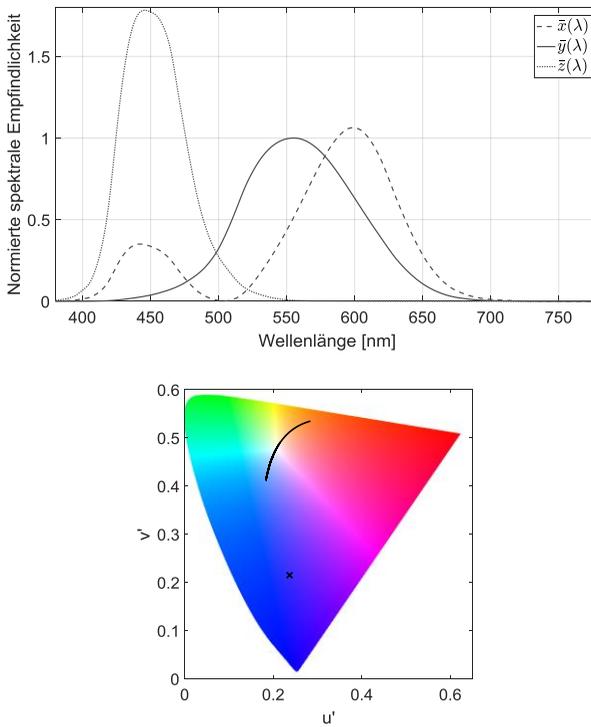
$$\begin{aligned} X &= k \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S_Z(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot d\lambda \\ Y &= k \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S_Z(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda \\ Z &= k \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S_Z(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot d\lambda \end{aligned} \quad (2.3)$$

Hierbei ist  $S_Z(\lambda)$  die spektrale Verteilung der selbstleuchtenden Lichtquelle und  $k$  ein Normierungsfaktor. Sinnvollerweise setzt man  $k$  im CIE-1931-Farbraum gleich dem photopischen spektralen Äquivalent  $K_m$  zu  $683 \text{ lm/W}$ , um auf diese Weise die Antwort des Y-Farbkanals gleich zu der photopischen spektralen Antwort  $V(\lambda)$  zu erhalten. Der zu betrachtende Spektralbereich für die numerische Integration liegt nach [15] zwischen  $\lambda_{min} = 360 \text{ nm}$  und  $\lambda_{max} = 830 \text{ nm}$ .

Nach dem Erfassen der integralen Farbwerte werden die Farbwertanteile bzw. Farbkoordinaten  **$u'v'$ -Farbraum** durch Normierung unter Verlust der Helligkeitsinformationen wie folgt berechnet [17] [18]:

$$\begin{aligned} u' &= \frac{4 X}{X + 15 Y + 3 Z} \\ v' &= \frac{9 Y}{X + 15 Y + 3 Z} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Beide Farbkoordinaten beschreiben einen **Farbort** in der  **$u'v'$ -Farbtafel** (s. Abbildung 2.3 unten).



**Abbildung 2.3:** Spektralwertfunktionen des farbmtrischen Normalbeobachters  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  und  $\bar{z}(\lambda)$  (oben) und Darstellung der Farbkoordinaten bei der  $u'v'$ -Farbtafel (unten)

In dieser Arbeit wird der  **$u'v'$ -Farbraum** verwendet, da bei diesem Farbsystem euklidisch gleiche Farbabstände zwei erfassten Farbkoordinaten annähernd gleichen Wahrnehmungsunterschieden entsprechen. Die Farbabstände bzw. Farbunterschiede werden wie folgt berechnet [18]:

$$\Delta u'v' = \sqrt{(u'_1 - u'_2)^2 + (v'_1 - v'_2)^2} \quad (2.5)$$

## 2.3 LICHT- UND FARBVERTEILUNG

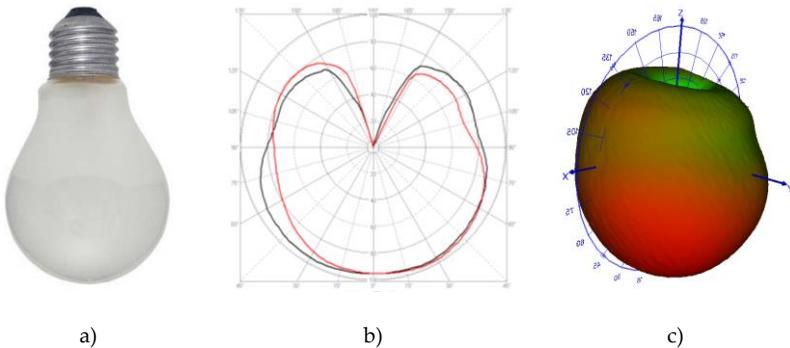
Eine **Lichtstärkeverteilungskurve**  $I(\theta, \varphi)$ , kurz LVK, ist eine winkelaufgelöste Lichtstärkemessung im Fernfeld, die nach aktuellem Stand der Technik mit scannenden Systemen, wie z. B. einem Goniophotometer ( $V(\lambda)$  spektrale Anpassung), erfasst wird. Mit dieser Technik wird jeder Punkt der Verteilung einzeln erfasst, indem entweder der Detektor oder die Lichtquelle mit Hilfe des Goniometers bewegt wird. Die Messpunkte werden dann interpoliert, um glatte LVK zu erhalten. Um jedoch sehr unregelmäßige LVK zu messen, sind hohe Winkelauflösungen notwendig, welche lange Messzeiten verursachen.

Für die Messung einer LVK muss ein bestimmter Minimalabstand zwischen Lichtquelle und Detektor gewährleistet sein, um die Lichtquelle als **Punktlichtquelle** betrachten zu können. Eine Punktlichtquelle befindet sich im **Fernfeld** bzw. in ausreichender Entfernung vom Empfänger, wenn die Messentfernung mindestens dem Fünffachen der größten Ausdehnung der leuchtenden Fläche entspricht [19]. Diese Modellierung der Lichtquelle als Punkt erlaubt die Annahme, dass sich alle Lichtstrahlen von diesem Punkt her ausbreiten. Da optische Empfänger Beleuchtungsstärkemesswerte erfassen, wird mit der Auswahl eines geeigneten Koordinatensystems die Lichtstärke unter Verwendung des photometrischen Grenzentfernungsgesetzes in verschiedenen Winkeln ermittelt [5]:

$$I(\theta, \varphi) = \frac{E(\theta, \varphi) \cdot r^2}{\cos \varepsilon} \quad (2.6)$$

wobei  $r$  der Abstand zwischen Lichtquelle und Detektor,  $(\theta, \varphi)$  sphärische Koordinaten und  $\varepsilon$  der Winkel der projizierten Fläche ist.

Die resultierende Lichtverteilung wird im Normalfall in einer 2-D Darstellung in definierten **Ebenen** gezeigt. Es ist jedoch möglich, einen sogenannten **Lichtstärkeverteilungskörper** in 3-D darzustellen. Beide Darstellungsvarianten werden beispielhaft für eine mattierte Glühlampe in Abbildung 2.4 gezeigt. Innerhalb der Grenzentfernung befindet sich die Lichtquelle im **Nahfeld**. Hier muss die Ausdehnung des zu messenden Beleuchtungssystems für eine korrekte Beschreibung der Lichtstrahlen betrachtet werden.



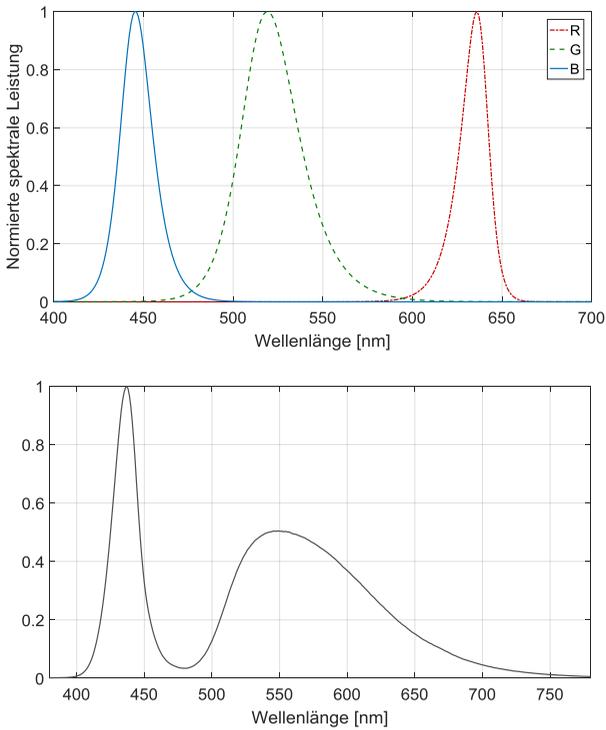
**Abbildung 2.4:** a) Gemessene mattierte Glühlampe, b) resultierende LVK und c) Lichtstärkeverteilungskörper

Eine winkelaufgelöste Farbverteilung wird ermittelt, indem statt eines Detektors mit einer spektralen Anpassung  $V(\lambda)$  drei oder vier Empfänger mit der entsprechenden optischen Filterung für die Funktionen  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  und  $\bar{z}(\lambda)$  angewendet werden. In diesem Fall wird für jeden Farbkanal eine Verteilung erfasst und für eine Farbanalyse kombiniert.

## 2.4 LICHEMITTIERENDE DIODEN

Lichtemittierende Dioden, kurz LED, werden für die Erzeugung von Licht eingesetzt, indem ein mit Silizium oder Germanium p-dotierter Halbleiter (Gruppe III – V) mit einem n-dotierten benachbart (p-n-Kontakt), und eine elektrische Spannung geeigneter Polarität angelegt wird. Hierbei entsteht eine Rekombination der positiven und negativen Ladungsträger. Folglich wird Energie in Form von nahezu monochromem Licht mit  $\Delta\lambda \approx 40nm$  frei. In Abhängigkeit von der verwendeten Halbleitermaterialienkombination wird in unterschiedlichen schmalbandigen Wellenlängenbereichen emittiert. Mit einer gezielten Auswahl und Kombination von Halbleitermaterialien und der entsprechenden Dotierung wird die Bandlücke bestimmt und somit die emittierte Lichtfarbe definiert. LED sind in fast allen sichtbaren Farben sowie in UV- und Infrarot-Wellenlängenbereichen verfügbar [18] [20] [21] [22].

Eine schmalbandige spektrale Emission ist für LED charakteristisch. Verschiedene farbige LED-Spektren werden in Abbildung 2.5 (oben) beispielhaft gezeigt. Es können verschiedene Variationen von roten, grünen, und blauen Farben in Abhängigkeit der Materialien erzeugt werden. Durch die Beschichtung eines blauen oder UV LED-Chips mit breitbandigen photolumineszierenden Farbstoffen, auch Leuchtstoffe bzw. Phosphor genannt, wird ein Teil der Strahlung in langwelligeres Licht transformiert. Es entstehen Mischfarben mit breitbandigen spektralen Emissionen, die für die Erzeugung von weißem Licht verwendet werden. Die auf diese Weise resultierenden Spektren sind in Abbildung 2.5 (unten) dargestellt.



**Abbildung 2.5:** Farbige LED-Spektren (oben) und Spektrum von phosphorkonvertierenden LED (unten)

Die spektrale Verteilung einer LED ist stark von den Betriebsbedingungen abhängig. Sowohl Strom- als auch Temperaturveränderungen haben einen direkten Einfluss auf die spektrale Emission der LED. Hier können Variationen in den absoluten spektralen Amplituden und laterale Verschiebungen der Spektren im Wellenlängenbereich verursacht werden [18] [20] [21] [22].

## Kapitel 3

# STAND DER TECHNIK

*In diesem Kapitel werden die messtechnischen Möglichkeiten zur Bestimmung der photometrischen und farbmtrischen Eigenschaften mit Fokus auf lichtemittierenden Dioden nach heutigem Stand der Technik vorgestellt. Hierbei werden verschiedene Arten von Detektoren erklärt, Methoden für winkelaufgelöste Messungen anhand von Goniometer-Systemen vorgestellt und deren Vor- und Nachteile analysiert. Zuletzt werden Kalibrierungstechniken der Messgeräte anhand von photometrischen Normalen gezeigt.*

### **3.1 LICHT- UND FARBMESSUNG: ARTEN VON EMPFÄNGERN**

Die lichttechnische Charakterisierung von LED-Lichtquellen wurde aufgrund der gesetzlichen Anforderungen an Leuchtmittel der Europäischen Union [23] von Bedeutung für die Hersteller. Hier spielt die Messunsicherheit der erfassten Größen eine wichtige Rolle, da diese in der Bewertung der gesetzlichen Anforderungen besonders an deren Grenzen zu berücksichtigen sind. Aus diesem Grund gewinnen die Rahmenbedingungen für die Charakterisierung von Leuchtmitteln und Leuchten zunehmend an Bedeutung. Dies wird über die Veröffentlichung des CIE-Standard S 025 für LED-Messungen untermauert [9].

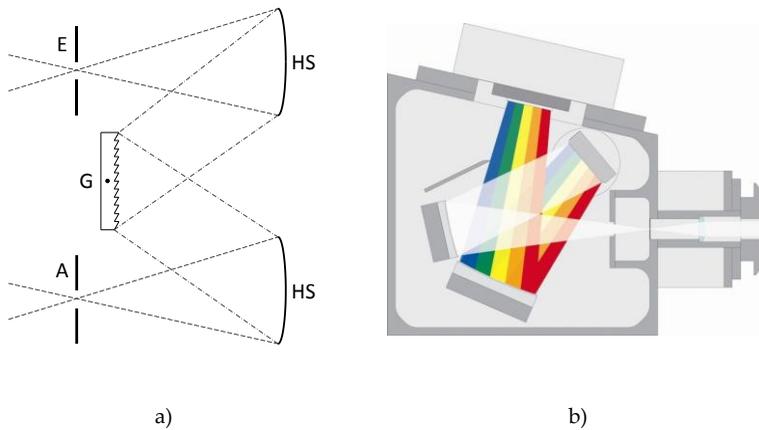
Farbmessungen und Farbhomogenitätsanalysen sind in diversen Bereichen wie KFZ- und OP-Beleuchtung oder Flugzeuginnenbeleuchtung sehr wichtig, da spezielle Anforderungen und Normen bei diesen Anwendungen beachtet werden müssen. Hier können verschiedene Farbmessmethoden genutzt werden, die jeweils Vor- und Nachteile haben bzw. unterschiedliche Informationen liefern. Die mit den verschiedenen Farbmessmethoden berechneten Farbwerte X, Y und Z sollten unter Beachtung der Messunsicherheit gleichwertige Informationen liefern. Die Farbwerte von selbstleuchtenden Lichtquellen können mit Hilfe von **spektralaufgelösten** Messgeräten bzw. Spektrometern oder mit **spektral integrierenden** Messmethoden, wie z. B. Colorimeter oder Leuchtdichtekamera mit der entsprechenden spektralen Anpassung an die CIE-Gewichtungsfunktionen erfasst werden. Diese Farbwerte können Richtungsabhängigkeiten zeigen, die mit Hilfe eines **Goniometers** charakterisiert werden können [15].

Die wichtigsten Eigenschaften von spektral integrierenden und spektral auflösenden Messgeräten sowie die mit diesen Messtechniken ermittelten photometrischen und farbmetrischen Informationen werden in den folgenden Abschnitten zusammengefasst.

### 3.1.1 SPEKTROMETER

Ein Spektrometer ist ein optoelektronisches Messgerät, das die elektromagnetische Strahlung in Anteile unterschiedlicher Energie unterteilt und misst. Infolgedessen ist ein Spektrometer ein **spektral auflösendes** Messgerät. In dieser Arbeit ist die sichtbare Strahlung von Bedeutung. Anhand eines Spektrometers wird das Licht in unterschiedlichen Wellenlängen gemessen [8, p. 447 vgl.]. Ein Spektrometer

besteht aus folgenden Elementen: eine zu messenden **Lichtquelle**, ein **dispersives Element** und ein **Detektor**. Hier ist die Emissionsmessung der Lichtquelle von Interesse. Spektrometer führen die Aufspaltung der zu charakterisierenden Lichtquelle in den entsprechenden Wellenlängen anhand von Beugung am **Gitter** oder Brechung an einem **Prisma** durch. Die meisten Spektrometer im UV-VIS-IR (Ultraviolett-Sichtbar-Infrarot) Wellenlängenbereich verwenden einen Gittermonochromator für die Spaltung der Strahlung in verschiedene Wellenlängen. Die typische Struktur eines solchen Spektrometers basiert im Normalfall auf dem **Czerny-Turner-Aufbau** (s. Abbildung 3.1). Hier wird das Licht der spektral zu charakterisierenden Lichtquelle auf dem **Eingangsspalt  $E$**  des Spektrometers fokussiert. Zunächst wird das Licht anhand eines **Hohlspiegels  $HS$**  auf dem **Gitter  $G$** , wie z. B. ein Blaze-Gitter, parallelisiert. Hier findet die Aufteilung der Strahlung der Lichtquelle in ihre einzelnen Wellenlängenkomponenten mit Hilfe von Interferenzeffekten statt. Das in entsprechenden Wellenlängen zerlegte Licht wird nun mit Hilfe eines zweiten Hohlspiegels entweder auf dem **Austrittsspalt  $A$**  (Monochromator) oder auf Abbildungsebenen (Polychromator) fokussiert. Beim Monochromator wird der zu messende Wellenlängenbereich am Ausgangsspalt auf ein schmales Band beschränkt und mit einem Punktdetektor, wie z. B. einem Photomultiplier erfasst. Die Messung aller Wellenlängen wird durch die mechanische Rotation des Gitters, welche unterschiedliche Wellenlängenbereiche bzw. Positionen auf dem Ausgangsspalt fokussiert, durchgeführt. In Gegensatz dazu werden bei einem Polychromator alle Wellenlängen gleichzeitig mit einem Zeilenarray von Halbleiterdetektoren erfasst.



**Abbildung 3.1:** Modifizierter Czerny-Turner spektraler Aufbau: a) Monochromator mit Punktdetektor [8, p. 456 Abb. 16.10 vgl.] und b) Polychromator mit Zeilenarray-Detektor [24, p. 2]

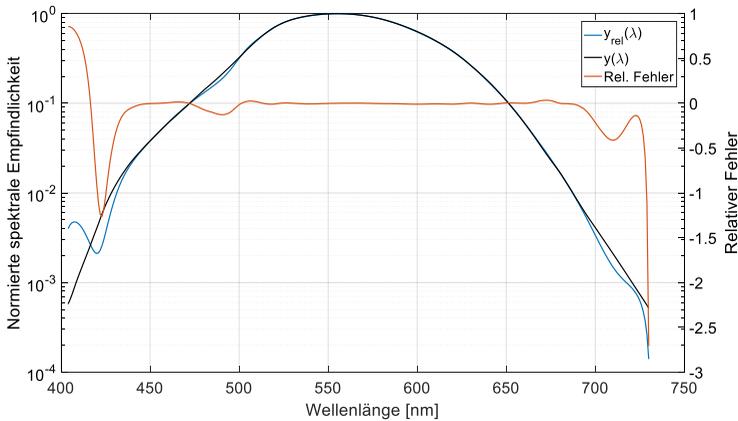
Für die Fokussierung des Lichtes werden Hohlspiegel verwendet, da hier keine chromatischen Effekte und minimalen Streulichte effekte auftreten. Mit einem Polychromator, auch Array-Spektrometer genannt, werden die spektralen Informationen der Lichtquelle sehr schnell erfasst, da alle Wellenlängen gleichzeitig gemessen werden. Arraydetektoren besitzen jedoch eine niedrigere Sensitivität und auch ein schlechteres SNR<sup>1</sup>-Verhältnis als Punktdetektoren, da hier benachbarte Wellenlängen mit verminderter Energie ebenfalls erfasst werden. Die Drehung des optischen Gitters erzeugt eine zusätzliche nicht korrelierte Wellenlänge-Messunsicherheit bei der spektralen Messung [8, p. 452 vgl.].

<sup>1</sup> Signal-Rausch-Verhältnis

Mit spektral aufgelösten Messungen  $S_Z(\lambda)$  können die farbmtrischen Größen ermittelt werden. Hier wird das gemessene Spektrum der Lichtquelle mit den Spektralwertfunktionen des farbmtrischen Normalbeobachters  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  und  $\bar{z}(\lambda)$  multipliziert und abschließend in einem definierten Wellenlängenbereich integriert (s. Gl. (2.3)). Als Stand der Technik ist hier die Kombination von einer Ulbrich-Kugel mit einem Spektrometer für integrale Messungen zu nennen.

### 3.1.2 PHOTOMETER UND COLORIMETER

Photometer und Colorimeter sind optische Sensoren zur Erfassung von spektral integrierenden Größen. Hierfür entspricht die Systemfunktion des Detektors einer Gewichtungsfunktion. Wie in Abschnitt 2.1.1 bereits ausgeführt, werden optische Filterungstechniken zur Anpassung der spektralen Empfindlichkeit des Detektors verwendet. Hochqualitative **Photometer** werden mit einer sehr genauen optischen Partialfilterung, die die spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges möglichst gut reproduziert, angepasst. Farbmessungen nach dem Dreibereichsverfahren mit sogenannten **Colorimetern** verwenden Si-Photoelemente mit einer spektralen Anpassung an die Normspektralwertfunktionen  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  und  $\bar{z}(\lambda)$ , die durch optische Filterung erreicht wird. Beide Arten von Detektoren liefern, nach der entsprechenden Kalibrierung mit einem geeigneten Normal, jeweils direkte Beleuchtungsstärkewerte oder Farbwerte. Diese Empfänger sind Punktdetektoren, die das einfallende Licht auf eine definierte Fläche spektral integrieren und erfassen.



**Abbildung 3.2:** Relative spektrale Fehlanpassung eines Photometers.

Da die spektrale Anpassung an die Gewichtungsfunktion nicht fehlerfrei erreicht werden kann, ergeben sich relative spektrale Fehlanpassungen. Abbildung 3.2 zeigt beispielhaft den relativen Fehler der spektralen Anpassung anhand von Partialfilterung eines Photometers an die  $V(\lambda)$ -Funktion in einer logarithmischen Skala. Hier ergibt sich eine korrigierbare Fehlanpassung. Es ist klar zu erkennen, dass relativ deutliche Abweichungen im Bereich der kurzen und langen Wellenlängen des sichtbaren Spektrums auftreten. Der spektrale Fehler kann in diesen spektralen Bereichen nicht vernachlässigt werden, vor allem, wenn schmalbandige LED-Spektren gemessen werden sollen [14].

Zur Messung von Beleuchtungsstärken und Farbwerten werden diese Detektoren auf einer Photometerbank platziert, da hier der Abstand zwischen der zu messenden Lichtquelle und dem Empfänger sehr genau eingestellt werden kann. Von den auf diese Weise erfassten Messwerten können folglich Lichtstärke, bzw. die äquivalent

farbmetrischen Größen, unter Anwendung des photometrischen Grenzentfernungsgesetzes ermittelt werden (s. Gl. (2.6)). Hierbei wird jedoch nur eine Punktmessung bzw. eine bestimmte Richtung der Verteilung gemessen. Alternativ kann der Photometer zusammen mit einer Ulbrich-Kugel verwendet werden, um einen im Winkelraum integrierten Lichtstromwert zu ermitteln.

### 3.1.3 LEUCHTDICHTEKAMERA

Eine Leuchtdichtekamera bzw. **Imaging Luminance Measurement Device** (kurz ILMD) oder eine Farbmesskamera sind jeweils hochauflösende Photometer und Colorimeter. Sie stellen eine Alternative zu herkömmlichen Punktdetektoren dar. Eine ILMD ist ein spektral angepasster CCD<sup>2</sup> oder CMOS<sup>3</sup> Pixelarray-Detektor mit einem Präzisionsobjektiv. Sie werden in der Industrie vor allem zur Messung von Displays und Automotive-Beleuchtungssystemen eingesetzt. Im Vergleich zu einer Punktmessung mit einem Photometer oder Colorimeter wird hierbei eine große Anzahl von Messpunkten gleichzeitig in einem Bild erfasst. Dies reduziert die Messzeiten erheblich. Für die Messung von photometrischen Größen mit einem ILMD ist jedoch ein spezieller Messaufbau erforderlich: Ein weißer oder transparenter Schirm muss mit dem Messobjekt beleuchtet werden, und ein Bild dieses Schirms wird von der Kamera aufgenommen [3, pp. 58, 59 vgl.]. Der Stand der Technik ist aktuell die Aufnahme eines einzelnen Bildes bzw. einer Messregion, welche die

---

<sup>2</sup> Charged Coupled Device

<sup>3</sup> Complementary metal-oxide semiconductor

relevanten Messpunkte enthält, wie z.B. die erforderlichen Messpunkte bei den UN/ECE-Regelungen [25] für Automobilscheinwerfermessungen. Beispiele von solchen speziellen Messaufbauten werden in [26] und [27] vorgestellt.

Kamerabasierte Detektoren liefern jedoch ungenauere Messwerte als Photometer oder Colorimeter. Für Kameras spielen das Streulicht im Messraum und innerhalb der Optik sowie die Reflexions- bzw. Transmissionseigenschaften des verwendeten Schirmes eine wichtige Rolle. Die optische Filterung der photosensitiven Kameraelemente kann in der Regel ebenfalls nicht so genau wie bei Photometern und Colorimetern realisiert werden, da hier Vollfilterungstechniken für die spektrale Anpassung an einer Gewichtungsfunktion angewendet werden. Der Grund hierfür ist, dass für ein abbildendes System wie eine Kamera keine Diffusoren für eine homogene Beleuchtung der Detektoroberfläche verwendet werden (s. Abschnitt 2.1.1). Trotz aller genannten Messfehlerquellen bleiben kamerabasierte Messtechniken attraktiv, da die Pixelauflösung viel kleiner als die minimale Photometerauflösung ist und mit diesen Systemen hochaufgelöste Homogenitätsbewertungen möglich sind. Kamerabasierte Messungen werden üblicherweise im industriellen Umfeld verwendet, da eine kürzere Messdauer auch finanzielle Vorteile mit sich bringt.

### **3.2 WINKELAUFGELÖSTE MESSUNGEN**

Sowohl eine spektrale Messung als auch eine Photometer- oder Colorimeter-Messung liefern Messinformationen aus einer Richtung bzw. einem Winkelkoordinatenpaar. In Kombination mit einer Ulbrich-Kugel werden im Winkelraum integrierte Größen erfasst.

Doch wie können winkelaufgelöste photometrische oder farbmetrische Größen erfasst werden? Hierfür werden die im vorherigen Kapitel vorgestellten Empfängerarten mit einem Goniometer kombiniert. Dies erlaubt die Erfassung von Licht- und Farbverteilungen, indem die relative Position zwischen Empfänger und Lichtquelle in einem Raster von Punkten variiert wird und in diesen Punkten Messwerte erfasst werden. Normalerweise scannt der Detektor nur wenige Messpunkte, die anschließend interpoliert werden. Die Messsysteme mit einem Punktdetektor werden in dieser Arbeit als **scannende Systeme** bezeichnet, da jeder Punkt der Verteilung einzeln gemessen wird. Als Messergebnis der Goniometermessung werden richtungsabhängige Lichtstärkewerte  $I(\theta, \varphi)$  bzw. Farbwerte einer Lichtquelle erfasst. Für die Berechnung des Lichtstromes wird diese LVK im Winkelraum diskret mathematisch integriert, welche analog zu einer Integration im Winkelraum bei einer Ulbrich-Kugel ist [12]:

$$\Phi = \sum_{\theta=1}^{N-1} \left( \sum_{\varphi=1}^M I(\theta, \varphi) \cdot \Delta\varphi \right) \cdot \sin \theta \cdot \Delta\theta \quad (3.1)$$

wobei  $N = \pi/\Delta\theta$  und  $M = 2\pi/\Delta\varphi$  der Anzahl der abgetasteten Punkte sind.

Für die winkelaufgelöste, farbmesstechnische Charakterisierung von LED-Quellen und Leuchten wird in der Regel ein Goniometer in Kombination mit einem Spektrometer oder einem Colorimeter eingesetzt. Wenn hohe Winkelauflösungen nötig werden, wie z.B. im Fall der Messung komplexer unregelmäßiger Lichtverteilungen oder mit hohen Gradienten, benötigen goniometrisch rasternde Messungen lange Messzeiten. Eine zeitsparende Alternative ist die kamerabasierte Messtechnik, die eine große Anzahl von Messpunkten gleichzeitig erfasst. Deren Nachteile sind aber die größeren systematischen Fehler

der spektralen Anpassung sowie des Streulichts. Diese systematischen Fehler können jedoch korrigiert werden. Allerdings ist für die Anwendung von kamerabasierten Messtechniken ein spezieller Messaufbau für die indirekte Aufnahme der Verteilungen auf einem Schirm notwendig, indem jedes Pixel der Kamera hierbei einen indirekten Beleuchtungsstärkemesser auf dem Schirm darstellt. Aus diesem Grund werden kamerabasierte Messmethoden auch **indirekte** Messtechniken genannt. Diese Messtechniken werden in dieser Arbeit als **kamerabasierte Systeme** bezeichnet. Die aktuellen Kameramethoden [3] [26] [27] können jedoch nur einen definierten Winkelraum erfassen, der von der Größe des Schirmes, dem Abstand Kamera-Schirm und der Brennweite des verwendeten Objektivs abhängig ist. In dieser Arbeit wird ein kamerabasiertes Messsystem mit einem Goniometer um ein Blendensystem erweitert, um den kompletten Winkelraum mit Kameraaufnahmen erfassen zu können. Dieses System wird im Kapitel 5.1 ausführlich vorgestellt.

Je nachdem, welche Art von Lichtquellen zu messen ist, muss ein Kompromiss zwischen sehr exakten absoluten Werten und langen Messzeiten bei scannenden Systemen oder schnellen Messungen mit hohen Auflösungen aber systematischen Fehlern bei kamerabasierten Systemen getroffen werden. Scannende Systeme zeigen ebenfalls eine intrinsische minimale Messauflösung, die auf die Größe des verwendeten Empfängers bzw. der Lichteintrittsfläche des Sensors zurückzuführen ist. Diese Größe entspricht normalerweise der Mittelung von 100 Pixeln einer äquivalenten Kameramessung. Da die systematischen Fehler von kamerabasierten Messsystemen anhand von entsprechenden Korrekturen behoben werden können, kann auf diese Weise ein entscheidender Nachteil der kamerabasierten Messungen gegenüber der auf Photometer bzw. Colorimeter basierten Methoden

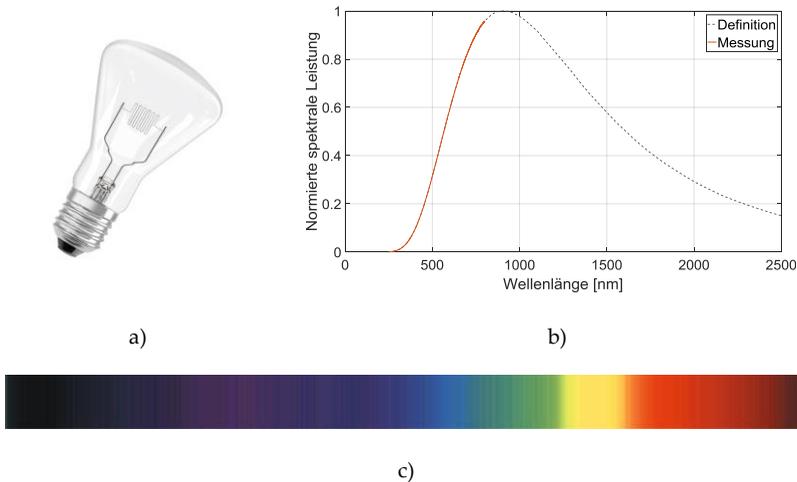
ausgeglichen werden, wobei gleichzeitig die Vorteile von Kameramessungen erhalten bleiben.

Von wichtiger Bedeutung für die vorliegende Arbeit ist die spektrale Korrektur der spektralen Fehlanpassung aufgrund der Vollfilterung bei kamerabasierten Messsystemen. Diese spektrale Fehlanpassung wird mit Hilfe des SMCF behoben. Hierfür sind jedoch winkelaufgelöste spektrale Informationen  $S_z(\theta, \varphi)$  für die Durchführung der Korrektur notwendig, welche in dieser Arbeit mit Hilfe von Sensorfusionstechniken erzeugt werden. Für die Erzeugung von winkelaufgelösten spektralen Informationen gibt es bereits erste Ansätze für Nahfeld-Messungen anhand von Filterkameramessungen von [28], [29] und [30], welche hier für kamerabasierte Messungen im Fernfeld adaptiert werden.

### 3.3 KALIBRIERUNG

„[...] Lampen für wissenschaftliche Zwecke sind durch ihre Konstruktion und einen Alterungsprozess vor der Verwendung auf stabile und damit kalibrierbare photometrische Daten ausgelegt. [...]“ [8, pp. 172, 173]. Diese Lampen werden als „Normale“ bezeichnet. Photometer und Colorimeter sind üblicherweise **absolut** mit einem **photometrischen Normal** wie z. B. **Normlichtart A** kalibriert, d.h. mit Wärmestrahlern mit breitbandigem Spektrum (s. Abbildung 3.3 b). Bei der Kalibrierung wird die photometrische Empfindlichkeit des Photometers bestimmt. Nutzt man nun das Photometer zur Vermessung von LED-Quellen, die eine andere spektrale Antwort als Normlichtart A zeigen, so provoziert dies einen systematischen Fehler.

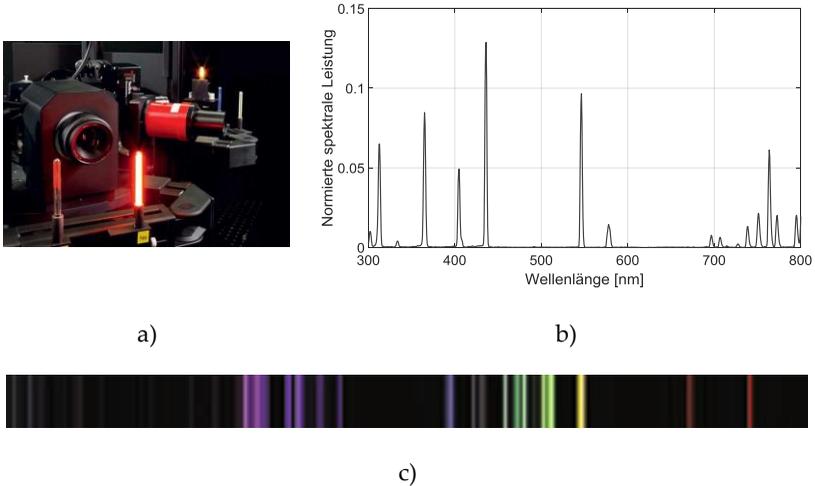
Dieser Anpassungsfehler wird mit dem SMCF ebenfalls quantifiziert. Ein ideales Photometer hat eine relative spektrale Empfindlichkeit  $S_{rel}(\lambda)$ , die der  $V(\lambda)$  Kurve entspricht. In diesem Fall wäre der SMCF, ohne Beachtung der Messunsicherheit, gleich eins.



**Abbildung 3.3:** Beispiel Kalibrierlampe für photometrische Kalibrierung: a) Lampe Wi40 [8, p. 173 Abb 6.4] , b) spektrale Charakteristik und c) sichtbares Spektrum der Normlichtart A Lampe [31, p. 299]

Für die Kalibrierung von Spektrometern sind zwei Kalibrierungen notwendig: eine photometrische absolute Kalibrierung und eine Wellenlängenkalibrierung. Für die absolute Kalibrierung werden ebenfalls schwarze Strahler eingesetzt, z. B. Halogenlampen. Das gemessene „rohe“ Signal von einem Spektrometer besteht aus der Überlagerung des gemessenen Lampenspektrums mit der Detektorsensitivität. Dazu müssen die spektrale Übertragungsfunktion des Gitters und, wenn vorhanden, die für das Einkoppeln des Lichtes im

Messgerät verwendete Glasfaser betrachtet werden. Durch die Division des gesamten Messsignals durch ein bekanntes Referenzspektrum, in diesem Fall Normlichtart A, wird das spektrale Messsignal der unerwünschten Anteile korrigiert [8].



**Abbildung 3.4:** Spektrales Normal: a) Gasentladungslampen [20, p. 37 Bild 10] , b) spektrale Charakteristik und c) [31, p. 299] Linienpektrum einer HgAr-Lampe

Für die Wellenlängenkalibrierung werden die von der Natur definierten Linienspektren von Niederdruck-Gasentladungslampen eingesetzt. Je nachdem, welches Material für die Glasfüllung verwendet wird (Neon, Xenon, Quecksilber, usw.), werden charakteristische spektrale Linien erzeugt (s. Abbildung 3.4 b). Diese Lampen sind **spektrale Normale**. Die genauen Wellenlängenpositionen der spektralen Linien können in der Datenbank des NIST (Nationales Metrologie-Institut der USA) nachgeschlagen werden [32].



## Kapitel 4

# MESSUNSICHERHEITSANALYSE

*Messen bedeutet laut Duden „etwas in seinen Maßen, seiner Größe zu bestimmen“. In den Naturwissenschaften wird das Messen als der direkte oder indirekte Vergleich einer physikalischen Größe zu einer Maßverkörperung von Einheiten definiert. Das Messergebnis ist in der Regel abhängig vom verwendeten Messgerät und von der Messumgebung. Diese Abhängigkeiten ergeben eine „Unsicherheit“ über das Messergebnis. Im Internationalen Wörterbuch der Metrologie [33], kurz VIM, wird die Messunsicherheit als „Kennwert, der aus Messungen gewonnen wird und zusammen mit dem Messergebnis zur Kennzeichnung eines Wertebereiches für den wahren Wert der Messgröße dient“ definiert. Wie diese Unsicherheit systematisch bestimmt werden kann, wird in diesem Teil der Arbeit ausführlich für spektrale Messgrößen untersucht.*

### 4.1 MESSUNSICHERHEIT

Das Ziel einer Messung ist, Information bezüglich einer physikalischen Größe anhand von Messwerten zu gewinnen. Es gibt keine exakten bzw. „**wahren**“ Messwerte. Wenn eine Größe gemessen wird, ist das Ergebnis von einer Vielfalt von Faktoren abhängig. Hierzu gehören zum Beispiel das verwendete Messsystem, das Messprinzip, die Erfahrung des Messtechnikers, das Messobjekt, die Kalibrierung und/oder die Umgebungsbedingungen (Temperatur, Druck,

Feuchtigkeit, u.a.). Alle diese Faktoren verursachen Messabweichungen. Wenn die physikalische Größe eines Messobjektes wiederholt unter Verwendung desselben Messgerätes vom selben Messtechniker und in nahezu denselben Umgebungskonditionen gemessen wird, werden in der Regel minimal abweichende Messwerte erfasst. Der Mittelwert dieser wiederholten Messungen ist eine gute Abschätzung des wahren Wertes der Messgröße, auch „**reeller**“ Wert genannt. Das Messsystem kann jedoch auch einen sogenannten **systematischen** bzw. korrelierten Fehler beinhalten, der alle Messungen beeinflusst und dessen Ursache bekannt und somit korrigierbar ist. Systematische Effekte müssen in der Photometrie korrigiert werden [9]. Darüber hinaus gibt es auch unvorhersehbare Effekte aufgrund nicht bekannter Einflüsse. Diese Messabweichungen sind nicht korrigierbar und nur durch die Ermittlung der **Messunsicherheit** anhand statistischer Verfahren quantifizierbar. Diese Art von Effekten werden als „Random“ bzw. als **zufällig** definiert. Zur Bestimmung der Messunsicherheit einer Messgröße ist ein physikalisches Modell erforderlich. Das physikalische Modell sollte eine möglichst gute analytische Beschreibung der physikalischen Zusammenhänge der Eingangsparameter bieten. Dies ergibt den oder die Ausgangsparameter. Die Modellgleichung basiert in der Regel auf einem physikalischen Messprinzip und sollte im Idealfall alle bekannten Einflüsse berücksichtigen [34] [35] [36] [37].

In einer Messunsicherheitsanalyse werden zuerst alle bekannten systematischen Effekte unter Berücksichtigung der entsprechenden Messunsicherheit korrigiert. Die zufälligen Messabweichungen werden zunächst mit statistischen Methoden untersucht. Aus dieser Analyse resultiert eine Schätzung  $y$  des reellen Wertes der gemessenen Größe mit der Angabe eines erweiterten Messunsicherheitsintervalls

$U(y)$  gemäß Gl. (4.1). Das MU-Intervall  $U(y)$  wird systematisch mit der internationalen einheitlichen Vorgehensweise „**Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement**“, kurz **GUM**, berechnet [36].

$$Y = y \pm U(y) \quad (4.1)$$

## 4.2 GUM

Die Messunsicherheitsbestimmung ist für Wissenschaft und Industrie von wichtiger Bedeutung, da sie Folgendes ermöglicht:

- eine Quantifizierung der Qualität einer Messung und des Testobjektes
- den Vergleich zwischen Messergebnissen verschiedener Messlabore
- die Durchführung von Konformitätsbewertungen (von engl. conformity assessment) für die Vermarktung von Produkten
- die Optimierung des Messsystems durch Identifizierung des Beitrages der einzelnen Parameter zur Messunsicherheit

Aus diesen und anderen Gründen wurde die Notwendigkeit festgestellt, einen international anerkannten Standard für die Messunsicherheitsberechnung zu entwickeln. Dies wurde mit der Veröffentlichung und ständigen Aktualisierung der GUM [36] und diversen Ergänzungsbänden untermauert. Die GUM ist ein Leitfaden für die systematische Bestimmung der Messunsicherheit. Dieses Dokument gibt die mathematischen und statistischen Grundelemente für die korrekte Berechnung der Messunsicherheit vor. Das statistische

Verfahren wird in der einschlägigen Literatur dargestellt [34] [35] [36] [37]. Der erste Schritt beim „GUM-Kochrezept“ ist die Erstellung eines Messmodells, das den Eingangsparameter  $X_i$  mit einem Ausgangsparameter  $Y$  in einer Funktionsgleichung in Zusammenhang bringt. Hierzu gehört die Identifizierung der Eingangsparameter und der Effekte, die beim Messen der physikalischen Größe eine Rolle spielen sowie die Bestimmung ihre Korrekturfaktoren. Eine Erweiterung zu mehreren Ausgangsparametern  $Y_{i,\dots,n}$  wird speziell in GUM-Supplement 2 [38] berücksichtigt. Da Eingangsparameter normalerweise Objekte einer Messung sind, die von anderen Parametern abhängig sein können, kann das Messmodell schnell komplex werden. Die Eingangsparameter können in zwei Kategorien eingeordnet werden [36]:

- **Typ A:** Größen, deren Werte und Unsicherheiten direkt anhand der Durchführung von wiederholten Messungen und statistischen Verfahren gewonnen werden. Je mehr Messwerte zur Verfügung stehen, desto aussagekräftiger ist die statistische Information.
- **Typ B:** Größen, deren Werte und Unsicherheiten von externen Quellen herrühren, wie z. B. Kalibrierscheine, Referenzmaterialien, Erfahrung und/oder Literatur.

Die GUM-Methodik kann nur angewendet werden, wenn die Voraussetzungen für das Messmodell und dessen Parameter erfüllt sind. Einerseits sollte das Messmodell einen linearen Zusammenhang zwischen Ausgangs- und Eingangsparameter zeigen. Andererseits wird eine normale Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (engl. **Probability Density Function**, kurz PDF) für die Eingangsgrößen angenommen. Für statistische Informationen vom Typ B kann der Fall

eintreten, dass die gegebene PDF nicht normalverteilt ist. In diesem Fall muss die PDF in eine Normalverteilung umgerechnet werden. Auf diese Weise werden Informationen vom Typ A und Typ B für die Bestimmung der MU kombiniert.

Bei dem funktionellen Zusammenhang im Messmodell zwischen Eingangs- und Ausgangsparametern wirken sich Messabweichungen  $\Delta x_i$  der Eingangsparameter unterschiedlich stark auf das Messergebnis  $\Delta y$  aus. Diese Abhängigkeit wird wie folgt mathematisch übersetzt [34] [36]:

$$\Delta y = y - y_w = f(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, \dots, x_n + \Delta x_n) - f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4.2)$$

wobei kleine Symbole verwendet werden, da es sich um geschätzte Parameter anhand von Messungen handelt. Diese Abhängigkeit kann mit dem ersten Term der Taylorreihe ersetzt werden, wenn die Linearität des Messmodells signifikant ist bzw. wenn  $\Delta x_i \ll x_i$  ist:

$$\Delta y \cong \sum_i^n \frac{\delta f}{\delta x_i} \cdot \Delta x_i \quad (4.3)$$

Anderenfalls müssen weitere Glieder der Reihe berücksichtigt werden, was die Komplexität der Analyse erhöht. Die Gleichung (4.3) wird als **Fortpflanzung** bzw. Verbreitung der Messunsicherheit bezeichnet und ist die theoretische Basis der GUM-Methodik. Die partiellen Ableitungen in (4.3) beschreiben die o.g. Abhängigkeiten im Messmodell und werden als **Sensitivitätskoeffizienten**  $c_i$  definiert. Diese Koeffizienten können analytisch durch die Modellgleichung oder experimentell bestimmt werden. Experimentell werden die Veränderungen in  $Y$  untersucht, die durch eine Veränderung einer bestimmten  $X_i$

verursacht werden, sofern alle andere Eingangsparameter konstant gehalten werden.

Um die Standardmessunsicherheit der Ausgangsgröße  $u(y)$  vollständig zu definieren, muss zusätzlich das **Korrelationskonzept** vorgestellt werden. Im einfachsten Fall sind die Eingangsparameter unkorreliert bzw. werden statistisch unabhängig gemessen. Es kommt aber oft vor, dass die verwendeten Messungen  $x_i$  etwas „Gemeinsames“ haben. Wenn es zwischen den Eingangsgrößen  $(x_i, x_j)$  eine Interdependenz gibt, ergibt sich ein zusätzlicher Beitrag zu der MU des Messergebnisses. Diese Interdependenz wird mit einem **Korrelationskoeffizienten**  $r(x_i, x_j)$  beschrieben, der Werte im Bereich von  $-1 \leq r(x_i, x_j) \leq 1$  annehmen kann. Ein  $r(x_i, x_j) = 0$  bedeutet, dass die geschätzten Werte der Eingangsparameter unabhängig sind und dass eine Veränderung bei  $x_i$  keine Veränderung bei  $x_j$  verursacht [34] [36].

Zuletzt wird das erweiterte Messunsicherheitsintervall  $U(y)$  von Gl. (4.1) anhand eines **Erweiterungsfaktors**  $k(p)$  berechnet, dem ein gewisses Vertrauensniveau (von eng. level of confidence) am geschätzten Messergebnis entspricht, wie z.B.  $p = 95$  oder  $99$  %. Dieser Faktor nimmt normalerweise Werte zwischen 2 und 3 für eine normalverteilte geschätzte Messunsicherheit des Messergebnisses an:

$$U(y) = k(p) \cdot u(y) \quad (4.4)$$

### 4.3 GUM SUPPLEMENT 1: MONTE-CARLO-METHODE

Wie bereits erwähnt, kann die GUM-Methodik nur unter bestimmten Voraussetzungen angewendet werden. Beispiele, bei denen die GUM keine korrekten Messunsicherheitsangaben liefert, sind [39] [40]:

- Komplizierte Messmodelle: die Sensitivitätskoeffizienten können mit partiellen Ableitungen nicht berechnet werden
- Das Messmodell ist stark nicht linear
- Asymmetrische Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Ausgangsparameter: keine Gauß oder t-Student Verteilung
- Keine verfügbare Korrelationsinformation der Eingangsgrößen

Unter diesen Umständen kann die Fortpflanzung der Messunsicherheit (Gl. (4.3)) nicht eingesetzt werden. Wenn das Messmodell nicht linear ist, kann die Anwendung von GUM sowohl einen falschen geschätzten Wert  $y$  als auch eine entsprechende falsche Standardmessunsicherheit  $u(y)$  liefern. Eine unsymmetrische Ausgangs-PDF, welche einen unrealistischen Erweiterungsfaktor  $k(p)$  verursacht, ist ebenfalls möglich. Das Supplement 1 der GUM [39] löst dieses Problem mit der Benutzung der Propagation von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen durch die **Markov-Gleichung** statt mit der Verbreitung von Messunsicherheiten. Die PDF  $g_Y(\eta)$  für  $Y$  wird mit der Kombination der statistisch möglichen Eingangsparameterwerte bzw. mit den PDF  $g_X(\xi_{1,\dots,n})$  anhand des Messmodells gewonnen [41]:

$$g_Y(\eta) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} g_X(\xi) \cdot \delta(\eta - f(\xi)) \cdot d\xi_1 \dots d\xi_n \quad (4.5)$$

wobei  $\xi$  und  $\eta$  wahrscheinliche Werte der Eingangsparameter und des Ausgangsparameters und  $\delta$  die Dirac-Funktion sind.

Da die Markov-Gleichung sehr schwer analytisch zu lösen ist, wird sie mit der **Monte-Carlo-Methode** (kurz MCM) numerisch implementiert. Mit dem Monte-Carlo-Ansatz wird eine approximierte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen  $G_Y(\eta)$  der Ausgangsparameter  $Y$  bestimmt. Mit der berechneten PDF wird abschließend der geschätzte Wert  $y$  mit dem Erwartungswert der Verteilung und die Standardmessunsicherheit  $u(y)$  mit deren Standardabweichung jeweilig bestimmt. Die numerisch berechneten Ausgangsparameter werden für die Bestimmung eines passenden **Überdeckungsintervalls** (engl. coverage interval) verwendet, das sich von dem mit dem „klassischen“ GUM berechneten Erweiterungsfaktor  $k(p)$  unterscheiden kann.

Die Monte-Carlo-Methode ist eine numerische Methode, die mit den GUM-Prinzipien konsistent ist. Wie o.g. wird sie für spezielle Fälle angewendet, bei denen der „klassische“ GUM-Ansatz zu falschen Aussagen führen kann. Die MCM bringt außerdem Vorteile mit sich: Es ist keine Berechnung von Sensitivitätskoeffizienten notwendig, da sie durch die Methodik selbst berücksichtigt werden. Die Methodik ist außerdem sehr intuitiv und erlaubt eine Beachtung von Korrelationen zwischen Eingangsparametern direkt im Messmodell.

Für die Berechnung der MU sind, wie beim GUM, ein Messmodell und Informationen bezüglich der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Eingangsparameter nötig. Diese Informationen können als Typ A oder Typ B Größen anfallen. Ein Rechner und passende mathematische

Software sind für die Erzeugung von Zufallszahlen und die abschließende statistische Auswertung nötig. Auf diese Weise wird der Messvorgang „virtuell“ mehrmals wiederholt, indem die Werte der Eingangsgrößen entsprechend deren PDF zufällig variiert werden [40]. Die wichtigsten Schritte in der MC-Messunsicherheitsanalyse können in „*Formulation*“, „*Propagation*“ und „*Summarizing*“ gegliedert werden [39] [42]:

**Formulation:**

- Auswahl der Eingangsgrößen  $X_1, X_2, \dots, X_n$  und Ausgangsgröße  $Y$
- Bestimmung eines Messmodells, das Eingangs- und Ausgangsgrößen in Verbindung bringt:  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$
- Auswahl einer PDF für jede Eingangsgröße  $X_1, X_2, \dots, X_n$

**Propagation:**

- Festlegen der Anzahl  $M$  der Monte-Carlo-Iterationen (**trials**)
- Erzeugen  $M$  zufällige Stichprobevektoren, die von der PDF der Eingangsgrößen generiert werden
- Nutzung der  $M$  generierten Vektoren der Eingangsgrößen im Messmodell, um  $M$  Ausgangsgrößenwerte  $y$  zu bestimmen

**Summarizing:**

- Sortieren der  $M$  Modellergebnisse zunehmend, um eine diskrete Darstellung  $G$  der Verteilung zu erzeugen
- $G$  verwenden, um den geschätzten Wert  $y$ , die Standard-Messunsicherheit  $u(y)$  und das Überdeckungsintervall  $[y_{low}, y_{high}]$  mit der Wahrscheinlichkeit  $p$  zu bestimmen

Die Anzahl  $M$  der Monte-Carlo-Iterationen sollte groß genug ausgewählt werden, um eine korrekte Beschreibung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion  $G_Y(\eta)$  der Ausgangsgröße durch die diskrete Darstellung  $G$  zu gewährleisten. Eine Anzahl  $M = 10^6$  Iterationen liefert in der Regel ein 95% korrektes Überdeckungsintervall für die Ausgangsgröße bis zur zweiten Kommastelle. Da das Überdeckungsintervall abhängig von der Verteilungsform ist, kann  $M$  auch anwendungsspezifisch adaptiv bestimmt werden [39].

Um einzelne Effekte bzw. Sensitivitätskoeffizienten während der MC-Simulation zu betrachten und deren Beitrag im Unsicherheitsbudget zu bestimmen, können die Eingangsparameter in der Simulation getrennt variiert werden. Auf diese Weise werden Beiträge der einzelnen Parameter und deren PDF im Budget determiniert. Das Verhältnis zwischen der Standardabweichung der berechneten Ausgangsgröße und der Standardmessunsicherheit der variierenden Eingangsgröße ergibt den Sensitivitätskoeffizienten [39]. Kovarianz-Matrix bzw. Korrelationsinformation der Eingangsparameter können auch mit den  $M$  erzeugten Stichprobevektoren berechnet werden. Nur wenn das Messmodell mehrere Ausgangsgrößen besitzt, kann die Korrelation von den Ausgangsgrößen miteinander auch bestimmt werden. Die Implementierung der MCM kann mit einer beliebigen mathematischen Software durchgeführt werden, wie in [42], [41] und [43].

Im folgenden Abschnitt wird die MC-Methode für den konkreten Fall von integrierten spektralen Größen, die anhand spektraler Messungen berechnet werden, wie z. B. Farbkoordinaten und „spectral mismatch correction factor“ (SMCF) für LED-Quellen, untersucht und implementiert, da diese für die vorliegende Arbeit eine bedeutende Rolle spielen.

## 4.4 SPEKTRALE MESSUNSICHERHEIT

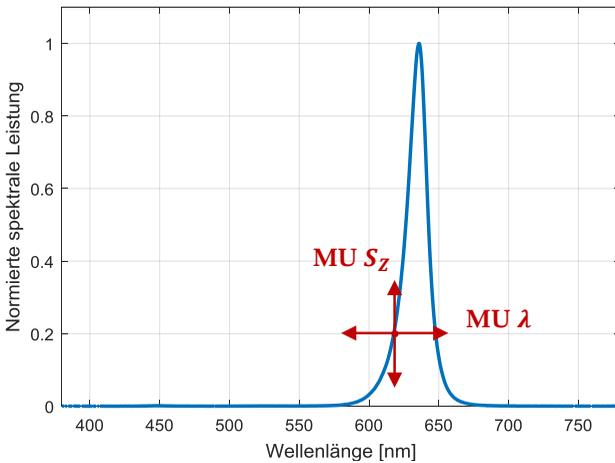
In 2.4 wurde die charakteristische spektrale Verteilung von LED-Quellen vorgestellt. Spektren werden mit wellenlängenaufgelösten Messgeräten wie z. B. einem Array-Spektrometer erfasst (s. 3.1.1). Die Strahlung verschiedener Wellenlängen wird mit Hilfe eines Monochromators gemessen. Da die Wellenlängenauflösung für jedes Messgerät charakteristisch und zusätzlich abhängig von der Spaltgröße des Monochromators ist [44] [8], werden die erfassten Messwerte in der Regel interpoliert. Array-Spektrometer haben den Vorteil, dass sie keine beweglichen Teile enthalten, da der Ausgangsspalt in der Ebene eines CCD-Array liegt. Die simultane Erfassung aller Wellenlängen bringt schnellere Messungen mit sich, aber verursacht gleichzeitig Probleme bezüglich des Streulichtes. Die absoluten Messwerte sowie die spektrale Empfindlichkeit des Spektrometers werden anhand einer Kalibrierung mit Normlichtart A<sup>4</sup> bestimmt. Die direkte Zuordnung der gemessenen Strahlung zu den jeweiligen Wellenlängen erfolgt mit Hilfe des charakteristischen Linienspektrums von Gasentladungslampen oder mit durchstimmbaren Laserlinien [44] [8]. Im Rahmen dieser Kalibrierung ist jedoch auch eine Messunsicherheitsanalyse durchzuführen, da für die Berechnung von spektralen Größen, wie z. B. Farbkoordinaten, spektrale Informationen nötig sind. Eine generalisierte Form von spektralen Größen wird wie folgt berechnet [45]:

---

<sup>4</sup> ein modellierbares, breites und zeitlich stabiles Spektrum im VIS- und NIR-Bereich mit bekannter Bestrahlungsstärke in einer vorgegebenen Abstrahlrichtung und definierten Abstand

$$Y = k \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S_Z(\lambda) \cdot F(\lambda) \cdot d\lambda \quad (4.6)$$

wobei  $k$  ein Skalierungsfaktor,  $S_Z(\lambda)$  eine experimentell erfasste spektrale Messung und  $F(\lambda)$  eine Gewichtungsfunktion ist. Die Komplexität dieser spektralen Größen, d.h. zweidimensionale interpolierte und integrierte Größen, machen eine klassische GUM-Messunsicherheitsanalyse unmöglich. Sensitivitätskoeffizienten bzw. partielle Ableitungen und Korrelationen für diese komplexen Messmodelle sind sehr schwer analytisch zu determinieren. Sofern das Messmodell außerdem nicht lineare Operationen enthält, sind höhere Terme der Taylorreihe zu berücksichtigen. In diesem Fall kommt die Monte-Carlo-Methode zum Einsatz.



**Abbildung 4.1:** Spektrale Messung einer LED zur Veranschaulichung der spektralen Messunsicherheit

Um die Messunsicherheit von spektralen Größen mit der MCM zu berechnen und zu quantifizieren, wird zunächst eine spektral aufgelöste Messung  $S_Z(\lambda)$  modelliert (s. Abbildung 4.1). Pro Wellenlänge  $\lambda_k$  werden Messwerte  $S_Z(\lambda_k)$  mit einem Array-Spektrometer erfasst. Diese Messwerte können eine Messunsicherheit sowohl bei der Bestimmung der Wellenlänge  $\lambda$  als auch bei der Erfassung des absoluten Wertes  $S_Z(\lambda)$  zeigen.

Effekte, die einen Einfluss durch Messabweichungen auf den gemessenen Spektren zeigen, werden mit Hilfe einer PDF und Standardunsicherheit charakterisiert. Diese statistische Information beschreibt den Datensatz von möglichen Werten, die diese Effekte annehmen können. Hier werden die Effekte als **zufällig** oder **systematisch** klassifiziert, je nachdem, ob eine Korrelation zwischen den zu kombinierenden Messwerten verursacht wird oder nicht. Die Korrelation zwischen den Eingangsparametern eines Messmodells wird also anhand einer Klassifizierung der Effekte in zufällige und systematische bzw. in unkorrelierte und korrelierte Effekte berücksichtigt. Zufällige Effekte beeinflussen die Eingangsparameter immer unterschiedlich, während systematische Effekte alle Eingangsgrößen gleichermaßen betreffen. Um die Korrelationen der Eingangsparameter zu berücksichtigen, wird das sogenannte **Fehlermodell** (von engl. **error model**) eingesetzt [45] [46]. Hier wird die Modellgleichung einer spektralen Messung modifiziert, um zufällige und systematische Effekte jeweils bei der Bestimmung der Wellenlänge und der absoluten Messwerte vollständig zu berücksichtigen [45]:

$$S_Z(\lambda_k) = S_w(\lambda_k + l + l_k) \cdot (1 + R) \cdot (1 + R_k) \cdot (1 + c_k x) \quad (4.7)$$

Der gemessene Wert  $S_Z(\lambda_k)$  ist der wahre bzw. reelle Wert  $S_w(\lambda_k)$ , der durch **wellenlängenunabhängige systematische** Effekte  $l$  und  $R$  und **wellenlängenabhängige zufällige** Effekte  $l_k$  und  $R_k$  modifiziert wird. Darüber hinaus gibt es eine weitere Art von systematischen Effekten, die sich im wellenlängenabhängigen Sensitivitätskoeffizient  $c_k$  zeigen. Ein Beispiel ist die zum Kalibrieren verwendete spektrale Verteilung einer Halogenlampe, die von der Stromabweichung  $x$  des vorgeschriebenen Betriebsstroms abhängig ist. Auf diese Weise werden Messabweichungsquellen und deren Korrelationen bei spektralen Messungen zugeordnet.

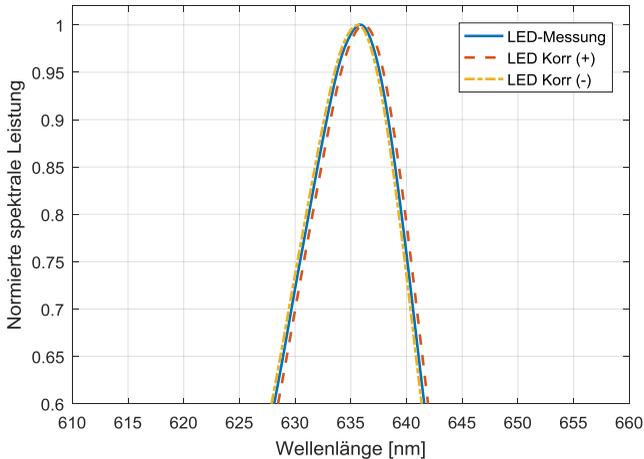
Um die Kalibrierung des verwendeten Messgerätes mit einem geeigneten Normal in das Messmodell einzubeziehen, wird das Messmodell von Gl. (4.7) mit dem sogenannten **Substitutionsmodell** von [47] und [48] erweitert:

$$E_{test}(\lambda) = \frac{S_{test}(\lambda)}{S_{ref}(\lambda)} \cdot E_{ref}(\lambda) = C_{kal} \cdot S_{test}(\lambda) \quad (4.8)$$

Der Quotient zwischen der im Kalibrierschein gegebenen spektralen Verteilung des Normals  $E_{ref}(\lambda)$  und der Messung dieses Normals mit dem zu kalibrierenden Messgerät  $S_{ref}(\lambda)$  ergibt den Kalibrierungsfaktor  $C_{kal}$ . Dieser Faktor wird verwendet, um die spektrale Messung  $S_{ref}(\lambda)$  einer Lichtquelle an ein nationales Normal zu binden. Diese zwei Messmodelle (Gl. (4.7) und (4.8)) werden mit der MCM evaluiert, um die Messunsicherheit spektraler Messungen zu bestimmen.

Eine falsche Wellenlängenkalibrierung führt zu einer systematischen Messabweichung  $l$  bzw. zu einer Verschiebung aller Wellenlängen. Als Resultat versetzt sich das gesamte Spektrum in gleicher Richtung und Ordnung für alle Wellenlängen. Dies bedeutet, dass die Wellenlängen

eine **korrelierte** Messunsicherheit zeigen. Diese Korrelation wird in der gezoomten Abbildung 4.2 des LED-Spektrums für zwei Richtungen dargestellt. Die MU der Wellenlänge kann mit der MC-Methode modelliert werden, indem die Versetzung einmal pro Simulation durchlauf zufälligerweise mit einer gegebenen PDF generiert wird.



**Abbildung 4.2:** Korrelierte Messunsicherheit der Wellenlänge in zwei umgekehrten Richtungen (rechts und links)

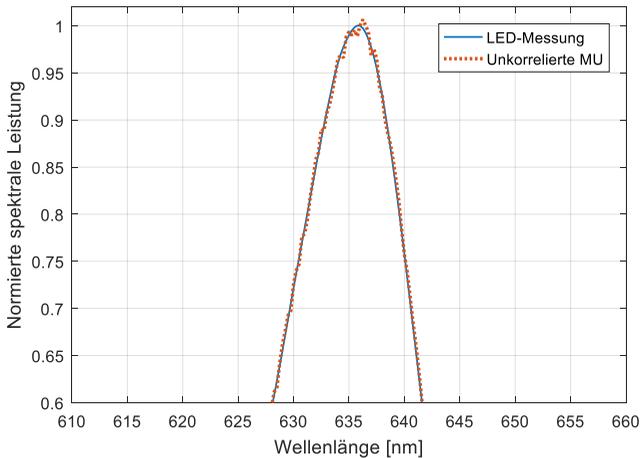
Dazu kommen noch zufällige Messabweichungen  $l_k$ , die für jede Wellenlänge unterschiedlich sind, aber im Vergleich zu den systematischen Effekten vernachlässigt werden können. Wenn ein Array-Spektrometer (ohne bewegliches optisches Gitter) verwendet wird, ist der Wellenlängenbereich beim Bau des Spektrometers definiert, sodass keine zufälligen Effekte bei der Wellenlängenkalibrierung auftreten. Im Fall eines Spektrometers mit Ausgangsspalt und rotierendem Gitter müssen zufällige Effekte bei der Wellenlängenbestimmung

berücksichtigt werden, da die Reproduzierbarkeit der Position des Gitters mitmodelliert werden muss.

Es stellt sich zunächst die Frage, mit welchem PDF und mit welcher Standardmessunsicherheit die MC-Simulation durchgeführt werden sollte. Hierzu werden Daten des Typs B bzw. die erweiterte Messunsicherheitsangabe der Wellenlänge des Kalibrierscheins des verwendeten Spektrometers eingesetzt. Mit dieser Information wird eine rechteckige Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion [49] mit Mittelwert Null und im Kalibrierschein angegebener Standardabweichung erzeugt. Für jeden Durchlauf  $M$  der MC-Simulation wird eine Zufallsgröße der Verteilung genommen und abschließend alle Wellenlängen zusammen gleichmäßig variiert.

Es bleibt nun noch, die zufälligen und systematischen Messabweichungen  $R_k$  und  $R$  bezüglich der absoluten spektralen Messwerte zu berücksichtigen. Die absolute Kalibrierung des Spektrometers mit Normlichtart A ist mit einer gewissen Messunsicherheit aufgrund der vorliegenden Umgebungsbedingungen und der vorgeschriebenen elektrischen Parameter behaftet. Das direkte gemessene Signal ergibt sich aus der Überlagerung der zur Kalibrierung verwendeten Lampenemission mit der Detektorsensitivität, der Gitterübertragungsfunktion und der Faserübertragungsfunktion, addiert mit dem Dunkelsignal des Detektors. Das Dunkelsignal kann bei einer Messung mit ausgeschalteter Lichtquelle eliminiert werden. Um das Messsignal  $S(\lambda)$  zu erhalten, werden die restlichen Effekte durch ein Referenzspektrum dividiert und bestimmt (Normlichtart A bzw. schwarzer Strahler) [8, pp. 452-456 vgl.]. Diese durch Kalibrierung verursachten systematischen Messabweichungen  $R$  werden mit dem Kalibrierfaktor  $C_{kal}$  mit entsprechender MU im Messmodell berücksichtigt. Optisches und elektronisches Rauschen am Detektor des Spektrometers erzeugt

zufällige Amplitudenveränderungen  $R_k$  bei den gemessenen Spektren. Diese sind **nicht korrelierte** Variationen, die für jede Wellenlänge unterschiedlich sind. Diese Abweichungen werden von einer Gaußverteilung [49] in Prozent der vom Hersteller gegebenen Messunsicherheit auf den aktuellen Messwert bezogen (s. Anhang A.1), wie in Abbildung 4.3 gezeigt wird.



**Abbildung 4.3:** Prozentuale unkorrelierte (zufällige) Amplitudenvariationen, bezogen auf den aktuellen Wert

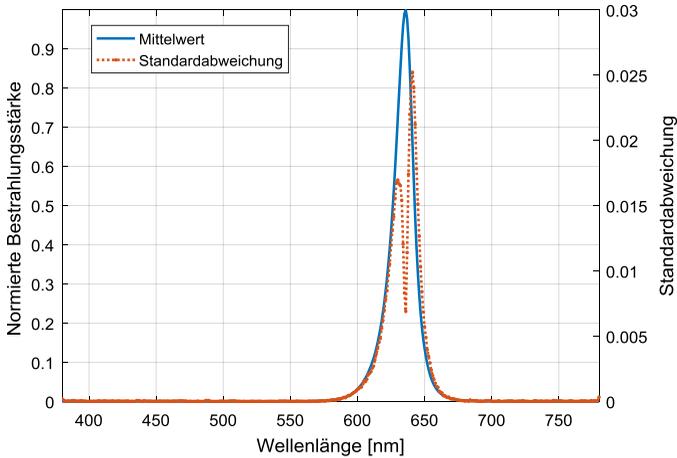
Andere systematische Effekte, wie verschiedene Abstände zwischen Lampe und Empfänger oder Strom- und Temperaturfaktoren, können in dieser Arbeit vernachlässigt werden. Der Abstand der „Detektor-Quelle“ wird während einer Messung oder zwischen Messungen nicht verändert. Da die Temperatur der LED-Quellen mit Hilfe eines Peltier-Elements ( $dT \leq 4 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$ ) und der elektrische Strom mit einer sehr stabilen und präzisen DC-Quelle während der Messung konstant gehalten werden ( $dI \leq 0,002\% I_{nom}$ ), kann ihr Beitrag zur

Messunsicherheit infolgedessen vernachlässigt werden. Auf diese Weise werden unerwünschte Phänomene, wie z.B. Änderungen des relativen spektralen Verlaufs und der Amplitude mit der Temperatur oder dem Strom verhindert. Falls diese Effekte in der Messunsicherheitsanalyse mitberücksichtigt werden sollten, würden diese systematischen Effekte nur eine wellenlängenunabhängige Skalierung aller gemessenen Werte verursachen. Bei einer Integration ist aber nur die relative spektrale Charakteristik von Bedeutung.

Sehr wichtig für die Implementierung der Messunsicherheitsanalyse ist die korrekte Auswahl der Standardmessunsicherheiten, mit denen die Wellenlänge und Amplituden in der MC-Simulation variiert werden. Spektrometerhersteller kalibrieren in der Regel die Wellenlängenskala, die spektrale Empfindlichkeit und die absolute spektrale Bestrahlungsstärke und liefern in Form eines Kalibrierscheines eine Messunsicherheit einerseits bei der Messung der Wellenlänge (typische Werte im Bereich  $\pm 0,3 \text{ nm}$ ), andererseits bei der Messung der spektralen Bestrahlungsstärke. Die Messunsicherheit der Bestrahlungsstärke kann wellenlängenabhängig sein (s. Anhang A.1 für das verwendete Array-Spektrometer) und wird in Prozent der gemessenen Werte angegeben.

Zusammenfassend werden in der Monte-Carlo-Simulation zuerst pro Durchlauf alle Wellenlängen korreliert variiert und dann die erfassten Amplituden bei jeder Wellenlänge, bezogen auf den aktuellen Wert, unkorreliert variiert. Die Angabe der Messunsicherheit wird dadurch in einen korrelierten und einen nicht korrelierten Term aufgeteilt. Nach der Durchführung der  $M$  Simulationsdurchgänge werden  $M$  virtuell gemessene Spektren generiert, die sowohl zufällig korrelierte Wellenlängenverschiebungen als auch unkorrelierte Amplitudenvariationen zeigen. Das geschätzte reelle Spektrum wird anhand des

Mittelwertes aller erzeugten Spektren bestimmt. Pro Wellenlänge wird abschließend eine Standardabweichung der gemessenen Amplituden  $S(\lambda)$  zugeordnet und damit die Standardmessunsicherheit bestimmt (s. Abbildung 4.4). Wellenlängenkorrelationen werden mit der Kovarianz der simulierten Spektren determiniert.

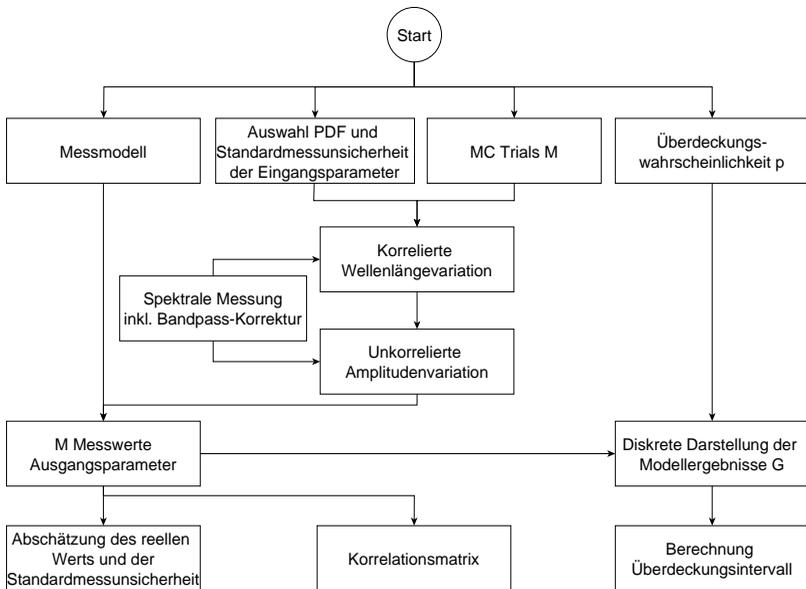


**Abbildung 4.4:** Darstellung der MC-Simulationsergebnisse

Besondere Beachtung muss sowohl auf die Art der Interpolation der spektralen Information als auch auf den Ort bei der MC-Simulation gelenkt werden. Der Ort der Interpolation bei der Simulation ist ein nicht zu vernachlässigender Aspekt, da er die Ergebnisse signifikant beeinflusst. Kalibrierdaten, wie z.B. relative spektrale Empfindlichkeiten oder Normspektralwertfunktionen, stehen nur bei wenigen Wellenlängen zur Verfügung. Für die Berechnung von spektralen Größen müssen zuerst diese Gewichtungsfunktionen mit demselben Schritt der spektralen Messungen interpoliert werden. Wenn die Interpolation nicht innerhalb der MC-Simulation betrachtet wird,

können die Messunsicherheit und Korrelationen von integralen Größen stark variieren. Je nachdem, welche Art von Interpolation verwendet wird (rechteckig, linear, parabolisch, cubic spline), ergeben sich charakteristische Korrelationen. Die spektralen Messungen werden in der Regel polynomisch (**Spline**) interpoliert, da diese glatte natürliche spektrale Charakteristiken zeigen. Eine Zusammenfassung des Durchlaufs der kompletten MC-Simulation wird in Abbildung 4.5 dargestellt.

Es gibt natürlich zusätzliche Effekte, die die erfassten Messwerte beeinflussen, wie der thermisch abhängige Dunkelstrom am Detektor oder Streulichteffekte im Messgerät. Der Dunkelstrom wird mittels thermisch stabiler Detektoren minimiert. Für die Streulichtkorrektur müssen zuerst die wellenlängenabhängigen Streulichtanteile bestimmt werden. Hier kommt ein sogenanntes „tuneable Laser“ zum Einsatz. Verschiedene praktische Methoden, um diese Korrektur durchzuführen, werden in [50], [51] und [52] beschrieben. Dies wird aber im Rahmen dieser Dissertation nicht weiter untersucht, da die Komplexität der Streulichtcharakterisierung Messgeräte und Genauigkeit eines nationalen Metrologie-Instituts oder Messgeräteherstellers benötigt. Laut Hersteller des verwendeten Array-Spektrometers wird Streulicht bei schmalbandigen LED-Messungen in der Ordnung von  $1 \cdot 10^{-4}$  und bei breitbandigen Quellen von  $5 \cdot 10^{-4}$  generiert [24].



**Abbildung 4.5:** Zusammenfassung der Messunsicherheitsanalyse von spektralen Messungen anhand MC-Simulationen

Zuletzt wird auf die Bandpassproblematik von spektralen Messungen bei LED-Quellen und deren Korrektur eingegangen. Bei Array-Spektrometern ergibt sich eine spektrale Verzerrung, die durch breitere und niedrigere LED-Spektren charakterisiert ist. Dies wird durch die Faltung zwischen dem „reellen“ LED-Spektrum und der Eingangsspaltfunktion des Spektrometers generiert [53]. Um die Eingangsspaltfunktion des Spektrometers zu bestimmen, wird ein Linienspektrum von einer Gasentladungslampe oder eines Lasers gemessen und mit einer Gauß-Funktion interpoliert. Um die Entfaltung bzw. Korrektur der spektralen Verzerrung zu beseitigen, werden verschiedene Methoden eingesetzt, wie der berühmte

Richardson-Lucy-Algorithmus [54] oder die S-S-Korrektur von Woolliams et al. [53]. Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (kurz PTB) stellt eine Implementierung in MATLAB beider Methoden, die in dieser Arbeit verwendet werden, online zur Verfügung [55].

Mit den  $M$  generierten Spektren können nun spektrale Größen mit entsprechenden Messunsicherheiten in einer weiteren Monte-Carlo-Simulation anhand eines passenden Messmodells berechnet werden. In den folgenden Abschnitten wird speziell auf die Messunsicherheit des SMCF und der Farbkoordinaten eingegangen. Die berechneten spektralen Messunsicherheitswerte werden für die Validierung der in dieser Arbeit entwickelten Messtechnik verwendet, da die physikalisch motivierten Basisspektren anhand einer spektralen Messung im Fernfeld modelliert werden. Diese simulierten Spektren werden mit spektralen Messungen unter Berücksichtigung der MU verglichen. Mehr Informationen diesbezüglich werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt.

#### 4.4.1 SPECTRAL MISMATCH CORRECTION FACTOR

Zum Gewinnen photometrischer und/oder farbmeterischer Informationen mit Hilfe von spektral integrierenden Messgeräten muss der durch optische Filterung eingeführte systematische Anpassungsfehler berücksichtigt werden. Da diese Messgeräte mit thermischen Strahlern kalibriert werden, soll insbesondere Wert auf die spektrale Anpassung vor allem beim Vermessen von LED gelegt werden. LED besitzen schmalbandige Spektren, die hohe Sensitivitätskoeffizienten in bestimmten spektralen Bereichen zeigen und dementsprechend größeren Einfluss auf die spektrale Anpassung haben. Wie in 2.1.2

bereits angeführt, wird das SMCF angewendet, um die Fehlanpassung der Realisierung einer gegebenen Gewichtungsfunktion  $F(\lambda)$  zu quantifizieren und zu korrigieren. Folgender Faktor beschreibt das Verhältnis der Bestrahlung des Empfängers mit Normlichtart A zur Bestrahlung mit einer anderen Art von Lichtquelle [10]:

$$a_F^* = \frac{S_Z}{S_A} = \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S_Z(\lambda) F_{rel}(\lambda) d\lambda / \int_{360}^{830} S_Z(\lambda) F(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S_A(\lambda) F_{rel}(\lambda) d\lambda / \int_{360}^{830} S_A(\lambda) F(\lambda) d\lambda} \quad (4.9)$$

wobei  $F_{rel}(\lambda)$  die relative spektrale Empfindlichkeit der verwendeten optischen Filterung und  $S_A(\lambda)$  der Strahlungsfunktion der Realisierung von Normlichtart A ist. Das SMCF ist als der reziproke Wert dieses Faktors definiert.

Das SMCF spielt eine bedeutende Rolle bei der in dieser Arbeit entwickelten Sensorfusionsmessmethodik, da sie für die Korrektur der relativen spektralen Empfindlichkeit der kamerabasierten Messtechniken angewendet wird. Diese Korrektur ermöglicht eine Verbesserung der absoluten erfassten Kameramesswerte durch die Anwendung des Sensorfusionsansatzes. Der Faktor enthält vier Integrale der Form von Gl. (4.6) und wird dementsprechend mit der im vorherigen Kapitel vorgestellten spektralen Modellierung durchgeführt, um deren Messunsicherheit zu bestimmen. Im Allgemeinen werden Messunsicherheiten durch eine solche Art von Korrekturen verkleinert [9]. Bei diesem spektralen Faktor sind drei mögliche Integralarten zu berücksichtigen: das Integral des Produktes zwischen zwei Definitionen, das Integral des Produktes zwischen einer Definition und einer gemessenen Größe und das Integral des Produktes zwischen zwei experimentell ermittelten Größen. Nur experimentelle Größen

verursachen einen zusätzlichen Messunsicherheitsbeitrag des SMCF, da Definitionen keine MU beinhalten.

Es verbleiben noch zwei wichtige Aspekte, die berücksichtigt werden sollen: die Art der numerischen Interpolation und der Integration. Da Herstellern normalerweise Messwerte der relativen spektralen Anpassung in nur wenigen Punkten in einem unregelmäßigen Stützstellenintervall zur Verfügung stehen, müssen Zwischenwerte mit einem passenden Wellenlängenintervall zwischen den spektralen Messungen interpoliert werden. Nach der Multiplikation der beiden in gleichen Stützpunkten interpolierten Größen wird eine numerische Integration durchgeführt. Die meist angewendete Integrationsmethode in der Literatur basiert auf der Trapezregel. Hier ergibt sich die Frage, ob der in dieser Methode eingeführte Fehler von Bedeutung ist. In der Regel kann dies vernachlässigt werden [45].

Die experimentell ermittelten spektralen Größen sollen innerhalb der Monte-Carlo-Simulation interpoliert und abschließend mit der entsprechenden Gewichtungsfunktion integriert werden, da sonst unterschätzte Messunsicherheitsbeiträge erzeugt werden. D. h., dass die gemessenen Spektren zunächst unter Berücksichtigung der systematischen und zufälligen Effekte modelliert werden müssen, bevor sie interpoliert und integriert werden. In der Arbeit von Woolliams [45] wurde gezeigt, dass der Unsicherheitsbeitrag einer spektralen Größe als Folge eines systematischen Effektes nach einer Integration unverändert gegenüber der Messunsicherheit der spektralen Messung bleibt. Die Messunsicherheit mit den zufälligen Effekten wird mit der Gewichtungsfunktion skaliert und addiert in Quadratur für alle Wellenlängen. Dies ergibt in der Regel kleinere Messunsicherheiten.

Das SMCF wird für die Korrektur der spektralen Fehlanpassung sowohl der für Validierungszwecke mit Colorimeter erfassten Farbkoordinaten als auch der mit der kamerabasierten Messmethodik gemessenen Werte verwendet.

#### 4.4.2 MESSUNSICHERHEIT FARBKORDINATEN

Wenn die spektrale Verteilung einer Lichtquelle bekannt ist, können bestimmte Farbkoordinaten zur Verteilung zugeordnet werden. Die Farbkoordinaten werden anhand der Farbwerte bestimmt, welche vom Spektrum der Lichtquelle abhängen. Für die Messung farbmetrischer Größen können verschiedene Messverfahren eingesetzt werden. Der Standard für LED-Messungen CIE S025 [9] empfiehlt für absolute Farbmessungen die Benutzung eines Spektrometers, da spektral integrierende Systeme eine mangelnde Präzision bei der Realisierung der spektralen Anpassung an einer bestimmten Gewichtungsfunktion zeigen. Andere Messmethoden werden nur akzeptiert, wenn äquivalente Messergebnisse unter Berücksichtigung der Messunsicherheit im Vergleich zur spektralen Messung erreicht werden können.

Das gemessene Spektrum wird in bestimmten Wellenlängen  $\lambda_k$  erfasst. Beim Integrieren der gemessenen Spektren  $S_Z(\lambda_k)$ , gewichtet mit den Spektralwertfunktionen für den Normalbeobachter  $\bar{x}(\lambda_k)$ ,  $\bar{y}(\lambda_k)$  und  $\bar{z}(\lambda_k)$  über einen spezifischen Spektralbereich  $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ , werden die Farbwerte  $X$ ,  $Y$  und  $Z$  gemäß den Gleichungen (2.3) berechnet. Eine Messunsicherheitsanalyse von Farbkoordinaten anhand von Monte-Carlo-Simulationen wurde von Poussel et al. [49] bereits durchgeführt. Allerdings liegt dieser Analyse ein komplexes Messmodell zugrunde, bei welchem eine Vielfalt von Parametern modelliert werden muss.

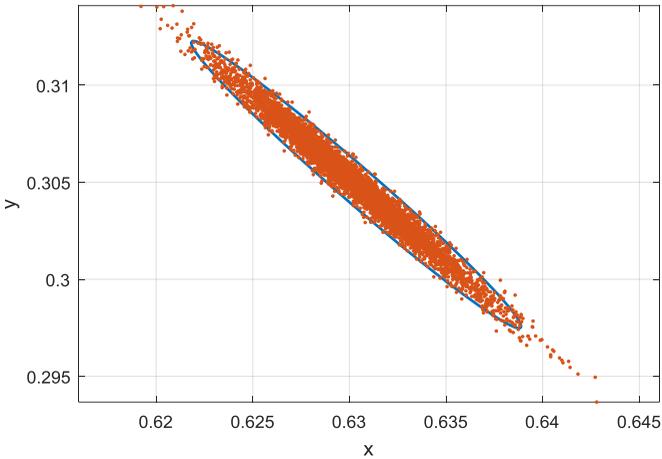
Dennoch wurden bei dieser Publikation die Eingangsgrößen als unkorreliert berücksichtigt, bzw. die Korrelationen müssen bekannt sein. Im Gegensatz dazu führten Schmähling et al. eine komplette Messunsicherheitsanalyse von spektralen Größen in [56] anhand einer Dekonvolution mit dem Richardson-Lucy-Algorithmus der spektralen Messungen und einer Kernelfunktion durch. Die Komplexität dieser Analyse liegt in der Bestimmung der Kernelfunktion, welche für normale Anwender nicht immer möglich ist, da sowohl Informationen bezüglich der Bandpass- als auch der Streulichtkorrektur notwendig sind. Außerdem müssen Korrelationsinformationen der Eingangsgrößen vorliegen, da hier nicht die Effekte, sondern die Effektenursachen modelliert werden.

In dieser Arbeit wird zur Bestimmung der Messunsicherheit der spektralen Integrale die Monte-Carlo-Methodik unter Nutzung des vorher dargestellten Fehlermodells und der Substitutionsmethode (s. Gl. (4.7) und (4.8)) durchgeführt. Die berechneten Farbkoordinaten mit den assoziierten Messunsicherheitswerten werden für Validierungszwecke mit den auf Kamera-Basis erfassten und mit dem SMCF korrigierten Farbkoordinaten verglichen. Kritik am verwendeten Fehlermodell wurde in [56] geübt, mit der Begründung, dass die Klassifizierung der Fehlerquellen in systematische und zufällige nur ein empirisches Modell sei, das je nach Applikation nicht adäquat sei. Es wird aber betont, dass dieses Modell für normale Anwender zugänglicher sei, da nur Kalibrierinformationen des Messgeräteherstellers sowie Kalibriermessungen der Wellenlänge und der absoluten Bestrahlungsstärke benötigt werden, und, dass die Ergebnisse im Vergleich mit den o.g. Publikationen äquivalent seien.

**Tabelle 4.1:** Erweiterungsfaktoren für multivariate Ausgangsgrößen (bis fünf) mit Vertrauensniveau  $p = 95\%$ .

<b>m</b>	<b>Erweiterungsfaktor <math>k(p)</math></b>
1	1,96
2	2,45
3	2,80
4	3,08
5	3,33

Im Fall der Berechnung von Farbkoordinaten ergeben sich nach der MC-Simulation drei Ausgangsgrößen  $x$ ,  $y$  und  $z$ , die Korrelationen miteinander zeigen. Hier muss die GUM-Erweiterung für mehrere Ausgangsgrößen [38] berücksichtigt werden. Für mehr als zwei Ausgangsgrößen ist das Überdeckungsintervall nicht mehr einfach visualisierbar. Da für die Farbkoordinaten nur  $x$  und  $y$  von Bedeutung sind, werden diese in einer zweidimensionalen Farbtafel dargestellt. Im Fall von bivariaten Gaußverteilungen wird eine Überdeckungsregion in der Form einer Ellipse oder eines Quadrates gebildet. Dies ermöglicht die Darstellung einer Überdeckungsregion mit einem gewissen Vertrauensniveau, normalerweise von  $p = 95\%$ . Die Erweiterungsfaktoren werden in [38] für mehrere Ausgangsgrößen bestimmt und sind in Tabelle 4.1 zu sehen.



**Abbildung 4.6:** Elliptische Überdeckungsregion für die Messunsicherheitsanalyse der Farbkoordinaten einer LED.

Zusammenfassend werden Überdeckungsregionen für die Farbkoordinaten nach der MC-Simulation in Form einer Ellipse formiert. Ein Beispiel für die Farbkoordinaten einer grünen LED wird in Abbildung 4.6 dargestellt. Hier ist die Korrelation zwischen beiden Farbkoordinaten deutlich zu erkennen. Hierfür wurde der MATLAB-Code von [57] übernommen und adaptiert.

Eine Validierung der in dieser Arbeit entwickelten kamerabasierten Farbmessungen wird anhand eines Vergleichs der mit dem SMCF korrigierten Farbkoordinaten mit den entsprechenden mit Spektrometer erfassten Farbkoordinaten unter Beachtung der Messunsicherheit, wie in [9] gefordert, durchgeführt und in Kapitel 7 beschrieben.

## Kapitel 5

# KAMERABASIERTE ORTSAUFGELOSTE FARBMESSUNG

*In diesem Kapitel wird die „klassische“ kamerabasierte Licht- und Farbmess-technik erweitert, um den kompletten Winkelraum hochaufgelöst im Fernfeld zu erfassen. Hierbei wird ein Goniometer mit Filterkameraaufnahmen eines diffus reflektierenden Schirms als Empfänger kombiniert. Die mess- und programmiertechnischen Herausforderungen dieser Messmethodik bezüglich Kalibrierung, Streulicht und Image-Merging werden diskutiert und ein zu Validierungszwecken entwickeltes multidimensionales LED-Normal vorgestellt.*

## 5.1 MESSSYSTEM

Kamerabasierte Messsysteme ermöglichen eine hochaufgelöste und schnelle Erfassung von winkelaufgelösten photometrischen und farbmtrischen Größen. Der Stand der Technik ist die indirekte Kameraaufnahme der entsprechenden Licht- und/oder Farbverteilung entweder auf einen diffus reflektierenden Schirm, wie z. B. bei [27] und [58], oder durch einen diffus lichtdurchlässigen Schirm [3] [26], welcher vom Device Under Test (DUT) von vorne oder hinten beleuchtet wird. Diese Messsysteme können jedoch nur einen begrenzten Messbereich bzw. Winkelbereich erfassen, der von der

Größe des Schirmes und des Abstands Schirm-DUT festgelegt wird. Da es sich hier um eine Fernfeldmessung handelt, bei der die Ausdehnung der Lichtquelle als Punkt betrachtet wird, muss auf die Einhaltung einer minimalen Distanz zwischen Lichtquelle und Schirm<sup>5</sup> geachtet werden. Aus diesem Grund sind die kompakten Messsysteme von [3], [26] und [27] nur für die Messung von kleinen bis mittelgroßen LED-Lichtquellen geeignet, wie z. B. LED-Chips, LED-Module und LED-Light-Engines [3], sodass es möglich ist, die komplette Verteilung der Lichtquelle mit einer einzelnen Kameraaufnahme zu erfassen. Um größere Lichtquellen, wie LED-Automobilscheinwerfer, auf dem Schirm zu fokussieren und die Lichtverteilung in einer kürzeren Distanz als bei einer normalen Fernfeldmessung zu erfassen, gibt es erste Ansätze, ein abbildendes Optiksystème zu verwenden [58]. Allerdings werden hier jedoch chromatische und geometrische Aberrationen durch die Verwendung des Linsensystems verursacht und es wird zudem nur ein Teil der Verteilung erfasst.

Lichtquellen, die über einen größeren Raumwinkel oder sogar über den kompletten Raumwinkel emittieren, wie o.g. LED-Automobilscheinwerfer und LED-Lampen für allgemeine Beleuchtung, können folglich mit den vorgestellten kamerabasierten Messsystemen nicht vermessen werden. Damit die komplette Verteilung erfasst und gleichzeitig die photometrische Grenzentfernung eingehalten wird, muss ein allgemein gültiges kamerabasiertes Messsystem und Messkonzept entwickelt werden.

---

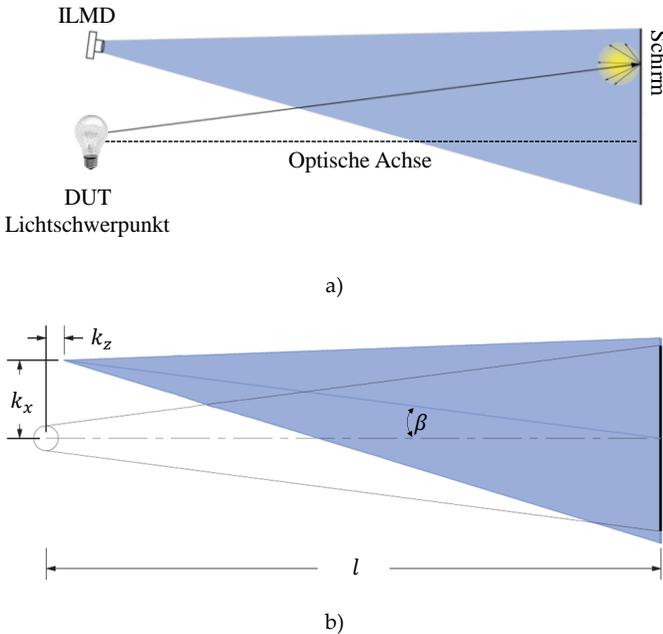
<sup>5</sup> Der Schirm dient in diesem Fall als hochauflösender Empfänger



**Abbildung 5.1:** Verwendete Goniometer mit Farbmesskamera inklusive einstellbare Befestigung

Für die Erfüllung der genannten Anforderungen wurde eine neuartige Messanlage in Zusammenarbeit mit [59] konzipiert und implementiert. Hierfür wurden die zur Verfügung stehenden scannenden Messsysteme (Goniometer und Photometer oder Colorimeter als Empfänger) erweitert. Zuerst wurde eine Farbmesskamera [60], auch „**Imaging Luminance Measurement Device**“ (ILMD) genannt, mit einer justierbaren Befestigung am Gehäuse des Goniometers montiert (s. Abbildung 5.1). Idealerweise müsste die verwendete Farbmesskamera an der Position der zu messenden Lichtquelle platziert werden, um Bildverzerrungen bei den Kameraaufnahmen des Schirmes zu minimieren. Da dies physikalisch nicht möglich ist, wurde die Farbmesskamera stattdessen auf der Höhe der optischen Achse des Messsystems, aber seitlich und nach vorne verschoben am Goniometer befestigt. Die Positionierung der Farbmesskamera relativ zum Drehpunkt des Goniometers, bei dem sich der Lichtschwerpunkt der Lichtquelle befindet, wird in Abbildung 5.2 dargestellt. Die Werte

dieser Verschiebung entsprechen ungefähr  $k_x = 125,7 \text{ cm}$ ,  $k_z = 29,48 \text{ cm}$  und  $\beta = 7,38^\circ$ . Die Position der Kamera ergibt infolgedessen eine zu korrigierende Perspektivenverzerrung.



**Abbildung 5.2:** a) Messsystemkonfiguration [59, p. 17 vgl.] und b) Positionierung der Farbkamera (ILMD) [59, p. 25 vgl.]

Zunächst wurde ein  $1,8 \text{ m}$  hoher und  $3 \text{ m}$  breiter Schirm (Holzplatte) orthogonal zur optischen Achse des Goniometers (Drehgeber) in einem Abstand  $l = 10 \text{ m}$  platziert. Der Schirm wurde durch Metallprofile und Schienen an der Decke des Messraums befestigt und außerdem mit einer weißen diffus reflektierenden und möglichst nicht wellenlängenselektiven Farbe beschichtet. Die Farbmesskamera wurde

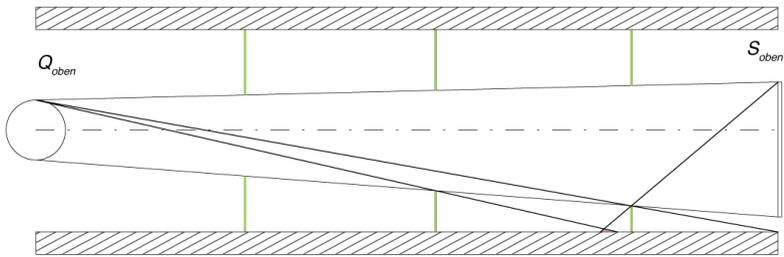
ebenfalls mit einem geeigneten Objektiv [61] ausgerüstet, welches die Aufnahme des gesamten Messbereichs mit ausreichenden Toleranzen ermöglicht. Dies bedeutet, dass Bereiche außerhalb des Schirmmessbereichs ebenfalls erfasst werden. Aus lichtmesstechnischer Sicht spielt die Position der Farbmesskamera im Messraum keine bedeutende Rolle, da die **Lambert'schen**<sup>6</sup> Reflexionseigenschaften des weißen Schirmes richtungsunabhängige und konstante Leuchtdichtewerte garantiert. Die Position der Kamera und des Schirmes werden für eine Modellierung der Kameraaufnahmen, für die notwendige Kalibrierung der Winkelkoordinaten und für die Korrektur der Perspektivverzerrung verwendet.

Das Messsystem besteht neben Goniometer, Schirm, Farbkamera und Blendensystem noch aus dem gesamten Messraum, dessen Decke, Boden und Wände, die Licht reflektieren. Idealerweise sollte dieser Messraum so groß sein, dass keine Lichtreflexionen stattfinden bzw. auf dem Empfänger detektiert werden können. Das so entstehende Lichtsignal, auch Streulicht genannt, ist alles Licht, das auf dem Empfänger gemessen wird, aber nicht direkt vom DUT kommt. Streulicht verursacht fehlerhafte Messergebnisse, da mehr Licht erfasst wird, als eigentlich vorhanden ist. Zur Streulichtunterdrückung ist die Beschichtung oder Abdeckung aller Oberflächen im Messraum mit einer matten lichtabsorbierenden Farbe bzw. einem Stoff (matt Schwarz) notwendig. Auf diese Weise wird das auf diesen Oberflächen einfallende Licht diffus und nur in der Größenordnung von 2% reflektiert. Da sich im Messraum eine große Anzahl von Messgeräten befindet, deren Lichtsignale auch vom Detektor erfasst

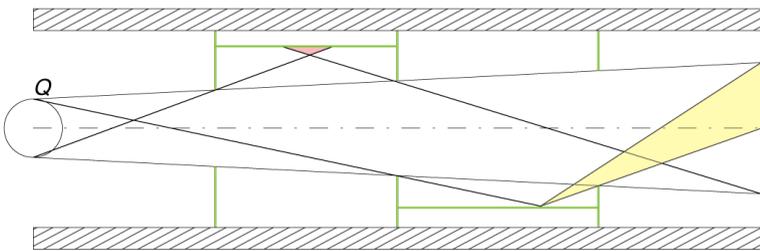
---

<sup>6</sup> Diffus reflektierende Oberfläche oder Lichtquelle, die über konstante Leuchtdichtewerte in allen Richtungen charakterisiert wird

werden können, wurde in [59] ein Blendensystem entworfen und installiert. Die Blenden bestehen in diesem Fall ebenfalls aus einem lichtabsorbierenden schwarzen Stoff und minimieren die unerwünschten Lichtreflexionen im Messraum, bevor sie auf dem weißen Schirm ankommen können. Blenden werden in dieser Arbeit also zur Trennung des Streulichtes vom eigentlichen Messsignal eingesetzt. Die Anzahl und Position der Blenden für eine optimale Streulichtunterdrückung wurde in Zusammenarbeit mit [59] simuliert und im Messraum in berechneten Positionen montiert. Das verwendete Blendensystem wird in Abbildung 5.3 dargestellt. Das komplette Blendensystem besteht aus drei Querblenden zur Minimierung der Lichtreflexionen von Boden und Decke und Seitenblenden zur Unterdrückung der Wandreflexionen. Die Querblenden dürfen das Kamerasichtfeld nicht einschränken. Die Öffnungen der Blenden wurden also unter Beachtung dieser Anforderung dementsprechend dimensioniert. Die Positionierung der Seitenblenden erzeugt ebenfalls Streulicht (s. Abbildung 5.3 b), das durch Verschiebung der Blenden weg von der optischen Achse minimiert werden kann. Alle Blenden können für eine weitere Nutzung des Messraumes anhand von Elektromotoren nach oben und nach unten gefahren werden. Außerdem wurden schwarz gestrichene Holzplatten vor den Colorimeter- und Photometer-Messköpfen befestigt, um Reflexionen an den hier montierten Sensoren zu verhindern.



a) Seitenansicht



b) Draufsicht

**Abbildung 5.3:** Installiertes Blendensystem: a) Seitenansicht mit drei Querblenden [59, p. 21] und b) Draufsicht mit den Seitenblenden [59, p. 28]

In Abbildung 5.4 wird der Messraum aus der Lichtquelleperspektive sowohl ohne als auch mit Blendensystem gezeigt. Hier ist zu erkennen, wie die Querblenden die Lichtreflexionen von Boden und Decke komplett unterdrücken. Die Blenden vor den Empfängern des scannenden Systems sind ebenfalls zu sehen. Das Blendensystem kann jedoch nur die direkten Lichtreflexionen im Messraum unterdrücken. Es bleibt noch, das Streulicht zu korrigieren, das vom Schirm in allen Richtungen diffus gestreut wird und vom Messraum dann zurück zur Schirmoberfläche reflektiert wird. Diese Streulichteffekte werden als **Rückreflexion** bezeichnet, wie z. B. die Rückreflexionen auf der

Rückseite der in Abbildung 5.4 weißen Holzplatte vor den 10 m Detektoren. Außerdem gibt es Streulichte effekte, die von der zu messenden Lichtverteilung abhängig sind. Diese werden durch direkte Beleuchtung des Raumes in der näheren Umgebung des Messschirmes verursacht. Je nachdem wie und mit welcher Intensität die zu messende Lichtquelle bestimmte Regionen bestrahlt, sind Korrekturen notwendig. Korrekturmöglichkeiten für diese beiden Effekte werden in 5.2.2 vorgestellt.



**Abbildung 5.4:** Messraum mit Schirm aus der Lichtquelleperspektive: a) ohne und b) mit Blendensystem

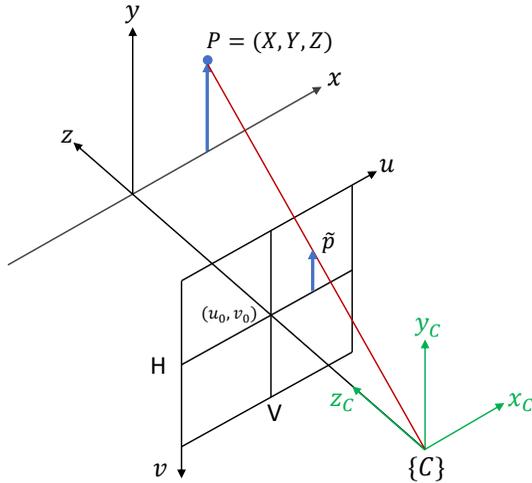
Das Gonio-Colorimeter-Messsystem wurde um eine Farbmesskamera, die ein Filterrad mit verschiedenen Bandpass-Glasfiltern für Farbmessungen besitzt, einen diffus reflektierenden weißen Schirm und ein Blendensystem für kamerabasierte Licht- und Farbverteilungsmessungen erweitert. In dieser festgelegten Konfiguration wird das DUT auf dem Fixiertisch des Goniometers platziert und der Lichtschwerpunkt des Messobjekts mit Hilfe von Kreuzlasern in den drei Freiheitsgraden  $x$ ,  $y$  und  $z$  eingestellt. Der Lichtschwerpunkt des DUT befindet sich im Koordinatensystemursprung  $(0,0,0)$  des Messsystems.

Das Goniometer kann nun das DUT in zwei Achsen rotieren lassen bzw. in den sphärischen Winkelkoordinaten  $\alpha$  und  $\beta$  wenden. Das Goniometer wird in die Startposition gefahren ( $\alpha = \beta = 0$ ) und das DUT mit der entsprechenden Stromquelle betrieben. Eine Filterkammermessung der Reflexion der Lichtverteilung auf dem Schirm wird innerhalb des festdefinierten Winkelbereichs des Messsystems aufgenommen. In Kombination mit dem Goniometer wird abschließend der gesamte Winkelraum abgefahren, um die komplette Lichtverteilung in mehreren zu kombinierenden Aufnahmen zu erfassen. Für das Zusammenfügen des Sets von Aufnahmen, auch Teil-LVKs genannt, müssen zuerst die Kamerapixelemente, die der Schirm abbildet, durch trigonometrische Beziehungen in Winkelkoordinaten umgerechnet werden. Hierfür muss die Perspektivverzerrung der Kameraaufnahmen korrigiert und die Geometrie des Messsystems vollständig definiert werden.

### 5.1.1 KAMERAMODELL: OPTISCHE PARAMETER

Obwohl der Farbmesskamerahersteller (die Fa. TechnoTeam aus Ilmenau) Softwarelösungen für die photometrische und geometrische Kalibrierung des Messsystems bietet, werden die Kalibrierungen und Koordinatentransformationen in dieser Arbeit selbst implementiert und getestet. Dies erlaubt einerseits eine komplette Kontrolle über die verschiedenen Parameter, die einen Einfluss auf die Messunsicherheit der Filterkammermessungen aufzeigen. Andererseits ist es möglich, mit der Benutzung von „Rohdaten“ ein alternatives Konzept als das des Herstellers anzuwenden, das auf einer Kameramodellierung basiert. Diese Modellierung ermöglicht die Korrektur der Perspektivverzerrung und legt den Grundstein für das Zusammenfügen der Teil-LVKs.

Die ersten beiden Schritte nach einer Kameraaufnahme in der beschriebenen Messsystemkonfiguration sind die Korrektur der Perspektivverzerrung des erfassten Kamerabildes und die nachfolgende Trennung der „**Region of Interest**“ (ROI), in diesem Fall die Schirmoberfläche, von der Umgebung (Messraum). Da die Messinformation sich in der Mitte des Bildes befindet, wird angenommen, dass keine Verzerrungseffekte der Objektivlinse korrigiert werden müssen. Für die Korrektur der Perspektivverzerrung aufgrund der Position der Farbkamera im Messraum wird das in Machine-Vision-Techniken weit verbreitete „**Central Perspective Imaging Model**“ angewendet [62]. Bei diesem Kameramodell werden die aus einem Punkt eines Objektes im „Welt“-Koordinatensystem  $\tilde{P} = (X, Y, Z)$  kommenden Lichtstrahlen auf die Bildebene der Kamera projiziert. Diese Bildebene befindet sich im gleichen Abstand vom Kamerasystemursprung  $\{C\}$  wie die Brennweite der verwendeten Objektivlinse. Alle Lichtstrahlen konvergieren in diesem Punkt, und ein nicht invertiertes Bild wird auf die Bildebene projiziert. Abbildung 5.5 zeigt, dass die z-Achse des verwendeten Koordinatensystems mit der optischen Achse der Kamera übereinstimmt und dass diese Achse die Bildebene beim sogenannten „**Principal Point**“ der Bildebene schneidet. Das verwendete CCD-Sensor-Array enthält  $1360(W) \times 1024(H)$  Pixelelemente (Verhältnis 4:3). Jedes Pixel hat eine quadratische Form mit Seitengröße von  $6,45 \mu m$ . Ein Punkt im zweidimensionalen Pixelkoordinatensystem wird durch  $\tilde{p} = (u, v)$  definiert. Durch die Anwendung von ähnlichen Dreiecken und Trigonometrie wird der Zusammenhang zwischen einem Punkt im Weltkoordinatensystem  $\tilde{P}$  und einem im Pixelkoordinatensystem  $\tilde{p}$  bestimmt [62] [63].



**Abbildung 5.5:** Zusammenhang zwischen Welt- und Pixelkoordinaten beim Kameramodell [62, p. 256 vgl. Abb. 11.5]

Wenn die **intrinsischen** Kameraparameter **Brennweite**  $f$ , **Pixelgröße**  $\rho_h$  und  $\rho_v$  und „**Principal Point**“  $(u_0, v_0)$  bekannt sind, kann das Kameramodell in homogenen Koordinaten in der allgemeingültigen Matrixform wie folgt geschrieben werden [62]:

$$\tilde{p} = \begin{bmatrix} f/\rho_w & 0 & u_0 \\ 0 & f/\rho_h & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & t_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \tilde{P} \quad (5.1)$$

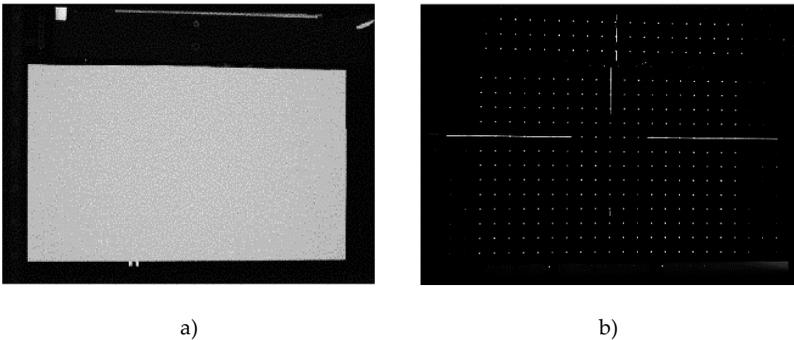
wobei die letzte Matrix die sogenannten **extrinsischen** Parameter der Kamera modelliert, welche eine dreidimensionale Veränderung der Position der Kamera als eine **homogene Transformation** beschreibt. Eine Bewegung der Position der Kamera in Bezug auf das Weltkoordinatensystem wird anhand von **Rotationen**  $R$  und **Translationen**  $t$  in

$R^3$ , die auf jeder der drei Achsen oder in einer Kombination von ihnen auftreten können, beschrieben.

Eine **planare Homographie**  $H$  ist eine geometrische Matrixtransformation von Punkten auf einer Bildebene. Die Homographie transformiert die Pixelkoordinaten des Bildes, aber nicht deren Werte, indem sie die Position der Kamera ändert [63] [64]. Mit diesem mathematischen Werkzeug ist es möglich, die Elemente der letzten Matrix aus Formel (5.1) zu bestimmen und damit die verschobene Kameraposition relativ zum Lichtschwerpunkt des DUT zu korrigieren. Damit wird die Perspektivenverzerrung auf den erfassten Kamerabildern entfernt [65]. Die Parameter der Gleichung (5.1) sind in der Praxis unbekannt und sollten idealerweise über eine Kalibrierung mit einem „3-D calibration target“ mit der entsprechenden Messunsicherheit bestimmt werden [62]. Dies überschreitet jedoch den Rahmen dieser Arbeit. Stattdessen werden für die Anwendung von Gleichung (5.1) die Parameterwerte der Brennweite und der Pixelgröße vom Datenblatt des Herstellers des CCD-Chips (Sony ICX285AL) angenommen [66].

Das verwendete Kameraobjektiv ist laut Hersteller durch eine Brennweite  $f = 25 \text{ mm}$  charakterisiert. Da der Goniometer-Tisch einen Laser-Pointer im Drehzentrum des Goniometers besitzt, wird der „Principal Point“ durch Rotation des Tisches und nachfolgende Projektion dieses Punktes auf dem Schirm definiert. Eine Analyse der Kameraaufnahme ermöglicht die Bestimmung des Punktes  $(u_0, v_0)$ , der mit der optischen Achse der Lichtquelle und Kamera übereinstimmt. Alternativ kann ein geometrisches Normal in Form einer Laser-Matrix auf dem Goniometer eingestellt und fixiert werden, um die optische Achse des Systems auf dem Schirm zu finden. Da die Position der Kamera gegenüber dem Drehpunkt des Goniometers ungefähr bekannt ist, kann die Position der Kamera bestimmt und

korrigiert werden. Die Position ist durch zwei Translationen in den  $x$ - und  $z$ -Achsen ( $k_x = 125,7 \text{ cm}$  und  $k_z = 29,48 \text{ cm}$ ) definiert. Da die Kamera zur optischen Achse des Systems ausgerichtet ist, kann die Rotation der  $y$ -Achse berechnet werden. Diese beträgt  $\beta = 7,38^\circ$ . Die Genauigkeit dieser Werte hängt von der korrekten Messung beider Translationen und der Ausrichtung der Kamera zur optischen Achse ab. In Abbildung 5.6 ist die verzerrte Kameraaufnahme des Schirmes und der verwendeten Laser-Matrix zu sehen.



**Abbildung 5.6:** a) Verzerrte Kameraperspektive und b) projizierte Laser-Matrix zur Bestimmung der optischen Achse

Ein großer Vorteil von planaren Homographien ist, dass sie nacheinander angewendet werden können, indem die entsprechenden Matrix-Transformationen der Position in der richtigen Reihenfolge multipliziert werden. Die Reihenfolge der Transformationen ist vor allem bei Rotationen wichtig. Die Matrix-Transformationen für eine Rotation der entsprechenden Achse um  $\theta$  sind wie folgt definiert [62, p. 27]:

$$\begin{aligned}
 R_x(\theta) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \\
 R_y(\theta) &= \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \\
 R_z(\theta) &= \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

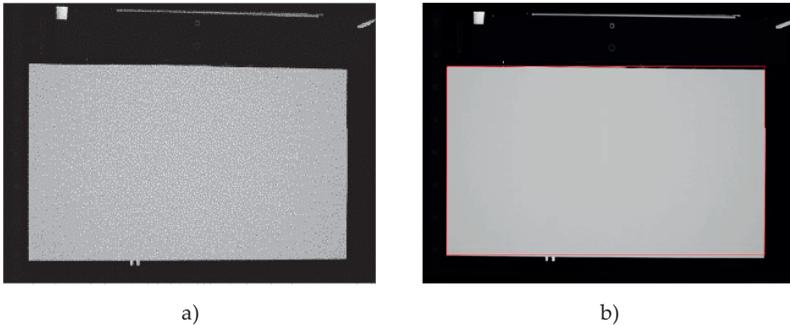
Und die Translationen:

$$t_x = \begin{bmatrix} x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad t_y = \begin{bmatrix} 0 \\ y \\ 0 \end{bmatrix}; \quad t_z = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ z \end{bmatrix} \tag{5.3}$$

Für die Korrektur der Perspektivenverzerrung der Kameraaufnahmen werden also drei Matrix-Transformationen notwendig, die in homogenen Koordinaten in der letzten  $4 \times 4$  Matrix der Gleichung (5.1) eingetragen werden. Das Endergebnis dieser Transformation ist dann:

$$\begin{aligned}
 H &= t_x \cdot t_z \cdot R_y \\
 H &= \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & k_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & k_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

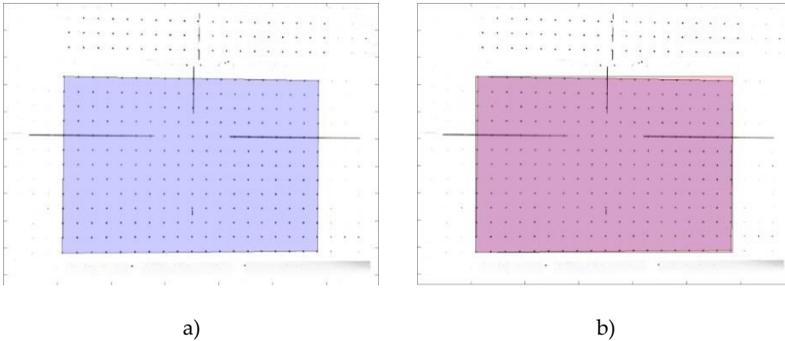
Alle Pixelelemente der verzerrten Kameraaufnahme werden folglich mit der **Inverse** dieser Matrix entzerrt, indem die korrigierten Pixelkoordinaten mit Formel (5.1) bestimmt und interpoliert werden. Die Ergebnisse dieser Korrektur werden in Abbildung 5.7 gezeigt. In b) ist zu erkennen, dass die Position der Kamera nicht vollständig korrigiert wurde (s. rote Linie). Der Grund dafür ist, dass die Translationen und die daraus resultierenden Rotationswinkel auf nicht ausreichend präzisen Messungen beruhen.



**Abbildung 5.7:** Kameraperspektive: a) verzerzte und b) korrigierte Kameraaufnahme mit der Transformation von Formel (5.4).

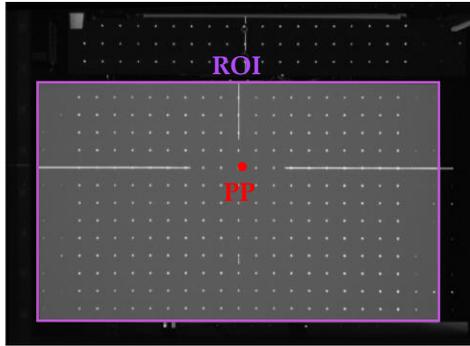
Da das Prinzip von planaren Homographien anhand des vorherigen Beispiels erklärt wurde, wird eine Berechnungsvariante für eine genauere Bestimmung der Transformationsmatrix  $H$  vorgestellt. Für die Berechnung der Transformationsmatrix müssen mindestens acht Punkte bzw. Pixelkoordinaten bekannt sein: vier beim verzerzten Bild und vier beim korrigierten Bild. Für die ersten vier Punkte können z. B. die Ecken des abgebildeten Schirmes oder von der Laser-Matrix (s. Abbildung 5.8 a) ausgewählt werden. Die Auswahl kann entweder manuell oder anhand eines Algorithmus durchgeführt werden. Für die vier Punkte des korrigierten Bildes werden die Extrema der vorher bestimmten Eckpunkte genommen, um ein Rechteck zu definieren (s. Abbildung 5.8 b). Nun wird die Homographie-Matrix  $H$  bestimmt, die beide Sätze der Punkte  $p_1$  und  $p_2$  anhand der Gleichung (5.5) verbindet. Für diese und alle weiteren homographischen Berechnungen wird die frei verfügbare und für unsere Anwendung entsprechend angepasste MATLAB-Toolbox von [62] angewendet.

$$p_2 \cong H \cdot p_1 \quad (5.5)$$



**Abbildung 5.8:** Homographie-Bestimmung anhand von acht Punkten: a) vier Ecken Laser-Matrix und b) Rechteck-Punkte

Mit der berechneten Homographie können die Translationen und Rotationen, die für die Pixelkoordinatentransformation zwischen den Punktsätzen nötig sind, bestimmt werden: Translation von  $t_x = 119 \text{ cm}$ ,  $t_y = 30 \text{ cm}$  und  $t_z = 25 \text{ cm}$  und Rotationen um  $R_x = 1,66^\circ$ ,  $R_y = -6,8^\circ$  und  $R_z = 0,37^\circ$ . Diese Ergebnisse zeigen, dass die verwendete Kamerabefestigung auch eine leichte Verkippung der  $x$ - und  $z$ -Achse aufweist und dass die Höhe entsprechend der Höhe der optischen Achse eingestellt wurde. Die Ergebnisse dieser Korrektur sind in Abbildung 5.9 mit dem „Region of Interest“ (ROI) und „Principal Point“ (PP) bzw. der optischen Achse (OA) dargestellt.



**Abbildung 5.9:** Entzerrte Schirmaufnahme, bei der die „Region of Interest“ und „principal point“ festgelegt sind

### 5.1.2 GEOMETRIE

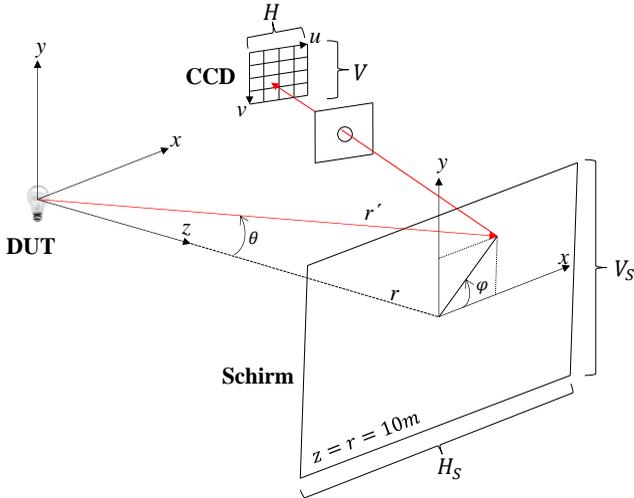
Nach der Entzerrung der Kameraaufnahme und Trennung des ROIs ist es nun möglich, die Pixelkoordinaten  $(u, v)$  auf dem Bild in für photometrische Größen üblichen sphärischen Koordinaten  $(\theta, \varphi)$  auf dem Schirm umzurechnen. Zu diesem Zweck werden die Konzepte von [26] eingesetzt, um die sphärischen Koordinaten jedes Pixels mit den Gleichungen (5.6) und (5.7) zu bestimmen:

$$\varphi_{uv} = \tan^{-1} \left[ \frac{m_H \cdot (v_0 - v)}{m_V (u_0 - u)} \right]. \quad (5.6)$$

$$\theta_{uv} = \tan^{-1} \left[ \frac{1}{r} \cdot \sqrt{\frac{(u_0 - u)^2}{m_H^2} + \frac{(u_0 - v)^2}{m_V^2}} \right] \quad (5.7)$$

wobei  $m_H = H/H_s$  und  $m_V = V/V_s$  die Kameravergrößerung in horizontale und vertikale Richtung beschreiben, mit  $H \times V$  die aufgenommene entzerrte ROI der Kameramessung in Pixel und  $H_s \times V_s$  die Größe des Schirmes in Metern. Der Punkt  $(u_0, v_0)$

entspricht hier der optischen Achse des Systems in Pixel und  $r$  entspricht der Distanz zwischen dem Schirm und dem Lichtschwerpunkt des DUT [65]:



**Abbildung 5.10:** Beziehung zwischen den Pixel-, Kugel- und kartesischen Koordinaten für einen schematischen Strahl

Nach der Bestimmung der geometrischen Information des Messsystems ergibt sich der Messbereich, der mit einer einzelnen Kameraaufnahme des Schirms erfasst werden kann. In der vertikalen Richtung ist es möglich, Messwerte zwischen  $[-6,5^\circ ; 3,5^\circ]$  und in der horizontalen Richtung zwischen  $[-8,5^\circ ; 8,5^\circ]$  bzw.  $10^\circ \times 18^\circ$  zu erfassen. Mithilfe der berechneten Winkelinformation werden die mit der Filterkammermessung erfassten Werte in einer Licht- bzw. Farbverteilung  $X(\theta, \varphi)$ ,  $Y(\theta, \varphi)$ , und  $Z(\theta, \varphi)$  umgerechnet. Die Methodik wird im Folgenden beispielsweise für den  $Y$ -Kanal beschrieben. Eine Filterkammermessung erfasst **Leuchtdichtewerte** einer Lichtquelle, wenn der verwendete

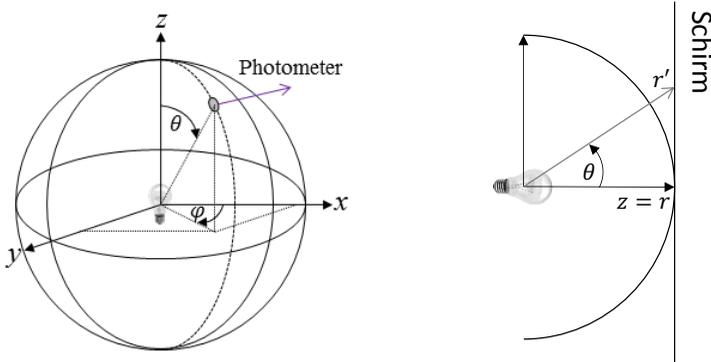
optische Filter der spektralen Charakteristik der  $V(\lambda)$  entspricht. Ist die geometrische Information des Systems bekannt, werden im nächsten Schritt die erfassten Leuchtdichtewerte  $L(\theta, \varphi, r')$  zunächst in **Beleuchtungsstärke** und schließlich in **Lichtstärkewerte** umgerechnet. Unter Berücksichtigung der Lambert'schen Reflexionseigenschaft des Schirmes und der Tatsache, dass der Schirm Licht in eine Raumwinkelhalbkugel reflektiert, können die Beleuchtungsstärkemesswerte  $E(\theta, \varphi, r)$  berechnet werden:

$$E(\theta, \varphi, r) = \frac{L(\theta, \varphi, r') \cdot \pi \cdot \Omega_0}{\rho} \quad (5.8)$$

wobei  $\rho$  der Mittelwert des gemessenen spektralen Reflexionsgrads des Schirms und  $r'$  der Abstand zum Messpunkt vom Messobjekt ist. Der Faktor  $\rho$  beschreibt die Menge an Licht, die auf dem Schirm absorbiert wird bzw. die Verluste aufgrund der Reflexion. Eine Alternative zur Korrektur dieser Verluste ist die Messung eines Normals. Der Korrekturfaktor wird in diesem Fall durch Vergleich zwischen den „Soll“- und „Ist“-Messwerte bestimmt. Während konventionelle Methoden die Licht- und Farbverteilung auf einer Kugeloberfläche messen, wird bei kamerabasierten Techniken eine Strahlprojektion auf der ebenen Oberfläche des Schirms gemessen (s. Abbildung 5.11) [65]. Infolgedessen ist hier eine geometrische Transformation bei der Umrechnung von Beleuchtungsstärke in Lichtstärke anhand der photometrischen Entfernungsgesetzt notwendig [3] [26] [27]:

$$I(\theta, \varphi) = \frac{E(\theta, \varphi, r')}{\cos^3 \theta \cdot k_p(\theta, \varphi)} \cdot r^2 \quad (5.9)$$

wobei  $k_p(\theta, \varphi)$  ein richtungs- bzw. raumabhängiger Korrekturfaktor ist, der die räumlichen Reflexionsdifferenzen des Schirms betrachtet. Wie dieser Faktor bestimmt wird, wird in 5.2.3 beschrieben.



**Abbildung 5.11:** Projektion eines Kugelpunkts auf dem Schirm, notwendig für indirekte Farbverteilungsmessungen

Im Fall von kamerabasierten Messungen mit einer spektralen Anpassung an der  $V(\lambda)$  Funktion bzw.  $\bar{y}(\lambda)$  entsprechen  $I(\theta, \varphi)$  die Farbwerte  $Y(\theta, \varphi)$ . Diese Umrechnungsmethodik wird wiederholt für die winkelabhängige Bestimmung der restlichen Farbwerte  $X(\theta, \varphi)$  und  $Z(\theta, \varphi)$ , entsprechend der optischen Filter bei den Kameramessungen verwendet werden.

### 5.1.3 IMAGE-MERGING

Wenn die zu messende Licht- oder Farbverteilung einer Lichtquelle größer als der vom Messsystem festgelegte Winkelmessbereich ( $18^\circ \times 10^\circ$ ) ist, werden mehrere Kameraaufnahmen mit

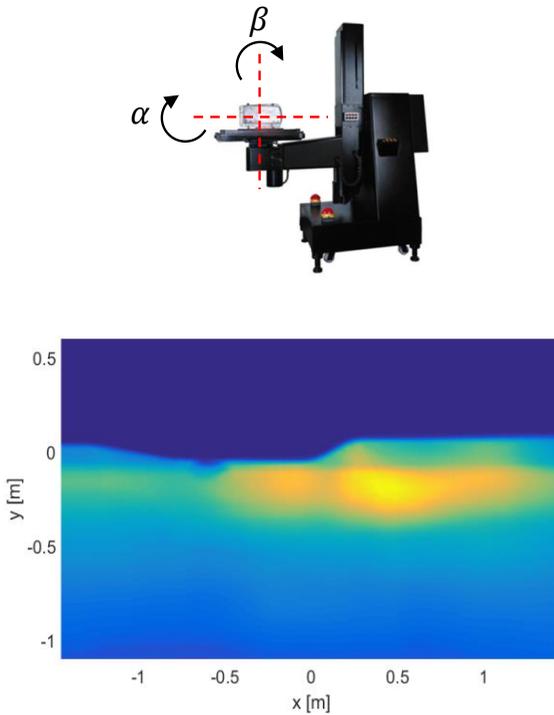
unterschiedlichen Blickwinkeln zwischen Messobjekt und Schirm erfasst, indem die Achse des Goniometers gesteuert wird. Die daraus resultierenden Kameraaufnahmen müssen nun zu einer vollständigen Verteilung zusammengefügt werden. Dieses Verfahren wird in dieser Arbeit als „**Image-Merging**“ bezeichnet und wird im Folgenden theoretisch erklärt.

Für eine bessere Darstellung des Verfahrens werden drei Kameramesungen eines LED-Automobilscheinwerfers zusammengefügt. Das verwendete Goniometer vom Typ A ist imstande, zwei Achsen bzw. die Winkel  $\alpha$  und  $\beta$  zu rotieren (s. Abbildung 5.12). Infolgedessen ist hier eine Anpassung zwischen beiden Systemen nötig, indem  $\alpha$  die Werte der berechneten horizontalen  $\theta$ -Achse und  $\beta$  die Werte der vertikalen  $\theta$ -Achse annehmen. Da alle Punkte des weißen Schirms sich beim globalen kartesischen Koordinatensystem in einer Entfernung  $z = 10\text{ m}$  befinden, werden die fehlenden Koordinaten  $x$ ,  $y$  und  $r'$  mit den Gleichungen (5.10) bestimmt. Hier ist eine zusätzliche Drehung um  $90^\circ$  der horizontalen Achse (Typ C in Typ A Goniometer) nötig:

$$\begin{aligned}x &= r' \cdot \cos(90^\circ - \alpha) \\y &= r' \cdot \cos(90^\circ - \alpha) \cdot \sin(\beta) \\z &= r' \cdot \sin(90^\circ - \alpha) \cdot \cos(\beta) = 10\text{ m}\end{aligned}\tag{5.10}$$

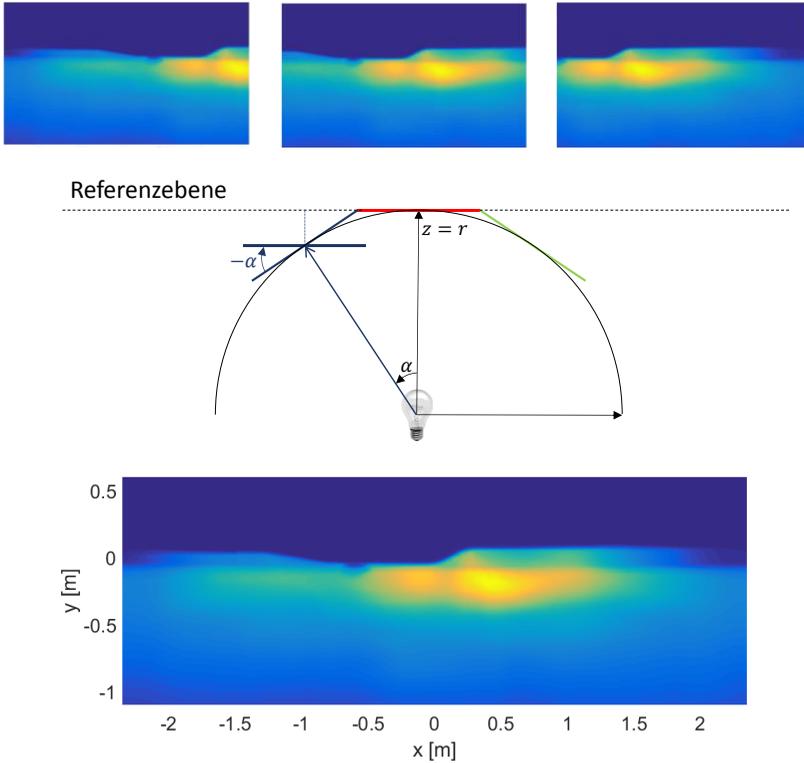
mit

$$r' = \frac{10\text{ m}}{\sin(90^\circ - \alpha) \cdot \cos(\beta)}\tag{5.11}$$



**Abbildung 5.12:** Verwendete Goniometer (oben) [67] und Filterkameraaufnahme (Y) eines LED-Automobilscheinwerfers in der (0,0) Goniometerposition (unten)

Da sich aus den in 5.1.2 berechneten Reihen von Winkelkoordinaten keine gleichabständigen Pixelpositionen aufgrund der Projektionsverzerrung ergeben, wird nach den o.g. Umrechnungen eine „**scattered**“ Interpolation durchgeführt. Diese liefert Messpunkte in gleichen Abständen im  $(x, y)$  kartesischen Koordinatensystem, welche für die spätere Kombination der Teil-LVK notwendig sind.



**Abbildung 5.13:** Perspektivenkorrektur anhand von Homographien

Zunächst werden die notwendigen Kameraaufnahmen erfasst, indem die Position des Goniometers in zwei mögliche Richtungen bzw. Winkel  $\alpha$  und  $\beta$  verstellt wird. Dies ergibt eine Reihe von Aufnahmen, welche sich in verschiedenen Bildebenen befinden und deshalb Perspektivendifferenzen aufzeigen. Die relative Bewegung der Lichtquelle relativ zum Schirm kann als eine Veränderung der Position der Kamera betrachtet werden. Da die Rotationswinkel der einzelnen Kameraaufnahmen bekannt sind, können die Elemente der

Homographie-Matrix  $H$  direkt berechnet werden, um diese Perspektivendifferenzen zu korrigieren. Die Transformation wird mit Rotationen der entsprechenden  $x$ - oder  $y$ -Achse in Gegenrichtung durchgeführt, um perspektivisch korrigierte Aufnahmen in Bezug auf eine Referenzebene zu erhalten. Dies entspricht einem Verfahren zur Erzeugung von Panorama-Bildern [63]. In Abbildung 5.13 ist das komplette Verfahren mit drei Aufnahmen des LED-Automobilscheinwerfers schematisch und mit Kameramessungen dargestellt. In diesem Fall wurde das Goniometer mit  $\alpha = \pm 5^\circ$  rotiert, um die seitlichen Aufnahmen des Automobilscheinwerfers zu erfassen. Diese Werte von  $\alpha$  werden für die Rotation der Kamera um die  $y$ -Achse in Gleichung (5.2) verwendet. Auf diese Weise wird die benötigte Transformation-Matrix bestimmt.

Für eine vollständige Projektion der Kameraaufnahmen auf die Referenzebene ist außerdem eine Translation in die  $z$ -Achse nötig. Der Betrag dieser Translation ist durch Trigonometrie zu bestimmen. Eine Interpolation in zwei Dimensionen ist auch nach Anwendung der Homographie notwendig, damit ein konstantes Raster von Punkten bzw. Koordinaten erreicht wird. Diese werden benötigt, um die Reihe der korrigierten Bilder zu kombinieren, indem nach gemeinsamen Koordinaten zwischen den Bildern gesucht wird. Die komplette Lichtverteilung mit den kombinierten Aufnahmen ist in Abbildung 5.13 (unten) ebenfalls dargestellt. Als Alternative zur Perspektivenverzerrung durch Projektion der Teil-LVKs auf einer Hauptebene können die einzelnen Kameraaufnahmen auf eine Kugeloberfläche projiziert werden, wie dies bei scannenden Messsystemen der Fall ist. Hier ist aber eine komplexere dreidimensionale Interpolation notwendig, um gemeinsame Koordinaten zwischen den

Bildern zu finden. Dennoch sind beide Darstellungsformen gleichwertig und können ineinander transformiert werden.

In diesem Teil der Arbeit wurde eine Methode zur Messung von Licht- und Farbverteilungen über den gesamten Raumwinkel vorgestellt, indem die Kameraaufnahmen eines Testobjekts mit verschiedenen Blickwinkeln durch Rotation eines Goniometers kombiniert werden. Um jedoch mit dem vorgestellten Verfahren optimale Ergebnisse in Bezug auf scannende Methoden zu erzielen, sind zusätzliche Korrekturen erforderlich.

## 5.2 KORREKTUREN

Das vorgestellte Messsystem für kamerabasierte Licht- und Farbverteilungsmessungen ist von charakteristischen systematischen Effekten überlagert, die eine direkte Auswirkung auf die erfassten Messwerte aufzeigen. Die Messergebnisse können folglich verbessert werden, indem räumliche Streulichtabhängigkeiten erkannt und korrigiert werden. Hier sollten auch die heterogenen Reflexionscharakteristiken des Messschirmes berücksichtigt werden.

Die spektrale relative Anpassung bei kamerabasierten Messsystemen spielt eine bedeutende Rolle bei der Genauigkeit der absoluten erfassten Werte, da die praktische Realisierung dieser Anpassung nicht optimal von einzelnen Bandpass-Glasfiltern erreicht wird. In den folgenden Abschnitten werden diese systematischen Effekte und entsprechende Korrekturmöglichkeiten vorgestellt.

### 5.2.1 ABSOLUTE MESSWERTE

Eine Kameraaufnahme von der Reflexion eines Beleuchtungssystems auf dem weißen Schirm ist eigentlich ein hochauflösendes Photometer bzw. Colorimeter. Der Schirm dient hier als Beleuchtungsstärke-Detektor. Wie alle Messgeräte muss das kamerabasierte Messsystem kalibriert werden, um die Erfassung von korrekten Messgrößen unter Berücksichtigung der Messunsicherheit zu garantieren. Für die absolute Kalibrierung des vorgestellten Messsystems wird eine **Lichtstärkenormallampe** verwendet. Das Normal wird auf dem Goniometer platziert und auf den Schirm, wie im Kalibrierschein beschrieben, ausgerichtet. Eine Kameraaufnahme mit dem optischen Filter, der die spektrale Anpassung an die  $V(\lambda)$  Funktion entspricht, wird erfasst. Anhand des photometrischen Entfernungsgesetzes werden zunächst mit Gleichungen (5.8) und (5.9) die erfassten Leuchtdichtewerte in Lichtstärkewerte umgerechnet. Der Kalibrierschein liefert den Lichtstärkewert der Lampe in einer definierten Richtung und unter vorgeschriebenen Betriebsbedingungen. Dies entspricht dem sogenannten „Soll-Messwert“. Die Messung des Normal mit dem kamerabasierten Messsystem entspricht dem „Ist-Messwert“. Durch den Vergleich dieser Werte wird ein Kalibrierungsfaktor berechnet.

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung des Kalibrierfaktors ist der Vergleich von Kameramessungen mit den Messwerten eines kalibrierten Photometers: das Normal oder eine bekannte und stabile Lampe (normalerweise ein thermischer Strahler) wird mit beiden Messgeräten gemessen und die Messergebnisse in Lichtstärke umgerechnet. Hier ergibt sich ebenfalls durch Vergleich ein Korrekturfaktor. Die spektrale relative Empfindlichkeit bzw. die Fehlanpassung beider Arten von

Messgeräten an das Normal sollte in diesem Fall berücksichtigt werden [68]. In dieser Arbeit wird eine Punktmessung des kalibrierten Colorimeters als Referenzwert der kamerabasierten Messungen verwendet. Auf diese Weise wird eine Kopplung zwischen beiden Messgeräten durchgeführt.

Für Korrektur und Quantifizierung der spektralen Fehlanpassung an eine Gewichtungsfunktion wird aufgrund der praktischen Realisierung der optischen Filterung des photosensitiven Empfängers das „spectral mismatch correction factor“ eingesetzt. Für kamerabasierte Messungen benötigt das SMCF einen Sensorfusionsansatz, der in Kapitel 6.1 vorgestellt wird und ein Hauptbestandteil dieser Arbeit ist.

### 5.2.2 STREULICHT

Das entwickelte Messsystem besteht aus einem gesamten Raum, der ca. 10 m lang und 5 m breit ist. Die verwendete Farbkamera mit dem entsprechenden Objektiv „sieht“ den gesamten Messraum und nicht nur den weißen Schirm. Aus diesem Grund ist das kamerabasierte Messsystem sehr empfindlich gegenüber Streulicht. Für die Streulichtunterdrückung dient vor allem das vorgestellte Blendensystem, das aus Quer- und Seitenblenden besteht. Obwohl dieses System die sehr kritischen Boden- und Wandreflexionen minimiert, werden höhere Messsignale in der Größenordnung zwischen 1,5 und 2% erfasst. Wie können sich diese Differenzen erklären? Die Hypothese ist, dass der Messraum in allen Richtungen diffus streut. Das Blendensystem schattet jedoch nur die direkten Reflexionen im Messraum ab, die von der Lichtquelle Richtung Schirm abstrahlen. Diese Unterdrückung von direkten Reflexionen wird als

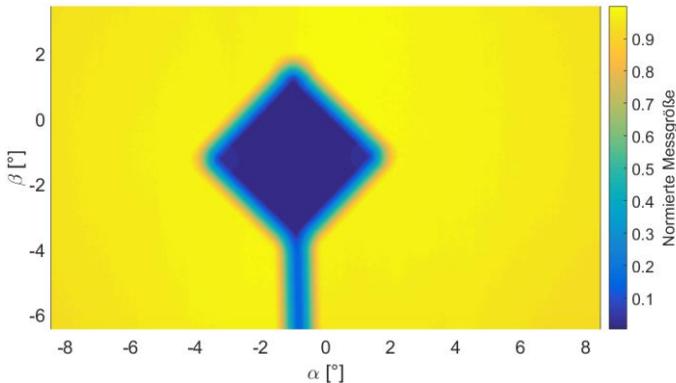
**primär** bezeichnet. Ohne Blendensystem würden Streulichteffekte bis zu 10 % des Messsignals auftreten [69].

Es gibt jedoch **sekundäre** Streulichteffekte. Hierbei kann zwischen **zwei Streulichtquellen** unterschieden werden. Die **erste** Streulichtquelle resultiert aus direkter Beleuchtung der Elemente des Blendensystems, wie z. B. die nicht optimal platzierten Seitenblenden aufgrund von Platzeinschränkungen oder aufgrund der Blenden, die sich um dem Goniometer herum befinden. Wenn auch idealerweise alle Elemente im Raum mit schwarz absorbierendem Stoff bedeckt sind, gibt es kein perfektes Schwarz. Der verwendete Stoff reflektiert ca. 2% des einfallenden Lichtes. In Abhängigkeit der Strahlcharakteristiken der zu messenden Lichtquelle wird der Messraum unterschiedlich beleuchtet. Teil dieses reflektierten Lichtes strahlt in Richtung der Messwand und verursacht folglich Streulichteffekte bei den Kameramessungen. Diese werden in dieser Arbeit als **Messraum-Streulichteffekte** bezeichnet. Die **zweite** Streulichtquelle kann darauf zurückgeführt werden, dass der  $3\text{ m} \times 1,8\text{ m}$  große Schirm hoch reflektierend ist und das einfallende Licht Richtung Messraum zurückreflektiert. Der Schirm reflektiert diffus in alle Richtungen, was bedeutet, dass nicht nur die Kamera das Licht empfängt, sondern auch der gesamte Messraum beleuchtet wird. Besondere Aufmerksamkeit muss hier auf die Rückseite der verwendeten Querblenden gelegt werden, um auszuschließen, dass sie reflektierenden Stoffe oder Farben enthalten. Diese Effekte werden als **Rückreflexion-Streulichteffekte** bezeichnet.

Wenn die Annahme, dass der Raum in allen Richtungen gleichmäßig reflektiert, korrekt ist, können die **Messraum-Streulichteffekte** mit einem Offset korrigiert werden. Für die Bestimmung dieses Offsets wird ein isotroper Strahler, wie z. B. eine mattierte Glühlampe,

verwendet, der den gesamten Messraum beleuchtet. Zunächst wird der **gesamte** Schirm mit einer geeigneten Blende abgedeckt und eine Kameraaufnahme der Messwand erfasst. Anhand des Verhältnisses zwischen den erfassten Messsignalen mit und ohne Abdeckung wird die prozentuale Abweichung aufgrund des Messraum-Streulichtes bestimmt. Hier ergeben sich Abweichungen im Mittelwert von ca. 0,4 %. Betont werden muss, dass diese pauschale Korrektur nur für einen isotropen Strahler gültig ist. Im Fall von gerichteten Lichtquellen wie Spots, ergeben sich niedrigere oder vernachlässigbare Korrekturen, da der Messraum nur teilweise oder sogar nicht beleuchtet wird. Die Streulichtantwort des Messraumes ist also stark von der Verteilung der zu untersuchenden Lichtquelle abhängig. Der berechnete Korrekturfaktor ist ein „**worst case**“ Szenario und beschreibt die maximalen Abweichungen, die sich ergeben könnten. Wenn anstatt eines isotropen Strahlers eine Lichtquelle, die nur im Halbraum leuchtet, gemessen wird, ergibt sich logischerweise ein Offset von 0,15%, da in diesem Fall nur die Hälfte des Messraumes beleuchtet wird. Es können sich jedoch raumabhängige Streulichteffekte ergeben, die stattfinden, wenn ein bestimmter Bereich im Messraum direkt von der Lichtquelle beleuchtet wird. In diesem Fall ist eine allgemeine Offset-Korrektur nicht ausreichend, da auf der abgedeckten Schirmoberfläche ortsabhängige Streulichtsignale zu berücksichtigen sind. Dies ist vor allem wichtig, wenn verschiedene Kameraaufnahmen einer Verteilung für das Image-Merging-Verfahren erfasst werden. Bei der Bewegung des DUT mit dem Goniometer werden bestimmte Bereiche im Messraum direkt beleuchtet, die in manchen Fällen nicht vernachlässigbare Streulichteffekte verursachen. Diese können durch die kamerabasierte Aufnahme des komplett abgedeckten Schirmes für jede Position des Goniometers korrigiert werden. Diese positionsabhängige Korrektur verdoppelt die Anzahl

der benötigten Kameramessungen. Es wird gezeigt, dass diese spezielle Korrektur nur für leistungsstarke und ausgerichtete Lichtquellen eine Verbesserung der erfassten Messwerte mit sich bringt.



**Abbildung 5.14:** Bestimmung des Streulicht-Offsets eines Halbraum-Strahlers aufgrund der Rückreflexionen

Die zweite Art von Streulichteffekten bzw. die **Rückreflexion-Streulichteffekte** können durch eine teilweise Abdeckung des einfallenden Lichtes auf der Messwand bestimmt werden. Hier wird ein Teil des Lichtes mit Hilfe einer Blende abgedeckt, um einen kleinen Bereich ohne direkte Lichtsignale auf dem Schirm zu erzeugen. In Abbildung 5.14 wird der abgedeckte Bereich auf dem Schirm gezeigt. Mit Hilfe einer Kameraaufnahme oder mit einem Beleuchtungsstärkemessgerät wird der abgedeckte Bereich auf der Messwand gemessen. Anhand des Verhältnisses zwischen den erfassten Messsignalen mit und ohne Abdeckung wird die prozentuale Abweichung berechnet. Hier ergeben sich Abweichungen im Mittelwert für einen isotropen Strahler von 1,55 %, und für Halbraum-Strahler von 0,75%. Diese

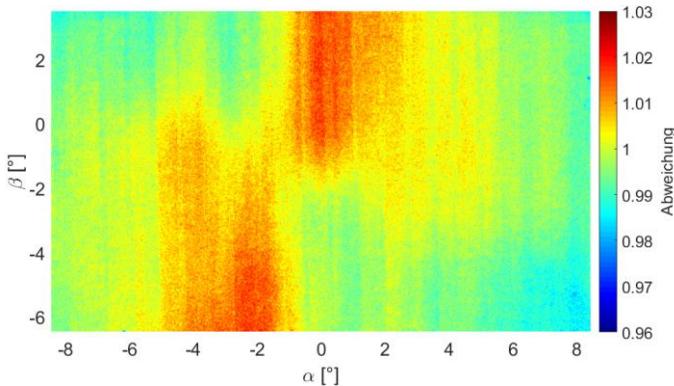
Werte enthalten aber Einflüsse von Messraum-Streulichteffekten, da sowohl der Messraum als auch der Schirm gleichzeitig beleuchtet werden. Die Differenz zwischen den berechneten Abweichungen, wenn der Schirm vollständig oder teilweise abgedeckt wird, ergibt das durch Rückreflexionen verursachte Streulicht auf dem Schirm. Für die zwei untersuchten Beispiele ergeben sich Abweichungen in der Größenordnung von 1,15 % und 0,6 %. Diese Werte ergeben ein Verhältnis 80 % – 20 % für beide Arten von Streulichteffekten, welche die Bedeutung der durch Reflexion der Lichtquelle auf dem Schirm verursachten Streulichteffekte zeigt.

Die berechneten Werte anhand der partiellen Abdeckung eines Bereichs des Schirmes können für die Korrektur beider Arten von Streulichteffekten für Voll- oder Halbraum-Strahler als Offset direkt angewendet werden. Im Fall von stark ausgerichteten Lichtquellen sind weitere Analysen notwendig, wie die erwähnten pixelaufgelösten kamerabasierten Korrekturen. Als Folgerung der Analyse kann keine pauschale Streulichtkorrektur durchgeführt werden, da diese nicht nur von der Verteilung des untersuchten Beleuchtungssystems, sondern auch von der Ausrichtung der Quelle mit dem Goniometer in Bezug auf den Messraum abhängt.

Eine alternative Methodik zur Bestimmung beider Arten von Streulichteffekten wurde in Zusammenarbeit mit [69] durchgeführt. Hier wurde sowohl eine Raum- als auch eine Schirm-Streulichtantwort mit definierten Lichtquellen bestimmt. Die Raumantwortanalyse anhand des Scannens des Messraumes mit einer gebündelten Lichtquelle wurde verwendet, um die Bereiche im Messraum zu erkennen, die große Streulichteffekte auf dem Schirm verursachen. Nach der Erkennung wurden diese Bereiche untersucht und Maßnahmen zur Streulichtunterdrückung durchgeführt.

### 5.2.3 HOMOGENITÄT SCHIRM

Die Reflexionseigenschaften der Messwand sollen auf deren gesamte Oberfläche möglichst homogen sein. Dies wurde durch mehrmaliges Streichen mit der Farbe ELF 954 der Fa. Brillux erreicht. Dennoch ist die verwendete Kamera imstande, räumliche Differenzen auf der Schirmoberfläche zu erfassen. Diese Abhängigkeiten sind durch die Beleuchtung des Schirmes mit einem möglichst isotropen<sup>7</sup> Strahler in Abbildung 5.15 zu sehen. Es sind ebenfalls die vertikalen Farbröllbewegungen zu erkennen.



**Abbildung 5.15:** Räumliche Abhängigkeiten der Reflexionseigenschaften des verwendeten Schirms

Diese Differenzen können in Bezug auf den Mittelwert aller gemessenen Werte korrigiert werden. Die Abweichung relativ zum Mittelwert wird mit der Farbskala beschrieben. Durch Division jeder Kameramessung durch diese räumlichen Abhängigkeiten (Faktor

<sup>7</sup> Konstante Lichtstärkewerte in allen Richtungen der Verteilung

$k_p(\theta, \varphi)$  in Gleichung (5.9)) werden die Reflexionsdifferenzen ausgeglichen.

### 5.3 MESSOBJEKT

Mit dem Ziel, das Image-Merging-Verfahren und die entwickelte „*Spectral Camera Measurement*“-Messmethodik darzustellen und zu validieren, wird ein spezielles Testobjekt auf LED-Basis entwickelt. Dieses Device Under Test (DUT) dient als ein multidimensionales Normal, da es imstande ist, sowohl stabile und bekannte Referenzwerte für alle vier photometrischen Grundgrößen als auch kontrollierbare spektrale bzw. farbmétrische Informationen zu liefern. Von entscheidender Bedeutung ist auch die Möglichkeit, definierte Licht- und Farbverteilungen im Winkelraum zu erzeugen. Je nachdem welche Größe untersucht und mit Referenzmessgeräten verglichen wird, kann das Messobjekt als ein **Leuchtdichtenormal**, **spektrales Normal** oder **geometrisches Normal** betrachtet werden.

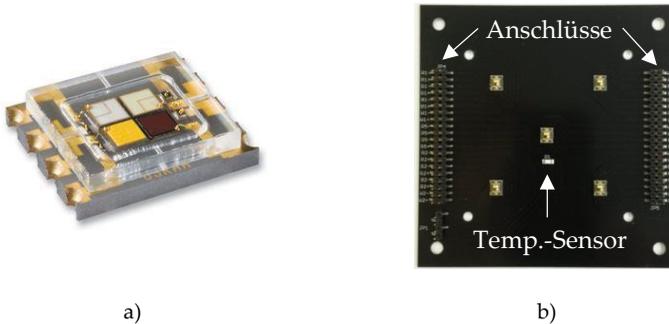
Die **spektrale** Information wird mittels Multichip-Hochleistungs-**RGBW<sup>8</sup>-LED** (s. Abbildung 5.16 a) der Fa. OSRAM Opto Semiconductors [70] erzeugt. Sowohl die von der LED emittierten photometrischen Größen als auch die spektrale Verteilung sind stark von den Betriebsbedingungen abhängig. Für die Erzeugung von definierten photometrischen Größen und Spektren müssen hierfür zwei Voraussetzungen erfüllt werden. Zuerst muss die Temperatur der LED-Chips während des Betriebs konstant gehalten werden, da der emittierte Lichtstrom annäherungsweise mit einer negativen exponentiellen Funktion in

---

<sup>8</sup> Rote, grüne, blaue und weiße LED kombiniert in einem Chip

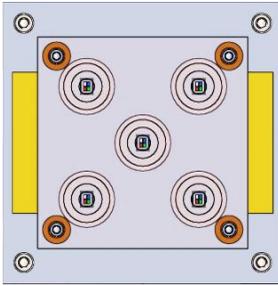
Abhängigkeit von der Temperatur sinkt [71]. Temperaturvariationen verursachen außerdem Änderungen des relativen spektralen Verlaufs der LED, da sich die LED-Spektren im Wellenlängenbereich verschieben [18]. Zweitens sind die absoluten Amplituden der erzeugten lichttechnischen Werte von den elektrischen Betriebsbedingungen bzw. von der Stabilität der elektrischen Stromversorgung beeinflusst. Die Temperaturabhängigkeiten werden durch die Benutzung eines Peltier-Elements während der Messung eliminiert, indem die Temperatur der Metallkernplatine auf der die LED angebracht sind, auf einem gewünschten Wert konstant gehalten wird. Die LED werden außerdem mit einer hochpräzisen und sehr stabilen DC-Stromquelle betrieben, welche das Einhalten des Arbeitspunktes während der lichttechnischen Messungen garantiert.

Die Möglichkeit, additive Farbmischungseffekte im Fernfeld durch räumlich getrennte LED-Lichtquellen zu erzeugen, dient zur besseren Darstellung und entsprechenden Validierung der SCM-Methodik. Hierfür wurde eine Metallkernplatine mit fünf örtlich getrennten RGBW-LED, einem PT100-Temperatursensor und passenden Anschlüssen für einen seriellen elektrischen Betrieb gefertigt (s. Abbildung 5.16 b). Die Metallkernplatine begünstigt die homogene Verteilung der Temperatur und die korrekte Regelung anhand des Peltier-Elements. Der Temperatursensor wird für Kontrollzwecke eingesetzt. Die an beiden Seiten der Platine angebrachten elektrischen Anschlüsse erlauben eine getrennte Steuerung der einzelnen LEDs für eine beliebige Kombination der zur Verfügung stehenden LED-Farben.



**Abbildung 5.16:** a) Verwendete LED der Firma OSRAM Opto Semiconductors GmbH [70] und b) entwickelte Metallkernplatine mit fünf räumlich getrennten LED-Chips

Mit dem Zusatz eines passenden Blendensystems für jeden LED-Chip werden Lichtverteilungen mit definierter Winkelinformation erzeugt. Hierfür werden Quer- und Seitenblenden, die durch Zentrierbuchsen befestigt werden, eingesetzt. Da die Elemente des Blendensystems demontierbar sind, ermöglicht dies eine Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Messsituationen. Hier ist es möglich, Querblenden mit unterschiedlichen Formen und Öffnungswinkeln, die auf dem Mittelpunkt der LED zentriert sind, zu montieren, wie z. B. kreisförmige Querblenden mit einem Öffnungswinkel von  $10^\circ$  in Abbildung 5.17 a) und b). Die Seitenblenden sind einerseits als Abstandshalter für die Querblenden und andererseits zur Trennung der LED-Chips voneinander nötig. So wird eine Lichtmischung innerhalb des Blendensystems verhindert. Die auf diese Weise erzeugten Licht- bzw. Farbverteilungen überlappen sich dann zunehmend mit dem Abstand und erzeugen winkelabhängige Mischfarben und spektrale Verteilungen (s. Abbildung 5.17 c) und d)).



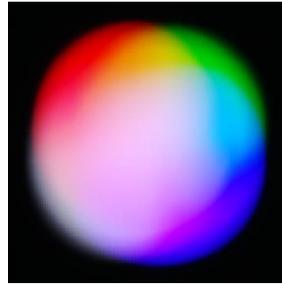
a)



b)



c)



d)

**Abbildung 5.17:** a) CAD-Modell des Normal mit Blendsystem, b) Messobjekt mit den vier äußeren LED mit jeweils einer Farbe, c) Beispiel erzeugter additiver Farbeffekte (Abstand ca. 30 cm) und d) Farbeffekte im Fernfeld (10 m)

Das verwendete Blendsystem besteht aus drei lasergeschnittenen Edelstahlblechen mit kreisförmigen Öffnungen. Zur Minimierung von Reflexionseffekten zwischen den Blenden und der daraus resultierenden Abweichungen der Lichtverteilung, werden diese Blenden mit einem reflexionsarmen Schwarzchrom-Verfahren beschichtet. Eine Messung anhand eines Spektrophotometers der Reflexionseigenschaften der Blenden ergibt einen mittleren Wert aller Wellenlängen von ca.

2%. Diese internen Reflexionen zwischen den Blenden können ebenfalls in Abbildung 5.17 b) betrachtet werden.

Die Eigenschaft, eine große Anzahl von Farben und Mischfarben im Fernfeld erzeugen zu können, ist von großer Bedeutung für die Validierung der in dieser Arbeit entwickelten winkelaufgelösten spektralen Methodik. Diese Vielfalt von erzeugten Spektren ermöglicht eine spektralabhängige Analyse der Fehlanpassung der optischen Filterung bei Kamerasystemen und auch bei spektral integrierenden Systemen. Ein näherer Blick auf Abbildung 5.17 c) zeigt allerdings, dass die einzelfarbigen LED keine gleichmäßigen kreisförmigen LVKs, sondern ungleichmäßige Verteilungen bilden. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass die einzelnen R, G, B und W LED-Chips nicht mittig auf dem Blendensystem platziert sind, sondern leicht zu den Seiten verschoben sind, wie in Abbildung 5.17 a) zu sehen ist. Aus diesem Grund werden die einzelnen LED des Chips unterschiedlich von den Blenden abgeschattet. Diese nicht kreisförmigen LVKs sind aber für die spektrale Analyse der SCM-Methodik sogar vorteilhaft, da keine homogene Mischfarbe im Fernfeld, sondern eine Vielfalt von spektralen Informationen (s. Abbildung 5.17 d) erzeugt wird. Diese Konfiguration des Testobjekts wird als ein **spektrales Normal** verwendet und wurde bereits in [30] dank räumlich getrennter farbiger LED-Quellen für die Validierung der Methodik zur Erzeugung von „spektralen“ Ray-Files<sup>9</sup> eingesetzt. Im Gegensatz dazu sind für die Validierung des in diesem Kapitel vorgestellten Image-Merging-Verfahrens Licht- und Farbverteilungen notwendig, die mathematisch beschreibbar und dementsprechend vorhersehbar und bekannt sind. In der aktuellen Konfiguration des Normals ist eine

---

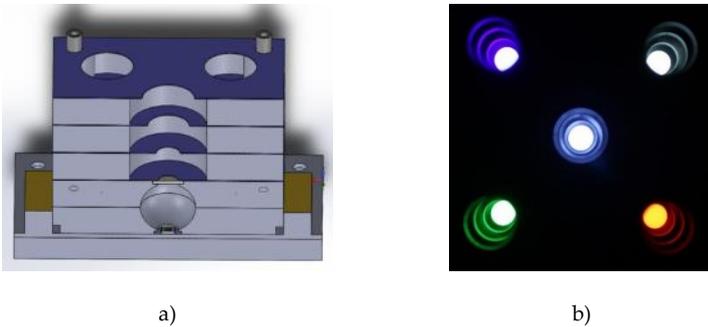
<sup>9</sup> Gemessene Strahlendaten für die Durchführung optischer Simulationen

analytische Beschreibung der Abstrahlcharakteristik sehr komplex. Daher ist für eine mathematische Modellierung eine homogen leuchtende Fläche mit bekannter Form und Größe notwendig.

In Zusammenarbeit mit [72] wurde das spektrale Normal so erweitert, dass gewünschte kreisförmige homogen leuchtende Flächen bei jeder der räumlich getrennten LED-Quellen entstehen. In Kombination mit einem ebenfalls kreisförmigen und konzentrischen Blendensystem zu den leuchtenden Flächen ist es möglich, die daraus resultierenden Lichtverteilungen mathematisch zu modellieren. Infolgedessen sind die erzeugten LVK bekannt und beschreibbar. Durch eine passende Mischung der Farbe der einzelfarbigen LED-Chips und die nachfolgende Streuung anhand eines transparenten Diffusors wurden in [72] homogen leuchtende farbliche Flächen erzeugt. Dieses erweiterte Testobjekt kann entweder als ein **Leuchtdichtenormal** oder als ein **geometrisches Normal** (bekannte Winkelinformation bzw. LVK) je nach Anwendung eingesetzt werden.

Zuerst wird die Mischung der LED-Farben mittels einer sogenannten Ulbricht-Kugel durchgeführt. Für den hier vorliegenden Anwendungsfall besitzt diese zwei Öffnungen, die jeweils dem Einkoppeln des LED-Chip in die Kugel und dem Austritt des gemischten Lichtes dienen. Die interne Oberfläche wird mit Bariumsulfat, das durch einen Reflexionsgrad von ca. 98% eine diffuse und wellenlängennichtselektive Streuung des Lichtes charakterisiert ist, beschichtet. Diese „weiße“ Farbe ermöglicht mehrfache diffuse interne Reflexionen, die die verschiedenen LED-Farben des Chips mischen. An der Austrittsöffnung der Kugel wird ein Diffusor aus Quarz [73] platziert, der homogen von den internen Reflexionen in der Kugel ausgeleuchtet wird. Das gemischte Licht wird dann gleichmäßig auf der Diffusor-Oberfläche mit einer Cosinus-Abstrahlcharakteristik gestreut. Eine

lasergeschnittene kreisförmige Blende wird in direkten Kontakt zur Diffusor-Oberfläche positioniert, um die Größe und Form der nun homogen leuchtenden Fläche sehr präzise zu definieren. Ausgehend von dieser Ebene wird das aus Quer- und Seitenblenden bestehende Blendensystem, wie beim **spektralen Normal**, mit Zentrierbuchsen und Präzisionsstäbe fixiert. In Abbildung 5.18 werden die beschriebenen Elemente des erweiterten Normals dargestellt und die mit dieser Vorgehensweise resultierenden farbigen homogen leuchtenden Flächen beispielsweise für verschiedene Farben gezeigt.



**Abbildung 5.18:** a) Mehrdimensionales Normal mit Ulbricht-Kugel, Diffusor und Blendensystem und b) homogen leuchtende Flächen mit verschiedenen Farbkombinationen

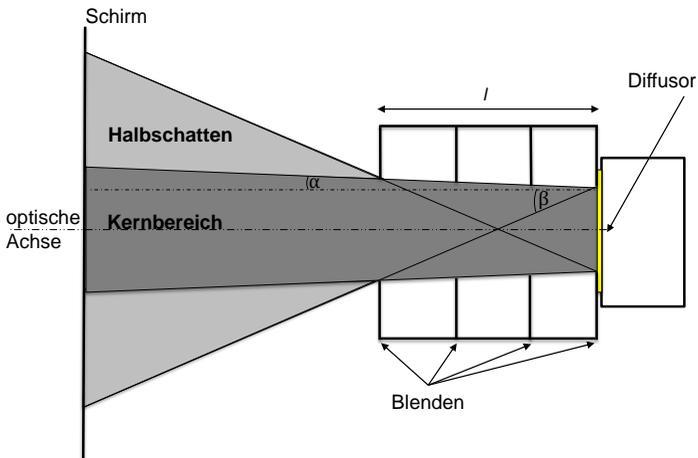
Einerseits führt die Anwendung von Diffusoren bei der Erzeugung von homogen leuchtenden Flächen zu einer Senkung der Intensität des emittierten Lichtsignals um bis zum 60%. Andererseits ermöglicht die Benutzung von Diffusoren eine analytisch beschreibbare Abstrahlcharakteristik anhand eines Cosinus-Strahler-Modells. In Verbindung mit dem Blendensystem kann das mathematische Modell erweitert werden, um einen mathematischen Ausdruck für eine

richtungsabhängige gesehene leuchtende Fläche zu erhalten. Eine analytische Beschreibung der Lichtverteilung ist für den Validierungsprozess komplexer Kamerasysteme sehr hilfreich und wird in dieser Arbeit in 7.1.1 verwendet.

In [72] wurde ausgehend von der kreisförmigen Geometrie der homogenen leuchtenden Fläche ein passender mathematischer Ausdruck erstellt. Mit Verwendung des Diffusors (annäherungsweise Cosinus-Strahler) wird die Lichtstärke als Funktion des Betrachtungswinkels durch die Formel:

$$I(\theta) = I_0 \cdot \cos^{g-1}(\theta) = L \cdot A \cdot \cos(\theta) \quad (5.12)$$

beschrieben, wobei  $I_0$  der Lichtstärkewert in der Hauptstrahlungsrichtung ( $\theta = 0$ ) und  $g$  ein Koeffizient, der die Fokussierung des Lichtes beschreibt, ist. Diese Formel ist nur für rotationssymmetrische homogen leuchtende Flächen bzw. für Lambert-Strahler und ohne Blendensystem gültig. In diesem Fall ist  $g = 2$ , und die Lichtstärke wird durch das Produkt eines konstanten Leuchtdichtewertes  $L$  und die vom Betrachtungswinkel abhängig projizierte Fläche  $A$  beschrieben.



**Abbildung 5.19:** Darstellung der Kern- und Halbschattenbereiche einer symmetrischen homogen leuchtenden Fläche [72, p. 23 vgl.]

Bei Anwendung des Blendensystems mit ebenfalls kreisförmigen Blendenöffnungen ergeben sich drei Bereiche bei der resultierenden Lichtverteilung (s. Abbildung 5.19): ein Kernbereich ( $0 \leq |\theta| \leq \alpha$ ), ein Halbschattenbereich ( $\alpha \leq |\theta| \leq \beta$ ) und „dunkle“ Bereiche (Bereiche ohne Messsignal ( $\beta \leq |\theta|$ )). Die Grenzwinkel  $\alpha$  und  $\beta$  zwischen den Bereichen sind durch das Verhältnis zwischen den Radien der leuchtenden Fläche  $r_1$  und der letzten Blendenöffnung  $r_2$  sowie des Abstands zwischen diesen beiden Ebenen  $l$  wie folgt definiert:

$$\begin{aligned} \tan(\alpha) &= \frac{r_2 - r_1}{l} \\ \tan(\beta) &= \frac{r_2 + r_1}{l} \end{aligned} \quad (5.13)$$

Im Kernbereich ist die leuchtende Fläche der Blenden nicht beeinflusst, sodass demnach die Formel (5.12) gilt, bei der das Messsignal nur von

der projizierten Fläche abhängt. Im Halbschattenbereich wird die projizierte gesehene leuchtende Fläche  $A(\theta)$  bei zunehmendem Betrachtungswinkel dementsprechend vom Blendensystem abgedeckt. Hierbei ist die gesehene Fläche nun auch von  $r_1$ ,  $r_2$  und  $l$  abhängig. Die Herleitung und der vollständige mathematische Ausdruck von  $A(\theta)$  kann ausführlich in [72] nachgelesen werden. Ergebnisse dieser Modellierung werden in 7.1.1 vorgestellt und mit reellen Messungen verglichen. Die drei modellierten Messbereiche können wie folgt mit einer abschnittsweise definierten Funktion beschrieben werden:

$$I(\theta) = L \cdot A \cdot \cos(\theta) \cdot \begin{cases} 1 & 0 \leq |\theta| \leq \alpha \\ A(\theta)/A & \alpha \leq |\theta| \leq \beta \\ 0 & \beta \leq |\theta| \end{cases} \quad (5.14)$$

## Kapitel 6

# SENSORFUSIONSANSATZ

*Aufgrund der gestiegenen ästhetischen wie auch messtechnischen Anforderungen an Beleuchtungssysteme hinsichtlich Farbhomogenität ist es notwendig, diese möglichst gut analysieren zu können. Die in dieser Arbeit als „Spectral Camera Measurement“ bezeichnete entwickelte Messmethodik erlaubt eine hochaufgelöste farbmtrische Charakterisierung von Beleuchtungssystemen und liefert sowohl winkelaufgelöste Farbwerte als auch winkelaufgelöste spektrale Informationen der Farbverteilung. Der verwendete Sensorfusionsansatz wird in diesem Kapitel im Detail erklärt.*

### 6.1 MESSKONZEPT

Eine ideale Farbmesstechnik sollte imstande sein, komplette Farbinformationen zu erfassen. Eine komplette Farbcharakterisierung gelingt, wenn die verwendete Messtechnik sowohl winkelaufgelöste Farbwerte als auch eine winkelaufgelöste spektrale Deskription der untersuchten Beleuchtungssysteme liefern kann. Je nachdem, wie komplex die zu messende Lichtverteilung ist, resultieren daraus höhere Anforderungen an die notwendige Messauflösung. Die Charakterisierung sollte idealerweise mit einer möglichst kurzen Messdauer unter Berücksichtigung der Messunsicherheit geschehen. Wie in Kapitel 3.2 bereits eingeführt, werden nach dem aktuellen Stand der Technik winkelaufgelöste Farbmessungen entweder mit scannenden Systemen oder mit

kamerabasierten Systemen durchgeführt. Hierbei stehen zeitintensive Messungen mit sehr präzisen absoluten erfassten Farbwerten schnellen Kameramessungen mit fehlerhaften Messergebnissen aufgrund systematischer Effekte gegenüber. Eine winkelaufgelöste spektrale Charakterisierung im Fernfeld der Lichtquelle ist mit dem Stand der Technik nur mit einem Spektrometer in Kombination mit einem Goniometer möglich. Diese Messungen sind sehr zeitintensiv, da jeder Punkt der Verteilung einzeln gemessen werden muss und die Intensität des Lichtsignals eine direkte Wirkung auf die Integrationszeit der spektralen Messung hat. Um eine vollständige Farbcharakterisierung zu ermöglichen, ohne dabei komplexe Hardwareelemente zu verwenden, ist ein neuer Messansatz notwendig, der bestenfalls die Vorteile der genannten Standardmessgeräte kombiniert. Auf diese Weise wird eine komplette und hochaufgelöste Farbcharakterisierung von Beleuchtungssystemen in einer akzeptablen Messdauer möglich. Diese auf Sensorfusion basierende Methodik wird in dieser Arbeit als **Spectral Camera Measurement** (kurz **SCM**) bezeichnet.

Ausgehend von kamerabasierten Farbmesssystemen wird die SCM-Methodik für eine komplette Farbcharakterisierung entwickelt. Hierfür werden **Filterkameramessungen** mit einer **spektralen Messung** und einer **colorimetrischen Punktmessung** im Fernfeld fusioniert. Die spektrale Messung liefert Informationen bezüglich der Anzahl der im zu messenden Beleuchtungssystem vorhandenen Arten von LED-Quellen. Hier wird zwischen schmalbandigen LED-Spektren, wie einfarbige rote, grüne oder blaue LED, und breitbandigen Spektren, wie Leuchtstoff konvertierende weiße LED unterschieden. Diese einzelnen spektralen Quellen variieren im Winkelraum. Für eine Beschreibung dieser spektralen Variationen wird angenommen, dass alle Spektren eine konstante relative spektrale Verteilung aufweisen

und sich nur in ihren Amplituden verändern [28] [74] [75]. In diesen Publikationen wurde anhand winkelaufgelöster spektraler Messungen von OLED und LED gezeigt, dass diese Annahme zur Beschreibung der spektralen Winkelabhängigkeiten plausibel ist. Infolgedessen kann die spektrale Zusammensetzung bei jedem Punkt der Verteilung als eine gewichtete Summe der einzelnen Spektren betrachtet werden. Zunächst wird die komplette relative räumliche Verteilung des Beleuchtungssystems mit dem kamerabasierten Messsystem von 5.1 in Kombination mit den passenden optischen Filtern aufgenommen. Die optischen Filter sind hier notwendig, um die vorhandenen spektralen Anteile so gut wie möglich in den erfassten Kameraaufnahmen zu trennen. Die spektralen Amplituden bzw. Gewichtungsfaktoren der einzelnen Spektren werden dann anhand dieser erfassten Filterkamerawerten bestimmt. Auf diese Weise wird pro Pixelelement bzw. Winkelkoordinaten der Kameramessung ein entsprechendes Spektrum zugewiesen. Die Fusionierung von Kameraaufnahmen mit einer spektralen Messung liefert folglich eine kamerabasierte winkelaufgelöste spektrale Deskription des Beleuchtungssystems, die eine hohe Messauflösung bei geringen Messzeiten gewährleistet. Diese winkelaufgelösten spektralen Messungen können durch Faltung und Integration mit den farbmtrischen Gewichtungsfunktionen die entsprechenden winkelaufgelösten Farbwerte erzeugen. Abschließend werden die resultierenden Farbwertevertelungen anhand einer colorimetrischen Punktmessung absolut normiert. Damit wird ein absolutes Referenzieren zwischen beiden Messtechniken gewährleistet. Das Ziel, komplette Farbinformation zu erfassen, wird mit Sensorfusionstechniken erreicht. Zum Einsatz können die generierten hochaufgelösten Spektren bei optischen Simulationen kommen, um Farbsaum und Farbhomogenitätsanalysen durchzuführen.

Kamerabasierte Messsysteme bringen jedoch gleichzeitig systematische Fehler mit sich, die fehlerhafte Messsignale verursachen können. Besonders hervorzuheben im verwendeten Messsystem sind das Streulicht im Messraum, die orts- und wellenlängenabhängigen Reflexionseigenschaften des Messschirmes und die spektrale Anpassung der optischen Filterung. Eine Korrektur dieser Effekte ist jedoch nur durch Datenverarbeitung, passende Algorithmen und eine systematische Beschreibung des Messsystems möglich. Das Streulichtverhalten des Messraums und die orts- und wellenlängenabhängigen Reflexionseigenschaften des Schirmes werden durch eine passende messtechnische Charakterisierung korrigiert, wie in Kapitel 5.2.2 und Kapitel 5.2.3 beschrieben.

Standard für kamerabasierte Farbmesssysteme sind spektral integrierende Messgeräte, die die Farbwerte durch spektrale Anpassung an die Normalspektralwertfunktionen erfassen. Die Realisierung der spektralen Anpassung ist immer mehr oder weniger fehlerhaft. Die resultierende Fehlanpassung der optischen Filterung spielt vor allem bei der Vermessung von LED-Quellen eine wichtige Rolle. Deren spektrale Charakteristik unterscheidet sich stark von der von thermischen Strahlern, welche zur absoluten Kalibrierung verwendet werden. Bei kamerabasierten Messungen kann zudem keine optimale spektrale Anpassung erreicht werden, da die Filterung des Pixel-Arrays durch normale Bandpassfilter und nicht durch partielle Filterung wie bei Photometern durchgeführt wird [17] [3]. Diese Fehlanpassung kann und muss mit Hilfe des sogenannten „**spectral mismatch correction factor**“, kurz **SMCF**, korrigiert werden (s. 2.1.1 und 2.1.2). Für die Bestimmung des SMCFs sind allerdings winkelaufgelöste spektrale Messungen der zu messenden LED-Quelle erforderlich. Pro Pixelelement der Kamera muss folglich eine spektrale

Charakteristik der Lichtquelle an diesem Punkt für die SMCF-Berechnung vorhanden sein. Diese Information wird, wie bereits erwähnt, mit der entwickelten SCM-Methodik erfasst.

Im Fokus der SCM-Methodik steht die Bestimmung und Modellierung der einzelnen Spektren des zu messenden Beleuchtungssystems. Diese werden in dieser Arbeit mit der sogenannten PMBS-Methodik (von **Physically Motivated Basis Spectra**) durchgeführt [30]. Mit Hilfe dieser Methodik wird eine mathematische Beschreibung jeder einzelnen vorhandenen LED-Quelle ermöglicht. Anhand einer globalen spektralen Messung wird mit dieser Methodik zuerst eine Zerlegung in Teilspektren durchgeführt, sodass die einzelnen Spektren der LED-Quellen mit phänomenologischen LED-Funktionen angefitet und mathematisch modelliert werden können. Mit der „Spectral Camera Measurement“-Messmethodik werden die im Winkelraum variierenden relativen Amplituden dieser angefiteten Spektren anhand mindestens einer Filterkammermessung pro LED-Quelle modelliert. Dieses Konzept funktioniert nur für LED-Quellen unter der Annahme konstanter relativer spektraler Verläufe der LED-Quelle. Die mit dieser Methodik erzeugten Spektren können einerseits für die Quantifizierung und Korrektur der Fehlanpassung der relativen spektralen Empfindlichkeit der optischen Filterung von kamerabasierten Farbmesssystemen eingesetzt werden. Die Genauigkeit der hochauflösten erfassten Farbmesswerte kann auf diese Weise erhöht werden. Andererseits erlaubt diese durch Sensorfusion generierte spektrale Information eine vollständige winkelaufgelöste spektrale Charakterisierung der Lichtquelle, deren Messunsicherheit durch den Vergleich mit spektralen Messungen geschätzt werden kann. Dies wurde in Kapitel 4 ausführlich präsentiert und wird in Kapitel 7 weiter betrachtet.

Wie eine spektrale Charakteristik pro Pixel der Kameraaufnahme mit der SCM- Methodik anhand der Filterkammermessungen und der PMBS-Konzepte mess- als auch softwaretechnisch bestimmt wird, wird in den nächsten Abschnitten beschrieben.

## 6.2 PMBS

Die „Physically Motivated Basis Spectra“-Methodik wurde von Rotscholl et al. in [30] und [75] entwickelt, um spektrale Variationen im Orts- und Winkelraum anhand bekannter phänomenologischer LED-Funktionen zu modellieren [18] [76]. Das Ziel der genannten Arbeit war es, Ray-Files um ihre spektrale Information zu erweitern, sodass optische Simulationen farbmesstechnisch vollständig sind [74]. Dies wurde mit Hilfe von Nahfeld-Kammermessungen durchgeführt. Die Grundannahme der PMBS-Methodik besteht in der Definition von Richtung bzw. von Winkel  $\theta$  und  $\varphi$  abhängigen Spektren  $S_Z(\theta, \varphi, \lambda)$  als eine **gewichtete Summe** von  $n$  Teil- bzw. Basisspektren  $S_i(\lambda)$  [30, p. 39 vgl.]:

$$S_Z(\theta, \varphi, \lambda) = \sum_{i=1}^n A_i(\theta, \varphi) \cdot S_i(\lambda) \quad (6.1)$$

Es wird angenommen, dass sowohl die Anzahl der  $n$  vorhandenen LED-Quellen als auch die Art (farbige LED oder Leuchtstoff-LED) bekannt sind. Die spektrale Beschreibung ist aber nur möglich, wenn die relative spektrale Charakteristik jeder LED-Quelle im Winkelraum konstant bleibt bzw. nur, wenn Amplitudenvariationen stattfinden. Die Terme  $A_i(\theta, \varphi)$  sind Gewichtungsfaktoren, die diese richtungsabhängigen Amplitudenvariationen bei jedem Basisspektrum

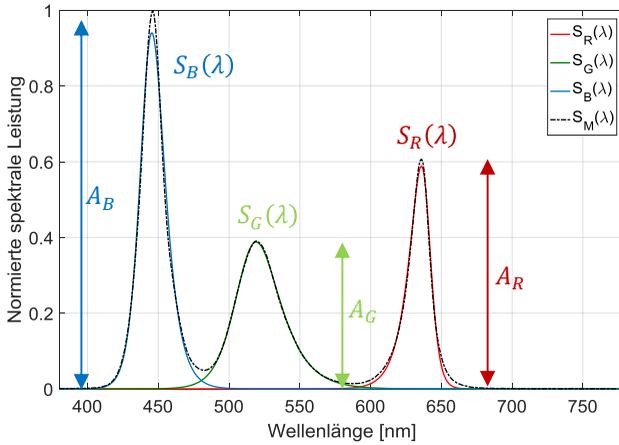
modellieren. Andere Effekte, wie Wellenlängenverschiebungen der Spektren aufgrund von z.B. Temperaturvariationen, werden bei diesem Ansatz nicht berücksichtigt. Das mathematische Modell für die spektrale Beschreibung könnte aber erweitert werden, um solche Effekte mitmodellieren zu können, wie z.B. in [18] gezeigt wird.

Wie die mathematische Beschreibung der Basisspektren mit der PMBS-Methodik durchgeführt wird, kann anhand des Beispiels einer RGB-LED-Quelle leichter erklärt werden. Dieses Beleuchtungssystem besitzt drei LED-Quellen ( $n = 3$ ), deren gemeinsame spektrale Charakteristik zuerst durch eine spektrale Messung im Fernfeld der Lichtquelle erfasst wird. Jedes Basisspektrum wird dann bei dieser globalen Messung von den restlichen Spektren getrennt, wie in [30] ausführlich beschrieben, und abschließend durch phänomenologische LED-Funktionen angefüttet. Alternativ können die  $S_i(\lambda)$  Spektren durch Smooth-Spline-Interpolationstechniken oder direkt vom Datenblatt des LED-Herstellers bestimmt werden. Die wichtigsten phänomenologischen Funktionen, die in dieser Arbeit zum Einsatz kommen, sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst [18] [76]:

**Tabelle 6.1:** Phänomenologische LED-Funktionen

Name	Funktion $f(\lambda)$
Second order Lorentzian	$A/(1 + (\lambda - C/W)^2)^2$
Logistic power peak	$\left(\frac{A}{S}\right) \cdot (1 + e^U)^{\frac{-S-1}{S}} \cdot (e^U) \cdot (S + 1)^{\frac{S+1}{S}}$
Asymmetric logistic peak	$A \cdot (1 + e^U)^{-S-1} \cdot e^U \cdot S^{(-S)} \cdot (S + 1)^{S+1}$
Pearson VII	$A/\left(1 + (\lambda - C/W)^2 \cdot (2^{1/S} - 1)\right)^S$
Asymmetric double sigmoidal	$\frac{A}{(1 + e^{(\lambda-C+W/2)/S_1})} \cdot \left(1 - \left(\frac{1}{1 + e^{-(\lambda-C+W/2)/S_2}}\right)\right)$
Mit $U = \frac{\lambda-C+W \cdot \log(S)}{W}$	

Bei den phänomenologischen Funktionen dieser Tabelle können die Parameter  $A$  und  $C$  jeweils als Peak-Intensität und Peak-Wellenlänge der modellierten spektralen Charakteristik betrachtet werden. Diese Parameter haben eine physikalische Bedeutung und werden direkt von der spektralen Messung festgelegt, um die Bestimmung der unbekannt Funktionsparameter zu erleichtern. Den Parametern  $S$  und  $W$  kann keine physikalische Bedeutung zugeordnet werden. Alle Modellparameter werden durch Anpassen an die erfassten spektralen Messdaten mit der passenden phänomenologischen LED-Funktion festgelegt. In Abbildung 6.1 werden die Ergebnisse der PMBS-Modellierung für das RGB-Beispiel dargestellt. Hier sind sowohl das gemessene normierte globale RGB Spektrum  $S_M(\lambda)$  des Testobjekts als auch die aus der phänomenologischen Modellierung resultierenden Teilspektren  $S_R(\lambda)$ ,  $S_G(\lambda)$  und  $S_B(\lambda)$  zu sehen.



**Abbildung 6.1:** Basisspektren einer RGB-LED

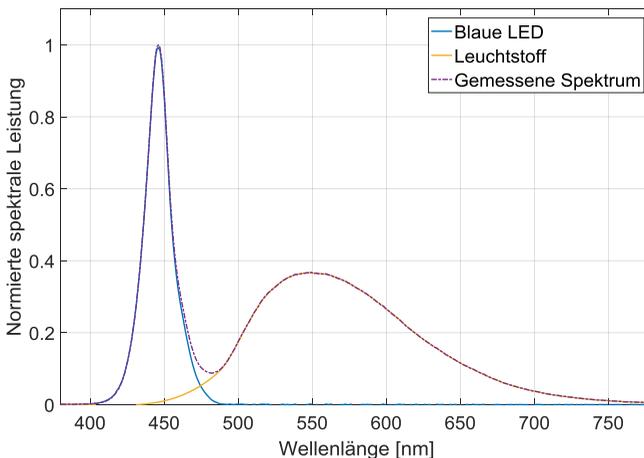
Die Konzepte von Rotscholls Arbeit können für kamerabasierte Fernfeld-Messtechniken erweitert werden. Jedem Pixel der erfassten Verteilung kann ein Spektrum  $S_z(\theta, \varphi, \lambda)$  zugeordnet werden, das als gewichtete Summe der drei numerisch bestimmten Teilspektren festgelegt wird. Die Gewichtungsfaktoren  $A_i(\theta, \varphi)$  dieser Summe beschreiben die spektralen Winkelabhängigkeiten der einzelnen Teilspektren an jeder Position der Farbverteilung. Sie werden für jedes Kamerapixel anhand Filterkammermessungen bestimmt, wie beispielsweise für das RGB-Testobjekt in Formel (6.2) und in Abbildung 6.1 gezeigt wird:

$$S_{RGB}(\theta, \varphi, \lambda) = A_R(\theta, \varphi) \cdot S_R(\lambda) + A_G(\theta, \varphi) \cdot S_G(\lambda) + A_B(\theta, \varphi) \cdot S_B(\lambda) \quad (6.2)$$

Um die Gültigkeit des verwendeten mathematischen Modells zu bestätigen, wird ein Vergleich zwischen einem gemessenen Spektrum

$S_M(\theta, \varphi, \lambda)$  und der Summe der gewichteten Teilspektren  $S_{RGB}(\theta, \varphi, \lambda)$  an denselben Winkelkoordinaten durchgeführt. Zur vollständigen Validierung der numerisch generierten Spektren ist eine Messunsicherheitsanalyse der spektralen Messung mit den im Kapitel 4 eingeführten Konzepten notwendig. Diese Validierung wird in Kapitel 7 vorgestellt.

Im Fall einer weißen LED bzw. einer leuchtstoffkonvertierten blauen LED wird der blaue Anteil zuerst von dem „gelben“ Anteil bzw. Leuchtstoff-Spektrum getrennt und dann der blaue spektrale Anteil mit phänomenologischen Funktionen modelliert. Das verbleibende Leuchtstoff-Spektrum wird mit „Smoothing Spline“-Interpolationstechniken angefitzt [30]. Die resultierenden Basisspektren der blauen LED und des Leuchtstoffes sind in Abbildung 6.2 dargestellt. Die Annahme von variablen relativen Amplituden für die Modellierung der Winkelabhängigkeit gilt in diesem Fall nach wie vor.



**Abbildung 6.2:** Basisspektren weißer LED

Für RGBW-LED stößt die in dieser Arbeit entwickelte Farbmessmethodik an ihre Grenzen. Eine Zerlegung des RGBW Spektrums in Basisspektren ist zwar möglich, auch wenn starke spektrale Überlappungen zwischen dem grünen und dem leuchtstoffspektralen Anteil stattfinden, aber die Trennung der Farbregionen im Fernfeld anhand Filterkameramessungen wird schwieriger. Die erhaltenen Farbregionen können im Fernfeld nicht mehr gut getrennt werden. Eine Berechnung der Gewichtungsfaktoren ist mathematisch möglich, aber größere Messunsicherheiten müssen berücksichtigt werden.

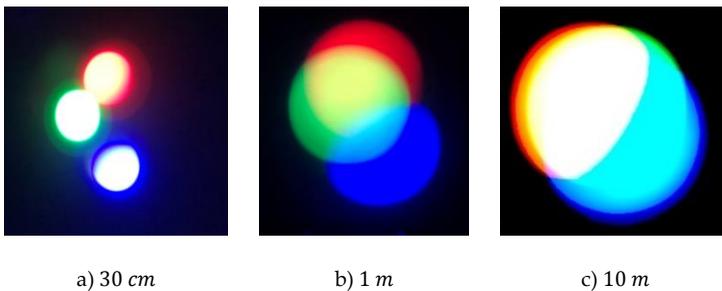
Wie die Gewichtungsfaktoren  $A_i(\theta, \varphi)$  anhand von Filterkameramessungen im Allgemeinen mit der SCM-Methodik bestimmt werden, wird im Folgenden beschrieben.

### 6.3 SPECTRAL CAMERA MEASUREMENT (SCM)

Wie bereits erwähnt, können Filterkameramessungen sowohl für hochaufgelöste Farbverteilungsmessungen als auch, in Kombination mit spektralen Messungen, für die Bestimmung von winkelaufgelösten spektralen Informationen im Fernfeld für LED eingesetzt werden. Die auf Sensorfusion basierende SCM-Methodik beschreibt die spektralen Variationen im Winkelraum als die gewichtete Summe von  $n$  Basisspektren  $S_i(\lambda)$  (s. Formel (6.1)). Die Gewichtungsfaktoren  $A_i(\theta, \varphi)$  bei jeder Position der Farbverteilung müssen nun bestimmt werden.

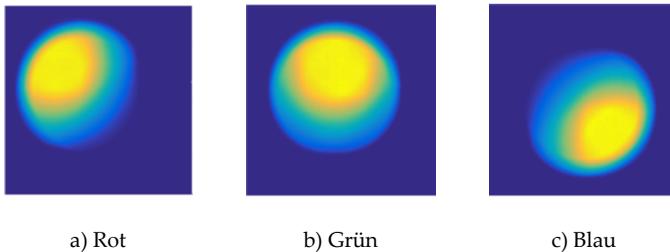
In der Praxis gibt es Beleuchtungssysteme, die imstande sind, einzelne LED-Quellen spektral im Fernfeld zu überlappen bzw. zu mischen. Ein Beispiel hierfür ist das für Validierungszwecke entwickelte spektrale Normal (s. 5.3). Dieses Testobjekt kann mit Benutzung eines Blendensystems eine abstandabhängige Farbverteilung erzeugen, bei der die

einzelnen LED-Farben unterschiedlich stark gemischt werden. Zur Erklärung des messtechnischen Ansatzes zur Bestimmung der Gewichtungsfaktoren werden mit diesem Testobjekt bestimmte Farbverteilungen im Fernfeld auf dem weißen Schirm des Messsystems (s. 5.1) erzeugt und mit Filterkameramessungen erfasst. Die überlappenden spektralen Charakteristiken auf dem weißen Schirm in 10 m Abstand müssen so gut wie möglich mit Hilfe von Filterkameramessungen getrennt werden, um die Amplitudenvariationen der Basisspektren modellieren zu können. Dies kann mit der Auswahl von geeigneten optischen Filtern gelingen, indem die spektrale Verteilung der gemessenen Spektren zuerst analysiert wird. Beispielhaft werden drei getrennte LED-Quellen jeweils mit den Farben rot, grün und blau betrachtet. Die mit dieser Konfiguration generierten Farbverteilungen sind in verschiedenen Abständen des Testobjekts in Abbildung 6.3 dargestellt. Hier ist deutlich zu erkennen, wie die Überlappung der verschiedenen LED Quellen mit zunehmendem Abstand stärker wird, bis alle Farben gemischt sind.



**Abbildung 6.3:** Erzeugte Farbverteilung in zunehmendem Abstand des Testobjekts mit der Farbkombination R, G und B.

Die gesuchten Gewichtungsfaktoren  $A_i(\theta, \varphi)$ , die die spektralen Amplitudenvariationen im Winkelraum beschreiben, sind proportional zu den erfassten Graumesswerten von Filterkameraaufnahmen. Im idealen Fall können  $n$  geeignete optische Filter die Überlappung von  $n$  spektralen LED-Quellen im Fernfeld perfekt trennen. In der Praxis gibt es jedoch keine optischen Filter, die nur die relativen spektralen Variationen eines einzelnen LED-Spektrums messen können. Die Filterkammermessungen sollen idealerweise die verschiedenen Farbregionen erfassen, um zu ermöglichen, während der Messung einer Region die restlichen LED-Quellen auszuschalten. Dies wurde zu Validierungszwecken durchgeführt, indem während der Kameramessungen mit einem nicht wellenlängenselektiven optischen Filter die restlichen LED-Quellen des spektralen Normals lediglich abgedeckt, aber nicht abgeschaltet wurden. Auf diese Weise können die „perfekten“ getrennten Farbregionen erfasst werden, ohne thermische Einflüsse mitberücksichtigen zu müssen. Die Ergebnisse dieser Kameramessungen mit der „perfekten“ Trennung der R, G und B LED-Quellen im Fernfeld werden in Abbildung 6.4 präsentiert.



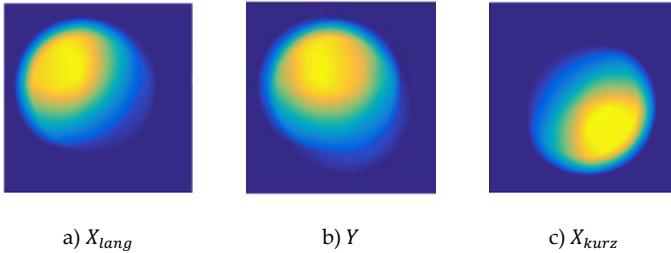
**Abbildung 6.4:** Getrennte Messung der Farbregionen

In [30] wurde eine Methodik vorgestellt, um die beste Filterkombination für die spektrale Trennung im Nahfeld der Lichtquellen zu finden.

Dies wurde anhand von Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt. Infrage kamen bei dieser Arbeit Kombinationen von Glas- und Interferenzfiltern. Es wurde nachgewiesen, dass Interferenzfilter aufgrund der Abhängigkeit vom betrachteten Öffnungswinkel bzw. vom einfallenden Winkel des Lichtstrahls auf die Filterfläche größere Messunsicherheiten besitzen. Daher wird dieser Typ von Filtern bei dem kamerabasierten Fernfeld-Messsystem von 5.1, das maximale Messregionen zwischen  $[-8,5^\circ; 8,5^\circ]$  erfasst, an dieser Stelle nicht weiter betrachtet. Für die Trennung der verschiedenen spektralen Bereiche durch Glasfilter ist in einigen Fällen jedoch mehr als eine Filterkameramessung nötig, wenn ausschließlich Langpass-Glasfilter zum Einsatz kommen. In diesem Zusammenhang wurde in [30] auch bewiesen, dass die Standard-Bandpass-Glasfilter der verwendeten Farbkamera [60] die Amplitudenvariationen von üblichen LED-Chips sehr gut beschreiben und dementsprechend die Farbregionen im Fernfeld in akzeptabler Weise trennen können. Zur Minimierung der Messunsicherheitsfaktoren werden diese Bandpass-Glasfilter der Farbkamera eingesetzt. Ansonsten müssten die nicht wellenlängenselektiven optischen Filter des Filterrades mit einem zusätzlichen Filter kombiniert werden. Dies erhöht die Messunsicherheit der berechneten spektralen Amplituden [75]. Die genauen Anforderungen an die spektrale Modellierung werden im Validierungskapitel (s. 7.1.2) genau definiert.

Die richtungsabhängigen Gewichtungsfaktoren  $A_i(\theta, \varphi)$  der modellierten Basisspektren werden folglich durch die Durchführung von Filterkameramessungen bestimmt, indem mindestens eine Aufnahme pro LED-Quelle mit den geeigneten optischen Filtern gemacht wird. Im vorliegenden Beispiel mit dem Testobjekt in der R-G-B-Kombination werden diese drei Farbregionen durch drei

unterschiedliche Filterkammermessungen getrennt. Zu diesem Zweck wurden die Standard-Bandpassfilter der Farbkamera verwendet, insbesondere die optischen Filter  $X_{kurz}$ ,  $X_{lang}$  und  $Y$ . Die erzielten Messergebnisse sind in Abbildung 6.5 zu sehen. Es ist zu erkennen, dass die verwendeten optischen Filter der Farbkamera teilweise auch andere spektrale Regionen im Vergleich zu den „perfekten“ Regionen von Abbildung 6.4 erfassen, was in der gesamten Methodik der Bestimmung der Gewichtungsfaktoren kaum Auswirkung aufzeigt.



**Abbildung 6.5:** Erfasste R-, G- und B-Farbregionen mit den Bandpass-Glasfiltern der Farbkamera  $X_{kurz}$ ,  $X_{lang}$  und  $Y$

Die mit der Kamera erfassten Pixel  $M_m(\theta, \varphi)$  können im grundlegenden Fall als der integrale Wert der optischen Faltung zwischen dem zu messenden Spektrum  $S_Z(\theta, \varphi, \lambda)$  und der wellenlängenabhängigen Transmissionscharakteristik des verwendeten optischen Filters  $\tau_m(\lambda)$  in einem bestimmten Wellenlängenbereich betrachtet werden. Dies wird mathematisch wie folgt beschrieben:

$$M_m(\theta, \varphi) = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S_Z(\theta, \varphi, \lambda) \cdot \tau_m(\lambda) \cdot d\lambda \quad (6.3)$$

Dieses Modell kann vervollständigt werden, indem bei dieser Integration sowohl das Transmissionsverhalten des CCD-Chips und des Objektivs als auch das Reflexionsverhalten des weißen Schirms berücksichtigt werden. Dies ermöglicht eine korrekte und komplette mathematische Modellierung des erfassten Pixelkamerawertes. Alle diese Parameter werden über den zusätzlichen Term  $\tau_{sys}(\lambda)$  berücksichtigt. Da das gemessene Spektrum  $S_z(\theta, \varphi, \lambda)$  außerdem in Basisspektren  $S_i(\lambda)$  zerlegt werden kann, und da die spektralen Winkelabhängigkeiten durch variable relative spektrale Amplituden  $A_i(\theta, \varphi)$  modelliert werden können, wird die Gleichung (6.3) mit dem PMBS-Konzept in die Gleichung (6.4) unter Berücksichtigung der spektralen Eigenschaften des kamerabasierten Messsystems  $\tau_{sys}(\lambda)$  erweitert:

$$M_m(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^n A_i(\theta, \varphi) \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S_i(\lambda) \cdot \tau_m(\lambda) \cdot \tau_{sys}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (6.4)$$

Dieser Vorgang wird für jede Filterkameramessung wiederholt, wobei die Anzahl der Filterkameramessungen abhängig von der Anzahl der modellierten Basisspektren ist. Am Beispiel des Testobjekts sind also drei Filterkameramessungen für eine Beschreibung der spektralen Amplitudenvariationen nötig, wie in Abbildung 6.5 bereits gezeigt. Dieser Messvorgang ergibt drei Gleichungen der Form von (6.4). Bei diesen Gleichungen sind alle Terme außer den Gewichtungsfaktoren  $A_i(\theta, \varphi)$  bekannt. Da die Anzahl der unbekanntenen Terme gleich der Anzahl der Gleichungen ist, können die Gewichtungsfaktoren mithilfe des Gleichungssystems bestimmt werden [30, pp. 43-44 vgl.].

### 6.3.1 GLEICHUNGSSYSTEM

Unter der Voraussetzung, dass Art und Anzahl  $n$  der zu messenden LED-Quellen bekannt sind, werden die Basisspektren anhand einer globalen spektralen Messung mit Hilfe der PMBS-Konzepte bestimmt. Die spektralen Abhängigkeiten im Winkelraum werden durch die variablen relativen Amplituden der Basisspektren modelliert und diese wiederum durch  $m$  Filterkammermessungen festgelegt. Zur Bestimmung der gesuchten Amplituden sind mindestens  $m = n$  Filterkammermessungen notwendig. Das komplette Messkonzept wird durch wiederholte Anwendung der Gleichung (6.4) mit den geeigneten optischen Filtern beschrieben. Dies ergibt  $m$  Gleichungen, wobei jede dieser Gleichungen idealerweise nur die Amplitudenvariationen einer einzelnen der  $n$  LED-Quellen beschreibt. Das resultierende lineare Gleichungssystem beschreibt vollständig die spektralen Variationen im Winkelraum der einzelnen LED-Quellen. Dieses Gleichungssystem kann in Matrixform geschrieben werden, um ihre mathematische Lösung zu vereinfachen. Im Fall des spektralen Normals mit drei spektralen Quellen (RGB) ergibt sich:

$$\begin{bmatrix} M_1(\theta, \varphi) \\ M_2(\theta, \varphi) \\ M_3(\theta, \varphi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1(\theta, \varphi) \\ A_2(\theta, \varphi) \\ A_3(\theta, \varphi) \end{bmatrix} \cdot M_{st} \quad (6.5)$$

wobei  $M_{st}$  eine Matrix ist, die die gesamte bekannte spektrale Information des verwendeten kamerabasierten Messsystems und des auf LED-Basis zu messenden Testobjekts enthält [30]. Für das R-G-B-Testobjekt ist diese Matrix gleich:

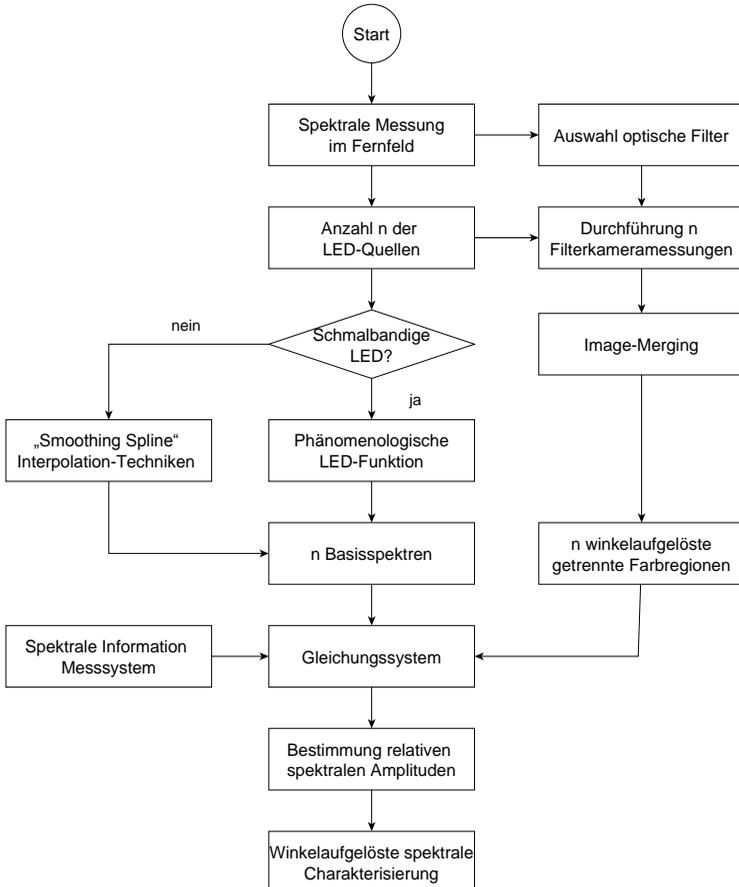
$$M_{s\tau} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^3 \int S_i(\lambda) \cdot X_{lang}(\lambda) \cdot \tau_{sys}(\lambda) \cdot d\lambda \\ \sum_{i=1}^3 \int S_i(\lambda) \cdot Y(\lambda) \cdot \tau_{sys}(\lambda) \cdot d\lambda \\ \sum_{i=1}^3 \int S_i(\lambda) \cdot X_{kurz}(\lambda) \cdot \tau_{sys}(\lambda) \cdot d\lambda \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

Bei der Matrix  $M_{s\tau}$  werden unter anderem die Transmissionskurven der verwendeten optischen Filter  $\tau_m(\lambda)$  und die spektrale Charakteristik jedes Basisspektrums berücksichtigt. Diese beiden Terme sind vom Messobjekt abhängig, sodass sie vor jeder Messung bestimmt werden müssen. Die Matrix  $M_{s\tau}$  enthält auch Komponenten, die vom Messsystem definiert bzw. festgelegt sind und infolgedessen für alle Messungen konstant bleiben, wie die wellenlängenabhängige Empfindlichkeitskurve des CCD-Chips der verwendeten Farbkamera und die Transmissionseigenschaften des Objektivs. Der weiße Schirm sollte an allen Orten das einfallende Licht gleichermaßen und wellenlängenunabhängig reflektieren; in der Realität müssen Abweichungen von diesem idealen Verhalten in  $M_{s\tau}$  charakterisiert und beachtet werden. Streulichteffekte beeinflussen testobjektabhängig ebenfalls die erfassten Filterkameraaufnahmen. Da diese Effekte stark an die zu messende Lichtstärkeverteilungskurve gebunden sind, ist eine pauschale Streulichtbeschreibung nicht möglich. Diese Effekte sollten aber bei der Bewertung der Ergebnisse mitberücksichtigt werden. Korrekturmöglichkeiten wurden in 5.2.2 präsentiert.

Abschließend können die unbekanntes Gewichtungsfaktoren  $A_i(\theta, \varphi)$  beim Gleichungssystem berechnet werden, indem die Inverse der  $M_{s\tau}$  Matrix bestimmt wird:

$$\begin{bmatrix} A_1(\theta, \varphi) \\ A_2(\theta, \varphi) \\ A_3(\theta, \varphi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1(\theta, \varphi) \\ M_2(\theta, \varphi) \\ M_3(\theta, \varphi) \end{bmatrix} \cdot M_{ST}^{-1} \quad (6.7)$$

Ein Flussdiagramm der bis jetzt durchgeführten Schritte bei der SCM-Methodik wird in Abbildung 6.6 dargestellt.



**Abbildung 6.6:** Schritte der SCM-Methodik für eine relative winkelaufgelöste spektrale Charakterisierung

Nach Berechnung der spektralen Gewichtungsfaktoren  $A_i(\theta, \varphi)$  kann nun allen Winkelkoordinaten der Kameramessungen eine entsprechende globale relative spektrale Charakteristik  $S_Z(\theta, \varphi, \lambda)$  unter Anwendung der Gleichung (6.1) zugeordnet werden. Diese durch Sensorfusion berechneten Spektren enthalten die korrekten relativen Verhältnisse zwischen den verschiedenen Basisspektren bei jedem Pixel der Verteilung. Diese erzeugte Information kann ohne Einschränkungen für die Berechnung der SMCF-Werte oder für die Bestimmung der entsprechenden Farbkoordinaten eingesetzt werden, da für diese Messgrößen nur die relative und nicht die absolute spektrale Charakteristik von Bedeutung ist. Sollte eine absolute spektrale Charakterisierung erforderlich sein, wie bei der numerischen Berechnung von spektralen Größen, z.B. Lichtstrom oder Farbwerte durch Integration der Spektren mit den entsprechenden Gewichtungsfunktionen, muss eine zusätzliche Normierung mit einem kalibrierten Spektrometer und/oder Colorimeter durchgeführt werden. Diese Normierung ergibt für jede Winkelkoordinate der Verteilung eine absolute spektrale Charakteristik, die äquivalente Informationen zu spektralen Messungen in einem bestimmten Abstand liefert.

Für die Bestimmung der absoluten spektralen Normierungsfaktoren wird die **spektrale Bestrahlungsstärke**  $S_M(\theta, \varphi, \lambda, r)$  des zu messenden Messobjekts in einem Abstand  $r = 10m$  (vor dem weißen Schirm) in bekannten Winkelkoordinaten  $\theta$  und  $\varphi$  mit einem Spektrometer in  $[Wm^{-2}nm^{-1}]$  erfasst. Bei dieser spektralen Messung müssen außerdem alle Teilspektren der LED-Quelle vorhanden sein, welche durch Basisspektren  $S_i(\lambda)$  modelliert werden. Das gemessene Spektrum in der Position  $\theta$  und  $\varphi$  in einem Abstand  $r$  enthält die korrekten absoluten Amplituden  $A_i(\theta, \varphi, r)$  in der gegebenen Position und kann als lineare Kombination der Basisspektren beschrieben werden.

Die Amplituden  $A_i(\theta, \varphi, r)$  der Basisspektren bei dieser Messung werden durch Optimierungsalgorithmen berechnet, indem die Differenz zwischen der kalibrierten spektralen Messung und der linearen Kombination der Basisspektren minimiert wird [30, pp. 48-50 vgl.]:

$$\min f(A_i) = \left| S_M(\theta, \varphi, \lambda, r) - \left( \sum_{i=1}^n A_i(\theta, \varphi, r) \cdot S_i(\lambda) \right) \right| \quad (6.8)$$

Nachdem die zur absoluten spektralen Messung passenden Amplituden bestimmt wurden, können die mit dieser spektralen Charakteristik **erwarteten** Filterkamerawerte  $M_{E,m}(\theta, \varphi, r)$  durch direkte Anwendung der Gleichung (6.5) berechnet werden. Hierfür wird die Matrix  $M_{s\tau}$  für die konkreten Filterkameramessungen wiedereingesetzt:

$$\begin{bmatrix} M_{E,1}(\theta, \varphi, r) \\ \vdots \\ M_{E,m}(\theta, \varphi, r) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1(\theta, \varphi, r) \\ \vdots \\ A_n(\theta, \varphi, r) \end{bmatrix} \cdot M_{s\tau} \quad (6.9)$$

Die auf diese Weise berechneten erwarteten Pixelkamerawerte werden nun für die Bestimmung von Gewichtungsfaktoren  $G_m$  pro Filterkameramessung verwendet. Die Gewichtungsfaktoren  $G_m$  verankern die erfassten Kameramessungen  $M_m(\theta, \varphi, r)$  mit den entsprechenden berechneten erwarteten Kameramessungen  $M_{E,m}(\theta, \varphi, r)$  an der Position der durchgeführten spektralen Messung:

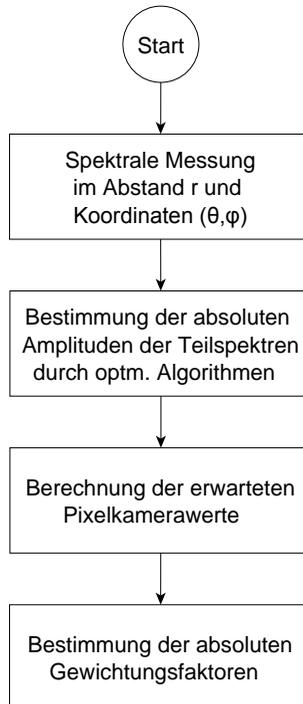
$$\begin{bmatrix} M_{E,1} \\ \vdots \\ M_{E,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & G_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_1 \\ \vdots \\ M_m \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

Da sowohl die erwarteten als auch die erfassten Filterkamerawerte bei diesen Winkelkoordinaten bekannt sind, werden die absoluten Gewichtungsfaktoren wie folgt direkt berechnet:

$$G_m = \frac{M_{E,m}(\theta, \varphi, r)}{M_m(\theta, \varphi, r)} \quad (6.11)$$

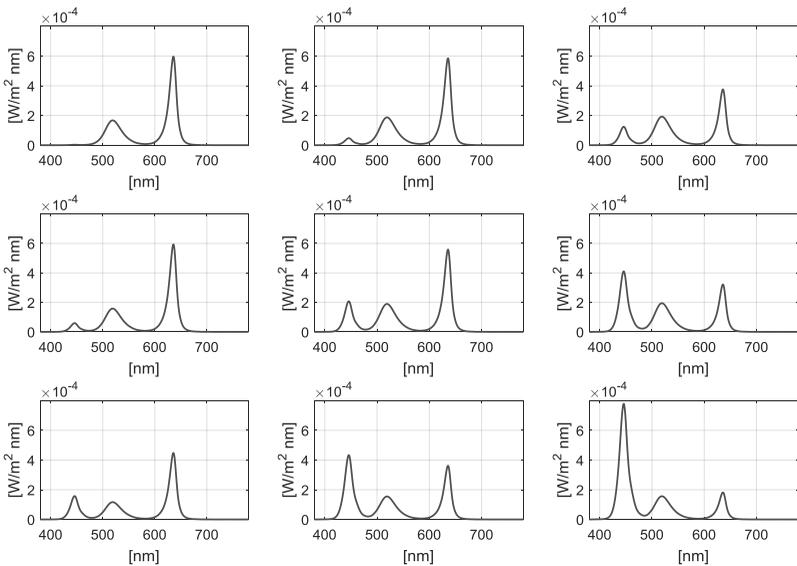
Abschließend wird jede Filterkameraaufnahme mit dem entsprechenden Gewichtungsfaktor multipliziert, um nach der Durchführung der gesamten Methodik die richtigen **absoluten** spektralen Charakteristiken an jedem Punkt der Verteilung zu bekommen.

$$\begin{bmatrix} A_1(\theta, \varphi) \\ \vdots \\ A_m(\theta, \varphi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & G_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_1(\theta, \varphi) \\ \vdots \\ M_m(\theta, \varphi) \end{bmatrix} \cdot M_{sr}^{-1} \quad (6.12)$$



**Abbildung 6.7:** Schritte für eine absolute Normierung der modellierten spektralen Werte

Da die absoluten Gewichtungsfaktoren  $G_m$  für jedes Pixel indirekt durch eine gemittelte spektrale Messung festgelegt werden, kann dieser Vorgang als eine mögliche Fehlerquelle bei den einzelnen pixelabhängigen generierten Spektren betrachtet werden. Dieser Fehler wird in Kapitel 7 durch Vergleich mit spektralen Messungen quantifiziert und analysiert. In Abbildung 6.7 werden abschließend die notwendigen Schritte für eine absolute Normierung der modellierten Spektren zusammengefasst. In Abbildung 6.8 werden verschiedene generierte Spektren des RGB-Messobjekts in bestimmten Positionen der Lichtverteilung exemplarisch gezeigt, die mit der entwickelten **SCM-Methodik** modelliert wurden.

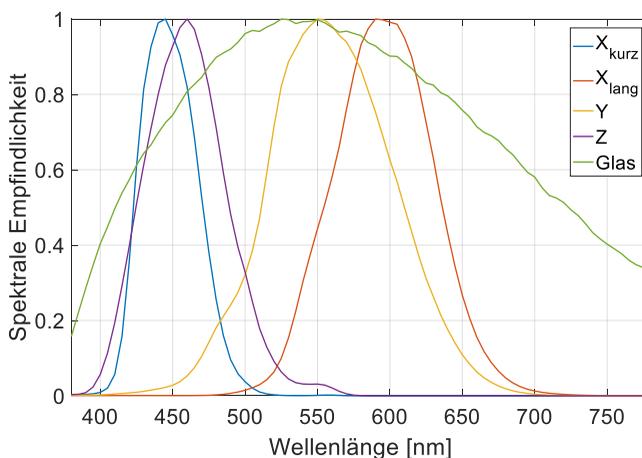


**Abbildung 6.8:** Beispiele von erzeugten spektralen Charakteristiken des Testobjekts an verschiedenen Winkelkoordinaten.

Im Fokus der gesamten Methodik steht die korrekte und komplette spektrale Charakterisierung des Messsystems, welche in der Matrix  $M_{s\tau}$  zusammengefasst wird. Konkrete Informationen dieser vollständigen spektralen Charakterisierung des kamerabasierten Messsystems werden im folgenden Abschnitt präsentiert.

### 6.3.2 CHARAKTERISIERUNG OPTISCHER FILTER

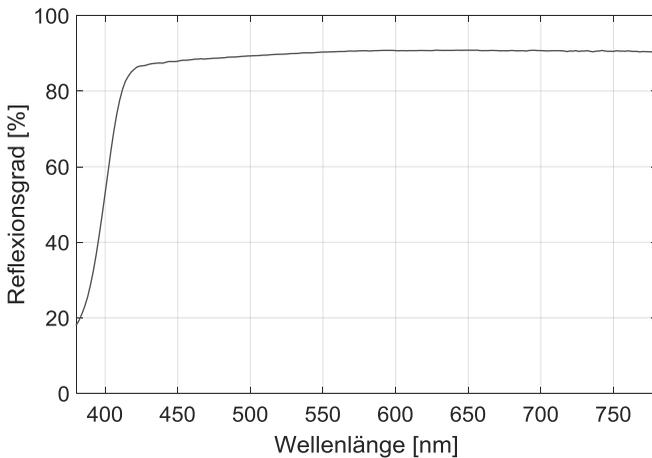
Die Matrix  $M_{s\tau}$  enthält spektrale Informationen bezüglich aller bekannten Komponenten des Messsystems und der untersuchten LED-Quelle. Für das Messsystem sind hier hauptsächlich die spektralen Transmissionskurven der für die spektrale Trennung der Farbbregionen im Fernfeld verwendeten optischen Filter, die Reflexionscharakteristik des zur indirekten Kameramessungen eingesetzten weißen Schirms und letztlich die spektralen Transmissionseigenschaften der verwendeten Kamera von Bedeutung. Bei den spektralen Eigenschaften der Kamera werden sowohl die Empfindlichkeitskurve der photosensitiven Elemente des CCD-Chips und die spektrale Transmissionscharakteristik des Kameraobjektivs berücksichtigt. Die in dieser Dissertation verwendete Leuchtdichtekamera [60] besitzt außerdem ein Filterrad mit vier Bandpass-Glasfiltern für Farbmessungen, einem möglichst nicht wellenlängenselektiven Glasfilter und einem IR-Filter. Die spektrale Empfindlichkeit der Kombination Optik-Filter-CCD Chip [77] wurde für jede Position des Filterrades wellenlängenabhängig durch den Kamerahersteller gemessen. Die gesamte normierte spektrale Empfindlichkeit jeder Position des Filterrades ist in Abbildung 6.9 dargestellt.



**Abbildung 6.9:** Normierte spektrale Empfindlichkeit der optischen Filter der verwendeten Farbkamera [60]

Kameramessungen mit den vier Bandpass-Glasfiltern des Filterrades werden im Normalfall für die hochaufgelösten Farbmessungen eingesetzt, in dieser Arbeit jedoch ebenfalls für die Trennung der spektralen Regionen bei den Filterkameraaufnahmen der SCM-Methodik. In manchen Fällen können zusätzliche optische Filter für eine befriedigende spektrale Trennung erforderlich sein, wie z. B. bei zwei sehr nahe liegenden schmalbandigen Spektren, die die Filter der Farbkamera nicht trennen bzw. unterscheiden können. Hier wird der nicht wellenlängenselektive Glasfilter des Filterrades, im Abbildung 6.9 „Glas“ genannt, mit dem entsprechenden Langpass- oder Interferenzfilter kombiniert. Auf diese Weise ist die SCM-Methodik für die winkelaufgelöste spektrale Modellierung für eine Vielzahl von LED-Chips anwendbar. Die spektralen Eigenschaften dieser zusätzlichen Filter müssen auch bei der Matrix  $M_{s\tau}$  berücksichtigt werden. Wie in [30] beschrieben, kann die ideale Filterkombination

für die untersuchte LED-Quelle anhand von Monte-Carlo-Simulationen ausgewählt werden. Da normalerweise die Auswahl der passenden Filter durch Analyse des Spektrums der LED-Quelle ausreicht, wurden in dieser Arbeit sechs zusätzliche Langpass-Glasfilter und sechs Interferenzfilter spektral charakterisiert, die die herkömmlichen spektralen Bereiche von LED-Quellen trennen können. Sowohl das Transmissionsverhalten dieser ausgewählten Filter als auch die daraus resultierenden Ergebnisse der spektralen Modellierung sind in Anhang C.1 und C.2 zu finden.



**Abbildung 6.10:** Reflexionsgrad der verwendeten weißen Farbe des Schirmes

Zuletzt müssten die Reflexionseigenschaften des bei den indirekten Kameramessungen verwendeten weißen Schirmes betrachtet werden. Zur Vermeidung von Absorptionseffekten erhielt dieser Schirm einen Farbanstrich mit einer möglichst geringen wellenlängenselektiven Farbe. Dennoch wurde eine Reflexionsmessung von einer Probe der verwendeten weißen Farbe mit einem Spektrophotometer in einer

kleinen Ulbrich-Kugel vermessen und mit einer Referenzprobe (**Spectralon**) verglichen. Die erfassten wellenlängenabhängigen Reflexionsgradwerte sind in folgender Abbildung 6.10 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass Absorptionseffekte in kurzwelligen Bereichen stattfinden, die bei den Berechnungen einkalkuliert werden müssen. In Abbildung 6.11 wird das qualitative Reflexionsverhalten des mit einer weißen Lichtquelle beleuchteten Schirms gezeigt.

Letztlich muss die vom LED-Messobjekt abhängige spektrale Information bei der Matrix berücksichtigt werden. Mit der korrekten und kompletten spektralen Charakterisierung des Messsystems in der Matrix  $M_{s,r}$  werden die mit der SMC-Methodik numerisch erzeugten Spektren bestimmt.



**Abbildung 6.11:** Reflexionsverhalten des weißen Schirms

Die erzeugte winkelaufgelöste spektrale Information kann beispielsweise für die spektrale SMCF -Korrektur sowohl der mit dem entwickelten Messsystem erfassten kamerabasierten Farbmesswerte als auch der Colorimeter-Farbwerte eingesetzt werden. Diese durch Sensorfusion berechnete SMCF-Korrektur wird in dieser Arbeit als wichtiges Beispiel der Anwendbarkeit solcher Art von Techniken für die Erhöhung der Genauigkeit und Qualität von Standardmessgeräten eingesetzt.

## 6.4 SMCF

Das SMCF quantifiziert und korrigiert sowohl die Fehlanpassung der Realisierung mit optischen Filtern einer gegebenen Gewichtungsfunktion  $F(\lambda)$  im Vergleich zu der Definition dieser Funktion und ebenfalls im Verhältnis zur verwendeten Kalibrierquelle. Bei spektral integrierenden Farbmessungen wird versucht, die gesamte spektrale Empfindlichkeit des Empfängers durch optische Filterung so gut wie möglich an die Spektralwertfunktionen für den Normalbeobachter  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  und  $\bar{z}(\lambda)$  anzupassen. Bei kamerabasierten Messsystemen wird die spektrale Anpassung durch einzelne Bandpass-Glasfilter implementiert. Aus diesem Grund wird keine optimale spektrale Anpassung an die Gewichtungsfunktionen erreicht. Dies ergibt eine zu korrigierende spektrale Fehlanpassung, deren Korrektur vor allem erforderlich wird, wenn die Farbeigenschaften von schmalbandigen LED-Quellen zu bestimmen sind.

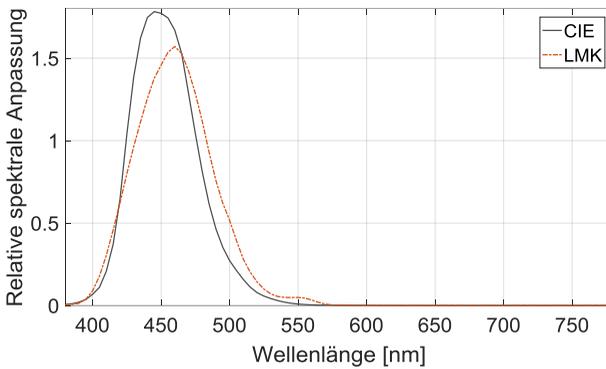
Wie bereits erwähnt, wird die spektrale Fehlanpassung des optischen Empfängers mit der Anwendung des SMCF überwunden. Für die Berechnung dieser Korrekturfaktoren werden also die mit dem Sensorfusionsansatz modellierten Spektren eingesetzt. Stand der Technik ist, die im Filterrad enthaltenen Bandpass-Glasfilter der Kamera (siehe Abbildung 6.9) zu kombinieren, um Kameraaufnahmen mit möglichst geringer spektraler Fehlanpassung zu erfassen. Dies wird durch die lineare Kombination der relativen spektralen Empfindlichkeiten der Bandpass-Glasfilter mit den passenden Faktoren erreicht. Hierzu werden mit der Anwendung von Optimierungsalgorithmen die Faktoren  $g_i$  determiniert, die die Differenz zwischen der entsprechenden Spektralwertfunktion und der gewichteten linearen Summe der einzelnen Filterfunktionen minimieren. Da im

Filterrad der Kamera vier Bandpass-Filter zur Verfügung stehen, werden vier Faktoren  $g_i$  gesucht. Dies wird beispielsweise für die Spektralwertfunktion  $Z$  in folgender Gleichung gezeigt:

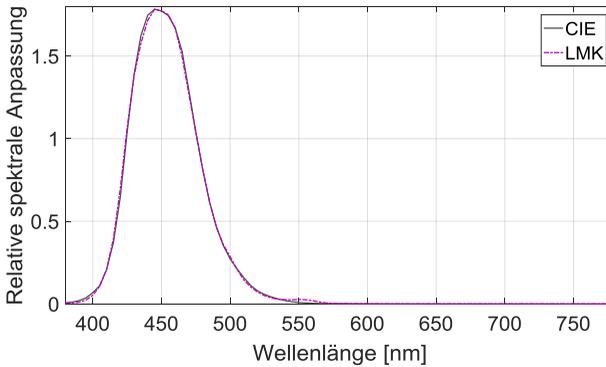
$$\min f(g_i) = |Z - (g_1 X_{kurz} + g_2 X_{lang} + g_3 Y + g_4 Z)| \quad (6.13)$$

Nach der Bestimmung der vier Faktoren, die diese Differenz für den entsprechenden Farbkanal minimieren, werden die Filterkameraaufnahmen von den Filtern  $X_{kurz}$ ,  $X_{lang}$ ,  $Y$  und  $Z$  gewichtet und mit den  $g_i$  Faktoren kombiniert. Hier ergibt sich die Frage, wie diese numerisch bestimmten Faktoren die Messunsicherheit der erfassten Bilder beeinflusst und wie diese quantifiziert werden könnte. Außerdem bleibt trotz der verbesserten spektralen Anpassung durch die lineare Kombination der Filter immer eine zu korrigierende Fehlanpassung, die mit dem SMCF bearbeitet werden muss.

Die direkte Alternative ist, einzelne Bandpass-Filter einzusetzen, die einen ähnlichen spektralen Verlauf zu den Spektralwertfunktionen besitzen. Ohne die Verwendung einer Partialfilterung stellt dies eine Herausforderung dar. Dennoch bleibt die resultierende spektrale Fehlanpassung mittels SMCF korrigierbar. In Abbildung 6.12 ist deutlich zu erkennen, wie die lineare Kombination der vier Filter eine niedrigere spektrale Fehlanpassung im Vergleich zur Anwendung eines einzelnen Bandpassfilters beispielweise für den  $Z$ -Kanal verursacht. Hier ist wichtig zu betonen, dass die Fehlanpassung für diesen Kanal am kritischsten ist. Für die restlichen drei Kanäle ist der Unterschied zwischen beiden Alternativen visuell schwer zu erkennen, sie ist aber vorhanden und muss korrigiert werden.



a)



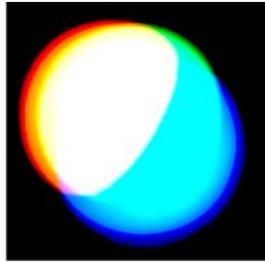
b)

**Abbildung 6.12:** Vergleich der erreichten spektralen Anpassung für den Z-Kanal, wenn a) nur ein Bandpass-Filter oder b) die lineare Kombination aller vier Filter verwendet wird

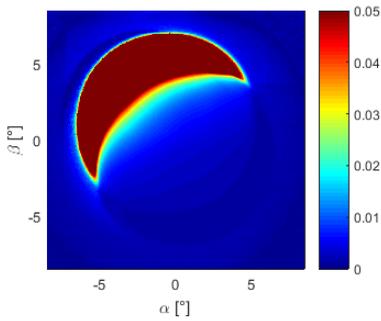
Unabhängig von der verwendeten Technik zur spektralen Anpassung bleibt der resultierende spektrale Fehler zu korrigieren. Hierzu ist die mit der SCM-Methodik generierte winkelaufgelöste spektrale Information der untersuchten LED-Quellen für die Berechnung des

SMCF erforderlich. Für eine bessere Visualisierung der winkelabhängigen spektralen Korrekturfaktoren wird noch einmal das für Validierungszwecke entwickelte Testobjekt analysiert. Die berechneten SMCF-Korrekturfaktoren sind für die untersuchte Farbverteilung in Abbildung 6.13 dargestellt. Hier wurde für die vier Kanäle, d.h. für  $X_{kurz}$ ,  $X_{lang}$ ,  $Y$  und  $Z$ , die Differenz zur Einheit der spektralen Fehlanpassung im Betrag berechnet. Die relativen spektralen Empfindlichkeitsfunktionen wurden mit der linearen Kombination aller Filterkurven berechnet. Diese sind im Anhang B.1 zu finden. Die resultierenden Betragsbilder quantifizieren die relative Fehlanpassung und zeigen, in welchen spektralen Bereichen die größeren Abweichungen stattfinden. So wird zum Beispiel deutlich, dass der  $Y$ -Farbkanal die größeren Messabweichungen im blauen spektralen Bereich zeigt, in einer Größenordnung von 5%. Dieselbe Analyse kann für jeden Farbkanal durchgeführt werden, um die spektrale Fehlanpassung des verwendeten Farbmessgeräts zu charakterisieren.

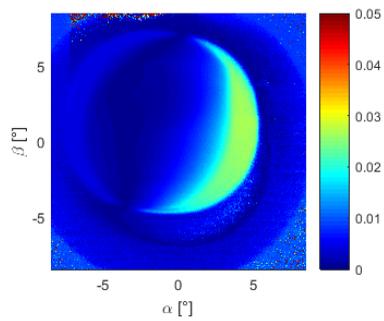
Im Fall einer perfekten spektralen Anpassung nimmt das SMCF einen Wert gleich eins an. Dies bedeutet, dass keine Korrektur der erfassten Farbwerte nötig ist. Aus der Analyse der berechneten SMCF-Werte ergibt sich die Korrekturrichtung. SMCF-Werte, die größer als eins sind, bedeuten, dass höhere Kamerafarbwerte als eigentlich korrekt gemessen wurden. Umgekehrt entsprechen Werte kleiner als eins zu niedrigen Messwerten. Eine Division der gemessenen Farbwerte durch die entsprechenden Korrekturfaktoren liefert direkt die korrigierten Farbwerte (siehe Sektion 2.1.2).



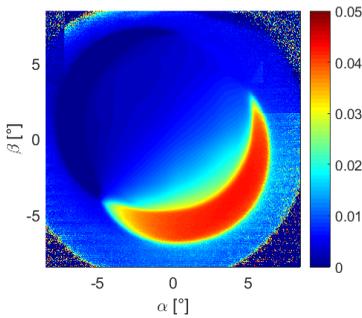
X kurz



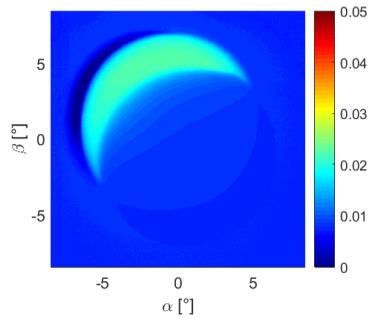
X lang



Y



Z



**Abbildung 6.13:** Analysierter Betrag der spektralen Fehlanpassung der Farbkanäle beim untersuchten R-G-B-Testobjekt

Eine komplette Messunsicherheitsanalyse der mit der SCM-Methodik berechneten SCMF-Werte wird im folgenden Kapitel mit den Konzepten von 4.4.1 durchgeführt und die entsprechenden Ergebnisse werden vorgestellt.

## **6.5 ZUSAMMENFASSUNG**

In diesem Kapitel wurden die Messkonzepte und benötigten Schritte für die Implementierung der SCM-Methodik vorgestellt. Diese Methodik erlaubt eine numerisch winkelaufgelöste spektrale Modellierung von LED-Quellen im Fernfeld. Hierzu werden Filterkammermessungen mit einer spektralen Messung fusioniert.

Hauptbestandteil der Methodik ist das in Sektion 5.1 beschriebene Messsystem, das indirekte Licht- und Farbverteilungsmessungen möglich macht, indem Aufnahmen eines Schirmes mit einer Leuchtdichtekamera mit verschiedenen optischen Filtern und einem Goniometer kombiniert werden. Die Streulicht-Problematik von kamerabasierten Messsystemen wurde durch ein Blendensystem und eine Streulicht-Charakterisierung reduziert.

Für die numerische Berechnung der winkelabhängigen Spektren wurden die für Nahfeld-Messungen entwickelten Konzepte von Rotscholl et al. für Fernfeld-Kammermessungen erweitert. Hierzu wurde sowohl die PMBS-Methodik mit indirekten Filterkammermessungen verwendet als auch das resultierende Gleichungssystem mit den absoluten Gewichtungstechniken von [30] für Fernfeld-Filterkammermessungen erweitert und softwaretechnisch implementiert. Hauptanwendung der auf Sensorfusion Basis hochaufgelösten

generierten spektralen Information ist in dieser Arbeit die Korrektur der Fehlanpassung von kamerabasierten Systemen.

Die vorliegende Arbeit und die Dissertation von Rotscholl [30] sind Teile eines gemeinsamen Forschungsprojekts. Beide Arbeiten wurden im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projektes *„Entwicklung von Qualitätsmerkmalen, Bewertungsmethoden und Standards für intelligente LED-Beleuchtungslösungen (UNILED II)“* durchgeführt.

## Kapitel 7

# VALIDIERUNG

*In diesem Kapitel werden die vorher beschriebenen Messkonzepte und Messtechniken anhand von Licht- und Farbmessungen bestätigt. Hierzu wird das für Validierungszwecke entwickelte Testobjekt, das durch bekannte und stabile photometrische Größen gekennzeichnet ist, mit der vorgestellten Sensorfusionsfarbmesstechnik gemessen. Dafür werden das Image-Merging-Verfahren, die generierte winkelaufgelöste spektrale Information und die spektral korrigierten Farbwerte mit herkömmlichen Messtechniken verglichen. Ein LED-Automobilscheinwerfer wird mit der SCM-Methodik ebenfalls farbmesstechnisch charakterisiert und mit dem SMCF korrigiert, um die Bedeutung der entwickelten Farbmesstechnik darzustellen. Abschließend werden die Ergebnisse unter Berücksichtigung der Messunsicherheit ausgewertet.*

### 7.1 VALIDIERUNGSMESSUNGEN

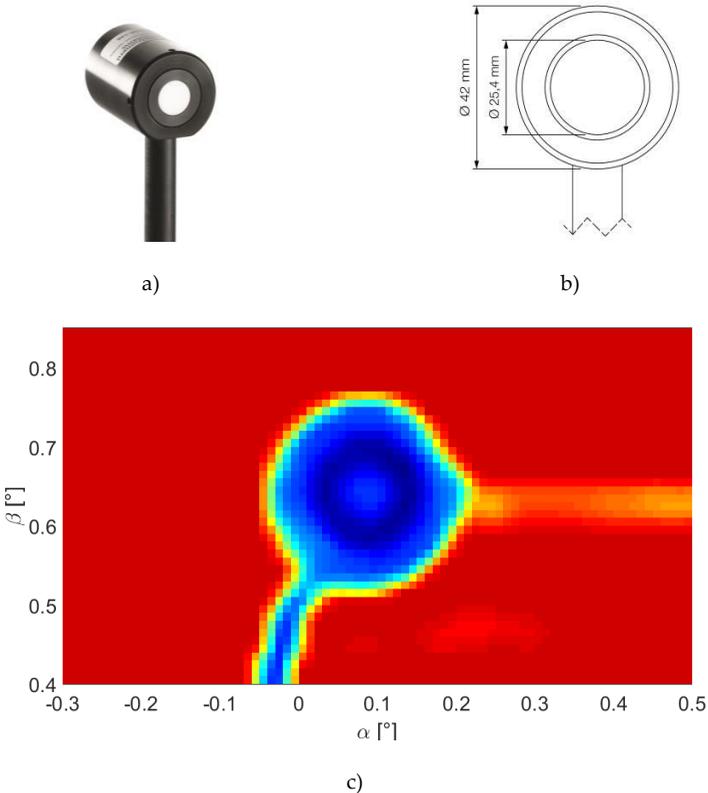
Die Gültigkeit des neuartigen kamerabasierten Messkonzepts soll durch die Anwendung eines multidimensionalen Normal bestätigt werden. Da eine Messunsicherheitsanalyse von den kombinierten Filterkameramessungen besonders komplex aufgrund der großen Anzahl der Kameramodellparameter ist, wird das in Kapitel 5.3 vorgestellte multidimensionale Normal für eine Validierung der kompletten Sensorfusionsmesstechnik verwendet. Dieses Messobjekt

ist durch stabile photometrische und spektrale Eigenschaften definiert und wird für die Gesamtheit der Validierungsmessungen verwendet, indem verschiedene herkömmliche LED-Farbkombinationen und Blendensysteme für die Generierung von abstandabhängigen Farbeffekten und Mischfarben zum Einsatz kommen.

Die Validierung des Image-Merging-Messverfahrens wird durch den Vergleich der zusammengeführten kamerabasierten Licht- bzw. Farbverteilungskurve einerseits mit der mathematischen Modellierung dieser Lichtverteilung und andererseits mit der erfassten Verteilung einer klassischen scannenden Methode vorgenommen. Die mit der SCM-Methodik erzeugten winkelaufgelösten Spektren müssen mit spektralen Messungen unter Beachtung der in 4.4 modellierten Messunsicherheit verglichen werden. Zu diesem Zweck werden spektrale Messungen mit einem Array-Spektrometer in verschiedenen Winkelkoordinaten in einem Abstand von ca. 10 m durchgeführt. Ebenfalls werden die aus modellierten und gemessenen Spektren resultierenden Farbkoordinaten in bestimmten Punkten der Verteilung unter Berücksichtigung der  $u'v'$ -Kreise verglichen.

Da der verwendete Messplatz kein integriertes Spektrometer an einer festen Position des Schirmes besitzt, wird die Einkoppeloptik des Spektrometers so nah wie möglich an der Schirmoberfläche mittels einer mechanischen Halterung platziert. Die Winkelkoordinaten dieser spektralen Messung werden mit Hilfe von Kameramessungen festgelegt, indem dieselbe Entzerrung und Geometriebestimmung des Image-Merging-Verfahrens angewendet wird. Sowohl die Diffusor-Oberfläche zur Streuung der einfallenden Lichtstrahlung bei der verwendeten Einkoppeloptik des Spektrometers als auch der zu Validierungszwecken eingesetzte Dreibereichscolorimeter bzw. Photometer entspricht mehreren Kamerapixeln. Dies bedeutet, dass bei

einer photometrischen oder spektralen Messung die Messwerte von mehreren Kamerapixeln gemittelt werden müssen, um vergleichbare Messwerte zu bekommen.



**Abbildung 7.1:** a) Verwendete Einkoppeloptik EOP 120 [24], b) technische Zeichnung [24] und c) gezoomtes Kamerabild mit Winkelkoordinaten

Die Einkoppeloptik des verwendeten Spektrometers besitzt eine kreisförmige Diffusor-Oberfläche mit einem Durchmesser von  $25,4 \text{ mm}$  (s. Abbildung 7.1 a) und b)). Diese Größe entspricht einem

Winkeldurchmesser von ca.  $0,15^\circ$  in  $10\text{ m}$  Abstand. Die resultierende Kreis-Oberfläche entspricht bei einer spektralen Messung wiederum der Mittelung von ca. 180 Pixeln, welche in Abbildung 7.1 c) gezoomt mit den entsprechenden Winkelkoordinaten gezeigt wird. Der verwendete Photometer- und der Farbmesskopf besitzen eine cosinus-angepasste Eintrittspupille mit einer Durchmessergröße von  $30\text{ mm}$ , die zu einem Winkeldurchmesser von ca.  $0,17^\circ$  in  $10\text{ m}$  Abstand äquivalent ist. Dieser Kreisoberfläche entspricht die Mittelung von ca. 215 Kamerapixeln bei einer Aufnahme.

Um einen Vergleich zwischen den kamerabasierten Messungen und den entsprechenden Spektrometer-, Photometer- oder Farbmesskopfmessungen zu ermöglichen, müssen die erfassten Kamerabilder mit der passenden Anzahl von Pixeln jeweils gemittelt werden. Hierfür werden Maskenkonzepte der Bildverarbeitung eingesetzt. Während die Kameraaufnahmen mit einer typischen Winkelauflösung von  $0,01^\circ$  erfasst werden, werden sowohl die Photometer- als auch die Farbmessungen für Validierungszwecke mit einer für diese Techniken relativ hohen Winkelauflösung von  $0,1^\circ$  durchgeführt. Um äquivalente Messwerte bei den gewünschten Winkelkoordinaten unter Berücksichtigung der Diffusor-Oberfläche des Messgeräts zu bekommen, werden die Kameramessungen mit einer  $21 \times 21$ -Maske multipliziert und dann gemittelt. Diese Masken beachten nur die Pixel, die in der Detektoroberfläche enthalten sind.

Für die Validierung der in dieser Dissertation beschriebenen Messkonzepte und Messtechniken wird zunächst das Image-Merging-Verfahren geprüft. Daraufhin werden die erzeugten Spektren von verschiedenen herkömmlichen Farbkombinationen bei LED-Systemen mit der SCM-Methodik anhand spektraler Messungen validiert. Abschließend werden die daraus berechneten spektralen

Korrekturfaktoren in Abhängigkeit der spektralen Zusammensetzung analysiert und für die Korrektur der absoluten erfassten Messwerte eingesetzt.

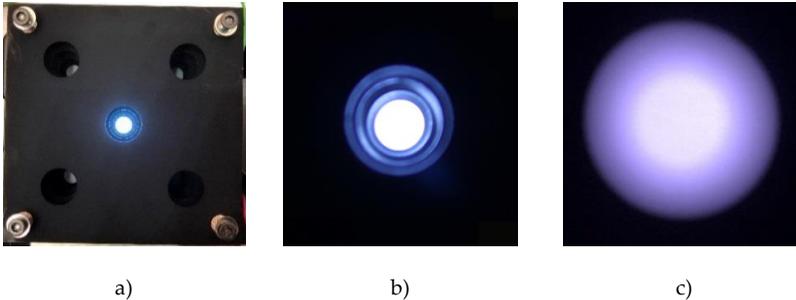
### 7.1.1 IMAGE-MERGING

Zur Validierung der konzipierten Image-Merging-Verfahren, die für das Zusammenfügen der Kameraaufnahmen mittels eines Kameramodells und geometrischer Informationen des Messsystems dient, wird das multidimensionale Normal in der Variante mit Ulbricht-Kugel und Diffusor eingesetzt. Hierzu wird eine Konfiguration mit sämtlichen LED der zentralen Blendenposition verwendet, wie in Abbildung 7.2 a) gezeigt. Es werden alle RGBW-LED betrieben, um spektrale Abhängigkeiten auszuschließen. In Abbildung 7.2 b) ist die homogene leuchtende Fläche anhand der Verwendung des Diffusors zu erkennen. Die Winkelinformation der erzeugten Lichtverteilung wird durch ein Blendensystem mit einem gesamten Öffnungswinkel von  $10^\circ$  generiert.

Die Lichtverteilung von Abbildung 7.2 c) wird mit einem scannenden Gonio-Photometer in einer Entfernung von  $10\text{ m}$  gemessen. Dieselbe Verteilung wird nachfolgend mit den kombinierten Aufnahmen der entwickelten kamerabasierten Messmethodik erfasst. Die daraus resultierenden winkelaufgelösten Lichtverteilungsmessungen werden sowohl relativ als auch absolut verglichen. Zu diesem Zweck wird das vorhandene Messsystem verwendet (siehe 5.1).

Der erste Schritt für die Durchführung beider Messmethoden besteht aus der korrekten Platzierung des Normals auf dem Tisch des Goniometers. Hierfür wird der Lichtschwerpunkt des Messobjekts mit

Hilfe von Kreuzlasern eingestellt, indem die Freiheitsgrade  $x$ ,  $y$  und  $z$  des Goniometertisches dementsprechend justiert werden. In diesem konkreten Fall befindet sich der Lichtschwerpunkt mittig auf der mittleren Blendenöffnung (s. Abbildung 7.3). Dieser Punkt entspricht dem Koordinatensystemursprung  $(0,0)$  der Fernfeldmessung.

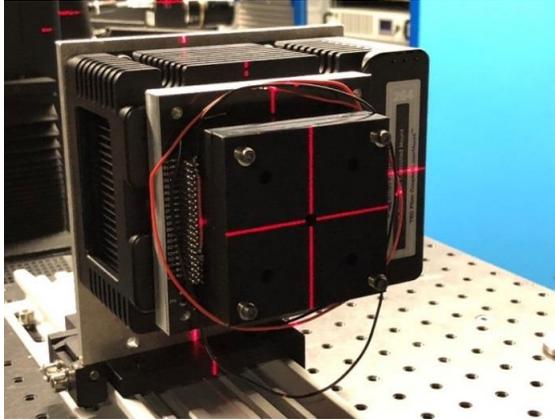


**Abbildung 7.2:** a) Verwendete Konfiguration des Normalen für die Validierung des Image-Mergings, b) direkte Ansicht der leuchtenden Fläche und c) Lichtverteilung in 10 m Abstand

Im Rahmen der Validierung muss die photometrische und kamerabasierte Messung nacheinander durchgeführt werden, ohne die Platzierung des Messobjekts zu verändern. Da der Lichtschwerpunkt per Hand justiert wird, wird die erfasste LVK im Fall einer neuen Montierung leicht verschoben. Diese Versetzung kann aber korrigiert werden, indem die Hauptstrahlungsrichtung der Leuchte bestimmt wird.

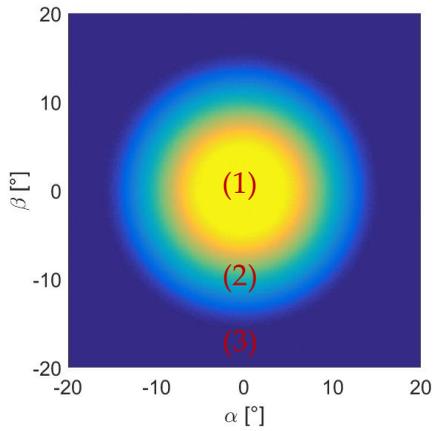
Ausgehend von der Geometrie der leuchtenden Fläche und des verwendeten Blendensystems des Messobjekts wird eine analytische Beschreibung der sich daraus ergebenden LVK bestimmt, wie in Kapitel 5.3 beschrieben. Für eine kreisförmige homogene leuchtende

Fläche (Cosinus-Strahler) und ein ebenfalls kreisförmiges und konzentrisches Blendensystem, wird die Lichtstärke in Abhängigkeit des Betrachtungswinkels und der gesehenen leuchtenden Fläche anhand Formel (5.12) und (5.14) charakterisiert.

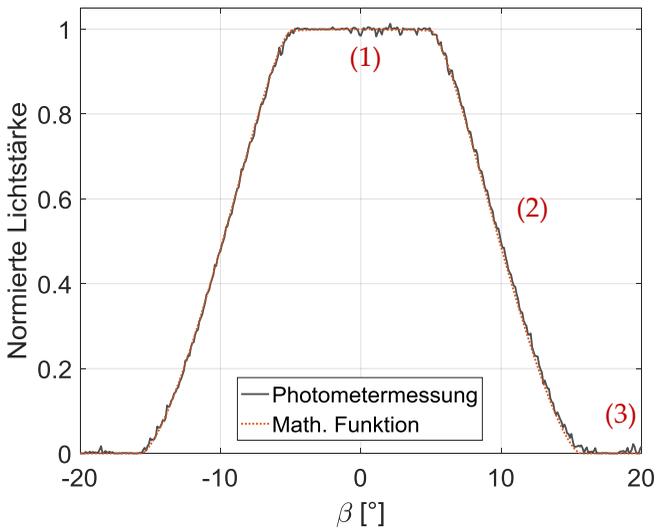


**Abbildung 7.3:** Bestimmung des Lichtschwerpunkt anhand eines Kreuzlasers.

Das scannende System entspricht dem Stand der Technik und wird als Referenzmessung verwendet. Das Messergebnis der goniometrischen Messung wird in Abbildung 7.4 a) präsentiert. Wie erwartet, wird eine rotationssymmetrische kreisförmige Lichtverteilung gemessen, bei der die sogenannten „Kern“- und „Halbschatten“-Bereiche zu erkennen sind. Der „Kern“ (1) beschreibt die Regionen der Verteilung, in denen ein hypothetischer Beobachter die gesamte leuchtende Fläche des Messobjekts sehen würde. Im Gegensatz dazu wäre diese Fläche in den „Halbschatten“-Bereichen (2) nur teilweise sichtbar. In den dunklen Bereichen (3) bzw. in den Bereichen, bei denen keine Messsignale gemessen werden, ist die leuchtende Fläche nicht mehr zu sehen.



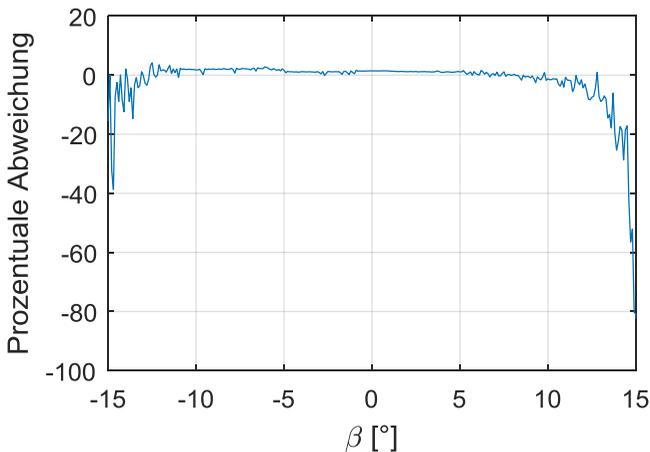
a)



b)

**Abbildung 7.4:** a) Winkel aufgelöste Photometermessung und b) Vergleich einer konstanten A-Ebene der Messung mit der theoretischen mathematischen Funktion

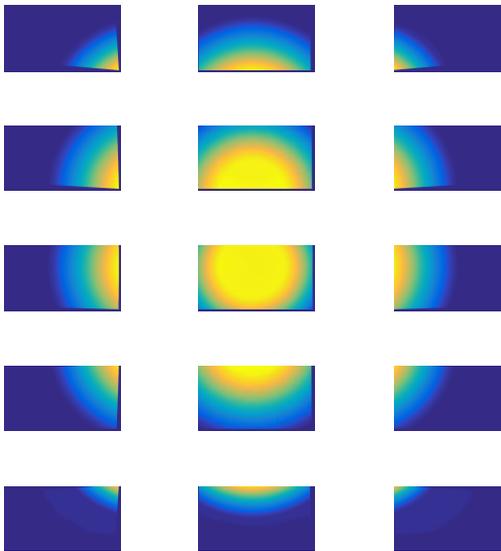
Diese drei Bereiche wurden in Zusammenarbeit mit [72] hergeleiteten mathematischen Ausdrücken beschrieben. Da die modellierte LVK symmetrisch ist, ist eine zweidimensionale Darstellung bzw. ein Schnitt der LVK an einer festen Winkelkoordinate für eine Analyse ausreichend. Dies wird in Abbildung 7.4 b) gezeigt, sowohl für die erfasste goniophotometrische Messung als auch für die mathematisch modellierte Verteilung. Während die mathematische Funktion in Abbildung 7.4 b) die Lichtverteilung in einem idealen Fall beschreibt, zeigt die goniophotometrisch erfasste Information Messrauschen. Dennoch ist deutlich zu erkennen, dass die mathematische Modellierung der Lichtverteilung geeignet ist.



**Abbildung 7.5:** Prozentuale Abweichung zwischen der goniophotometrischen Messung und deren Modellierung

Eine weitere Analyse kann über die relative Abweichung beider Kurven durchgeführt werden. Dies wird in Abbildung 7.5 für

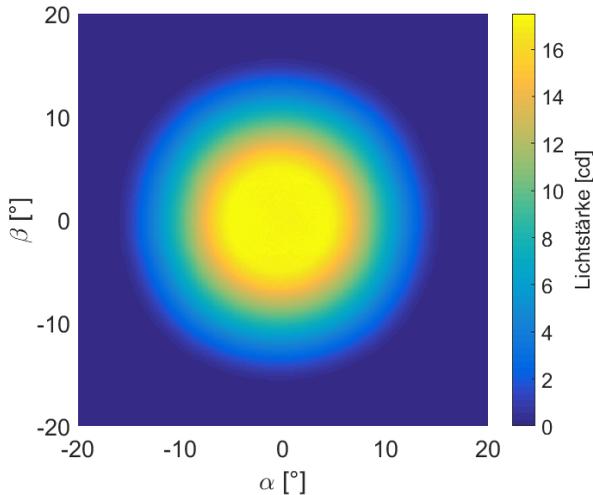
Winkelkoordinaten der „Kern“- und „Halbschatten“-Bereiche gezeigt. Es werden Abweichungen im Kernbereich  $[-5^\circ, 5^\circ]$  im Mittelwert von 1,14% festgestellt. Die Abweichungen werden in den „Halbschatten“-Bereichen größer (Mittelwert von ca. 2%), da hier größere Sensitivitäten aufgrund der zunehmenden Funktionssteigung vorhanden sind. In den Bereichen, in denen der mathematische Ausdruck Werte gleich Null annimmt und die photometrische Messung sehr kleine Messwerte erfasst, ist die relative Abweichung sehr hoch und liefert dementsprechend keine Validierungsinformationen.



**Abbildung 7.6:** Kameramessungen der Teil-LVK

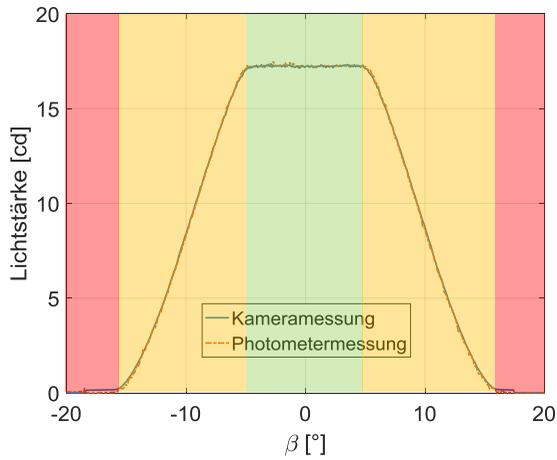
Die mathematische Modellierung der kreisförmigen LVK und die erfasste Referenzmessung werden nun mit den Messergebnissen der kamerabasierten Messtechnik verglichen, um das Zusammenfügen der Teil-LVK und die entsprechenden Verzerrungskorrekturen relativ und

absolut zu validieren. Für die komplette Erfassung der Lichtverteilung des Normals sind fünfzehn Kameraaufnahmen mit verschiedenen Betrachtungswinkeln erforderlich. Diese Kameraaufnahmen werden in Abbildung 7.6 dargestellt.

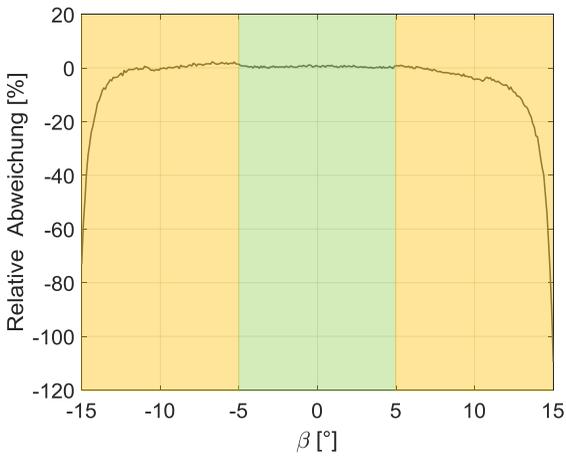


**Abbildung 7.7:** Kamerabasierte LVK-Messung

Der nächste Schritt besteht aus der Kombination dieser Reihe von Bildern in eine komplette Lichtverteilung, indem gemeinsame Winkelkoordinaten zwischen den Bildern gefunden werden. Hierfür müssen zuerst die Bilder entweder auf eine Kugeloberfläche mit einem 10 m großen Radius oder alternativ auf eine Referenzebene projiziert werden. Für die erste Variante sind dreidimensionale Interpolationstechniken und für die zweite Perspektiventzerrung jedes Bildes in Bezug auf eine Referenzebene erforderlich (s. 5.1.3).



a)



b)

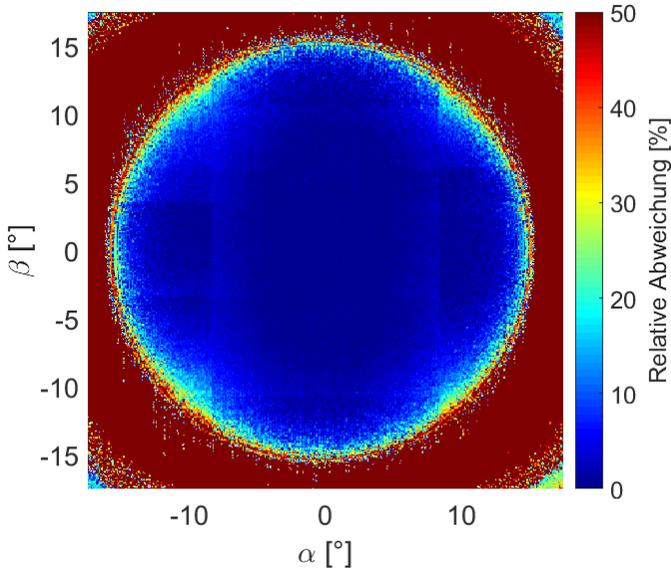
**Abbildung 7.8:** Vergleich der Messergebnisse von Photometer- und Kameramessungen: a) bei der vertikalen Ebene der optischen Achse und b) relative Abweichungen

Unabhängig von der verwendeten Variante zur Entzerrung der Perspektivendifferenzen zwischen den erfassten Teil-LVK liefern beide Techniken gleichwertige zusammengefügte Bilder bzw. die vollständige LVK der Lichtquelle. Die Ergebnisse der in dieser Arbeit als Image-Merging bezeichnete Methodik sind in Abbildung 7.7 dargestellt. Auf den ersten Blick ist sowohl die höhere Auflösung der Kameramethodik im Vergleich zu der goniophotometrischen Messung ( $0,01^\circ$  vs.  $0,1^\circ$ ) als auch die korrekte Erhaltung der kreisförmigen Geometrie bemerkbar. Die räumlich abhängigen Reflexionseigenschaften des weißen Schirms bei diesen Kameramessungen wurden bereits korrigiert (s. Kapitel 5.2.3).

Einen näheren Blick auf die mittlere vertikale Ebene der Lichtverteilung erlaubt Abbildung 7.8 a). Hier ist noch einmal sowohl die geometrische als auch die absolute Ähnlichkeit zwischen den Messergebnissen zu sehen. In Abbildung 7.8 b) wird die relative Abweichung beider Kurven dargestellt.

Letztlich wird ein Vergleich zwischen diesen kombinierten Kameraaufnahmen mit der goniophotometrischen Referenzmessung durchgeführt. Da die Messauflösung dieser Messungen unterschiedlich ist, müssen zuerst die höher aufgelösten Kamerapixel unter Betrachtung der Oberfläche des Empfängers gemittelt werden. Um einen globalen Vergleich zwischen den Messtechniken zu ermöglichen, wird die relative Abweichung jedes Messpunktes berücksichtigt. Diese Ergebnisse werden in Abbildung 7.9 dargestellt. Der „Kernbereich“ zwischen  $[-5^\circ, 5^\circ]$  zeigt messpunktabhängige Abweichungen im Mittelwert von 0,41% und maximal von 2,5%. Der „Halbschatten-Bereich“ zwischen  $[-10^\circ, -5^\circ]$  und  $[5^\circ, 10^\circ]$  ist durch Abweichungen im Mittelwert von 1,9% und maximal bis zu 6,5% charakterisiert. In den Messregionen mit niedriger Signalstärke ist die relative

Abweichung nicht mehr aussagekräftig, da kleine absolute Differenzen zwischen niedrigen Messwerten sehr hohe prozentuale Abweichungen zeigen. Hier machen sich außerdem sowohl die niedrigere Messauflösung als auch die vertikalen Artefakte bemerkbar. Diese vertikalen Artefakte, vor allem an den äußeren Kanten der Lichtverteilung, können durch die vertikale Bewegung des Goniometers bei der Datenerfassung erklärt werden. Bei einer Winkelauflösung von  $0,1^\circ$ , welche für scannende Systeme bereits sehr groß ist und sehr lange Messzeiten in Anspruch nimmt, sind die einzelnen Pixelelemente erkennbar.



**Abbildung 7.9:** Relative Abweichung zwischen kamerabasierter Messmethodik und Referenzmessung

Auffällig bleiben ebenfalls die Linien in Abbildung 7.9, bei denen die Bilder zusammengefügt werden. Dies kann durch Anwendung von

Glättungsfunktionen, wie z.B. cosinus- und sinusförmige Übergänge zwischen den Bildern, überwunden werden. Hier werden unterschiedliche Gewichtungsfaktoren am Anfang und am Ende der überlappenden Bilderregionen verwendet, um die scharfen Kanten zu minimieren. Diese Korrekturmöglichkeit entspricht dem Stand der Technik. Da sie aber die erfassten Kamerawerte willkürlich modifiziert, wird sie in dieser Arbeit nicht durchgeführt.

### **7.1.2 SPEKTRALE MODELLIERUNG**

Nachdem das Verfahren für die Kombination der Kameraaufnahmen für die komplette Erfassung von Lichtverteilungskurven validiert wurde, wird nun die spektrale Modellierung unter Verwendung des Normals untersucht. Zu diesem Zweck werden die auf Sensorfusionsbasis hochaufgelösten modellierten Spektren mit spektralen Messungen unter Beachtung der Messunsicherheit verglichen. Für die Analyse spektraler Effekte sind mathematisch beschreibbare LVK nicht mehr notwendig, da die verwendeten Diffusoren für die Erzeugung von homogenen leuchtenden Flächen die spektrale Information der LED beeinflussen. Das Normal wird also in der Variante ohne Ulbricht-Kugel und Diffusor verwendet. Ohne Diffusor werden keine perfekten kreisförmigen Farbverteilungen mit dem ebenfalls kreisförmigen Blendensystem erzielt, da die einzelnen LED nicht genau konzentrisch mit dem Blendensystem platziert sind. Dies ermöglicht die Erzeugung von stark geprägten Farbmischeffekten in verschiedenen Abständen durch die Kombination der fünf räumlich getrennten LED-Quellen mit dem Blendensystem. Für die spektrale Validierung der SCM-Methodik ist diese Eigenschaft von Bedeutung, da sie eine Analyse und einem

Vergleich von Spektren mit sehr unterschiedlichen spektralen Zusammensetzungen bietet, wie in Abbildung 6.8 gezeigt wurde.

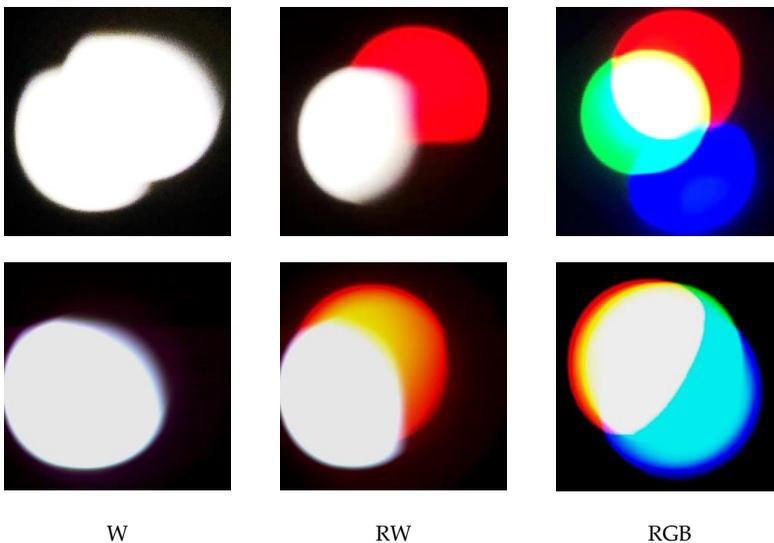
Die Eigenschaft des entwickelten spektralen Normals, Farbeffekte zu generieren, wird mit dem Ziel, herkömmliche LED-Farbkombinationen zu analysieren, verwendet. Hierfür werden diese Farbkombinationen sowohl mit der kamerabasierten SCM-Methodik vollständig farbmesstechnisch charakterisiert als auch die spektrale Fehlanpassung der verwendeten optischen Filterung in Abhängigkeit der gewichteten spektralen Zusammensetzung korrigiert. Konkret werden folgenden Farbkombination untersucht:

- Weiß (W): Kombination der spektralen Information einer blauen LED mit einer Leuchtstoffschicht (kalt weiß)
- Rot-Weiß (RW): Kombination von drei Grundspektren bzw. rot, blau und Leuchtstoff (warm weiß)
- Rot-Grün-Blau (RGB): bereits untersuchter Fall mit drei Teilspektren (weiß mit Farbrändern bzw. Farbschatten)

Denkbar wäre auch die Untersuchung der Grün-Weiß-Kombination (GW), die in Beleuchtungssystemen kaum zu finden ist, bzw. die Rot-Grün-Blau-Weiß-Kombination (RGBW), die für die Erzeugung von weißem Licht angewendet wird. Diese beiden Fälle werden in dieser Arbeit nicht weiter untersucht, da eine Trennung der Farbregionen im Fernfeld durch Filterkammermessungen kaum realisierbar ist. Dies gilt insbesondere bei der Trennung des stark überlappenden spektralen Anteils der grünen LED vom Leuchtstoffspektrum. Eine spektrale Trennung in Basisspektren durch die Anwendung der PMBS-Methodik ist mit größerem Aufwand möglich. Mathematisch bleibt die vorgestellte SCM-Methodik gültig. Die resultierende Modellierung der

spektralen Amplitudenvariationen mittels der Grauwerte der Filterkammermessungen zeigt jedoch größere Messunsicherheiten und ist in manchen Fällen aufgrund der überlappenden Basis-Spektren fehlerhaft. Eine quantitative Analyse dieser Effekte ist in [30] gezeigt.

Die Farbkombinationen W, RW und RGB werden mit dem Messobjekt erzeugt, sodass spezifische Farbeffekte auf dem weißen Schirm entstehen. Diese Farbeffekte werden mit der SCM-Methodik modelliert und sind in Abbildung 7.10 sowohl im Nahfeld des Beleuchtungssystems als auch im Fernfeld in 10 m Abstand dargestellt.



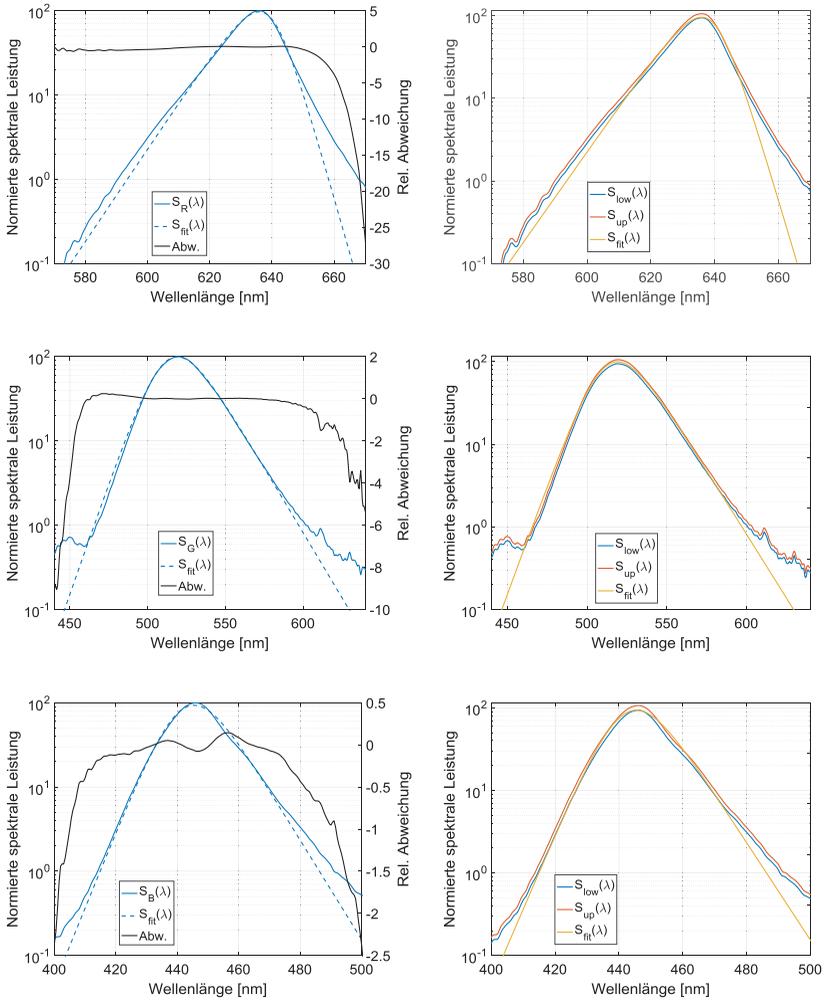
**Abbildung 7.10:** Untersuchte Farbkombinationen in ca. 30cm (erste Reihe) und 10m Abstand (zweite) vom Messobjekt

Für die Durchführung einer spektralen Validierung der PMBS- und der SCM-Methodik müssen zuerst die angefitzten Basisspektren und

die entsprechenden modellierten Amplituden der genannten Farbkombinationen mit reellen spektralen Messungen an vorher definierten Winkelkoordinaten verglichen werden. Hierfür werden die Spektren von mehreren Pixeln gemittelt, die der Diffusor-Oberfläche der Einkoppeloptik des Spektrometers im 10 m Abstand entsprechen. Die Messunsicherheit der modellierten relativen Amplituden der Teilspektren wird durch den Vergleich mit der Messunsicherheit der spektralen Messungen geschätzt. Es wird angenommen, dass die modellierten Spektren validiert sind, wenn diese sich im Überdeckungsintervall der durch Monte-Carlo-Simulationen definierten spektralen MU des Spektrometers befinden.

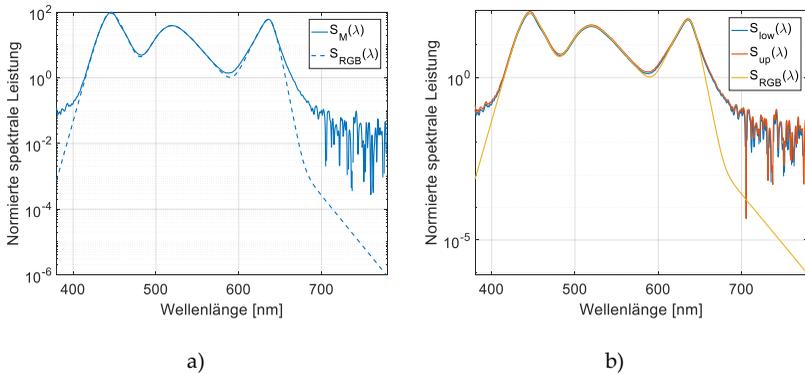
Zuerst wird die R-G-B-Farbkombination, die bereits in Kapitel 6.3 betrachtet wurde, nun in verschiedenen Winkelkoordinaten spektral validiert. Das bedeutet, dass die gemessenen Spektren  $S_M(\theta, \varphi, \lambda)$  mit der Summe der gewichteten Teilspektren  $S_{RGB}(\theta, \varphi, \lambda)$  an denselben Winkelkoordinaten  $\theta$  und  $\varphi$  verglichen werden. Die Teilspektren werden anhand einer globalen spektralen Messung durch Anfitten bestimmt. Zu Validierungszwecken werden die R-G-B-Teilspektren ebenfalls durch Anwendung einer passenden Abdeckung der örtlich getrennten LED-Quellen des Messobjekts einzeln gemessen. Diese spektralen Verteilungen entsprechen den „perfekten“ Teilspektren, da sie das Resultat einer direkten Messung sind. Nach der Durchführung der entsprechenden spektralen Messunsicherheitsanalyse werden diese spektralen Messungen mit den mathematisch modellierten Basisspektren verglichen. Hier werden sowohl das Überdeckungsintervall der berechneten Messunsicherheit als auch die absolute relative Abweichung der einzeln gemessenen und modellierten Spektren miteinander betrachtet. Die Ergebnisse dieses Vergleichs für die rote, grüne und blaue LED-Quelle sind in Abbildung 7.11 dargestellt.

## 7.1 Validierungsmessungen



**Abbildung 7.11:** Vergleich der gemessenen Spektren der einzeln LED mit den anhand phänomenologischer Funktionen modellierten R-, G- und B-Teilspektren (von oben nach unten)

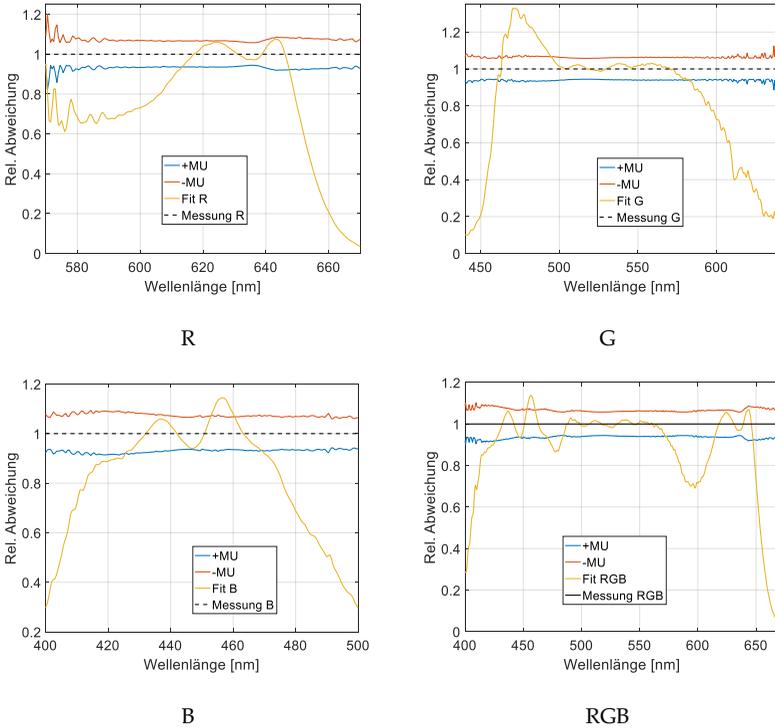
Die linke Spalte der Abbildung 7.11 stellt die gemessenen einzelnen Spektren R, G und B (durchgezogene Linie) und die aus einer globalen Messung resultierenden gefitteten Basisspektren (unterbrochene Linie) auf 100% normiert und in logarithmischer Skalierung dar. Die schwarz durchgezogene Linie zeigt in diesen Diagrammen die relative Abweichung beider Kurven. Auf den ersten Blick ist deutlich zu erkennen, dass große spektrale Abweichungen für Messsignale kleiner als 1% vorliegen. Hier stellt sich zunächst die Frage, ob diese Genauigkeit für Farbhomogenitätsanalysen ausreichend ist. Um diese Frage zu beantworten, werden die Farbkoordinaten und Farbabstände zwischen den gemessenen und modellierten Spektren unter Beachtung der MU mit den entsprechenden Kreisen in dem  $u'v'$ -Farbsystem betrachtet. Die rechte Spalte in der Abbildung 7.11 stellt das Ergebnis der durchgeführten Messunsicherheitsanalyse dar. Hier ergeben sich eine „obere“ (rote Linie) und eine „untere“ (blaue Linie) Grenze, welche eine wellenlängenabhängige Messunsicherheit der spektralen Messungen mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% beschreiben. Dies entspricht dem Überdeckungsintervall der mit Hilfe der MCM-Methodik berechneten spektralen Messunsicherheit der einzeln gemessenen LED-Spektren. So lange die modellierten Basisspektren (gelbe Linie) sich zwischen diesen beiden Grenzlinien befinden, könnten diese Spektren aus direkten spektralen Messungen stammen. Eine erste Analyse der Diagramme ergibt, dass dies nur teilweise für die modellierten spektralen Messwerte zutrifft, vor allem nicht für Messsignale unterhalb 1%. Die großen Abweichungen in diesem Bereich können jedoch durch Effekte wie Streulicht innerhalb des Messgeräts und elektronisches Rauschen erklärt werden. Wie ist aber die Situation beim gesamten RGB-Spektrum? Das gemessene komplette Spektrum und die Summe der modellierten Teilspektren werden nun miteinander verglichen.



**Abbildung 7.12:** Vergleich des gemessenen Spektrums mit der gewichteten Summe der Teilspektren

In Abbildung 7.12 a) werden in logarithmischer Skalierung die gemessenen und modellierten RGB-Spektren zuerst ohne Berücksichtigung der Spektrometer-MU gezeigt. Hier ist deutlich zu erkennen, dass Streulichteffekte bei der spektralen Messung innerhalb des verwendeten Messgerätes vorhanden sind und dass die minimal gemessenen Messwerte bzw. die Empfindlichkeit des Array-Spektrometers sich im Bereich der „Least Significant Bits“ (LSB) und der Rauschsignale beim Messgerät befinden. Im Gegensatz dazu kann die Summe der modellierten Basisspektren beliebig niedrige Messsignale modellieren, die durch Streulichteffekte nicht beeinflusst werden. Hier ergibt sich die Frage, ob die mathematischen Modelle der spektralen Verteilung sogar Messwerte liefern, die näher an den wahren spektralen Werten des Spektrums liegen könnten. Unter Berücksichtigung des resultierenden Überdeckungsintervalls befindet sich die Summe der Teilspektren überwiegend innerhalb des „acceptance interval“ (s. Abbildung 7.12 b)). Die größeren

Abweichungen ergeben sich in den Wellenlängenbereichen, bei denen sich die einzelnen Spektren überlappen, und bei Messsignalen unterhalb 1%.



**Abbildung 7.13:** Relative Abweichung der modellierten Spektren relativ zu Messungen unter Beachtung der MU

Werden die Abweichungen der modellierten Spektren im Überdeckungsintervall genauer betrachtet, ergibt sich **Abbildung 7.13**. Die spektralen Bereiche, bei denen die modellierten Basisspektren sich außerhalb des Überdeckungsintervalls befinden, sind hier eindeutig

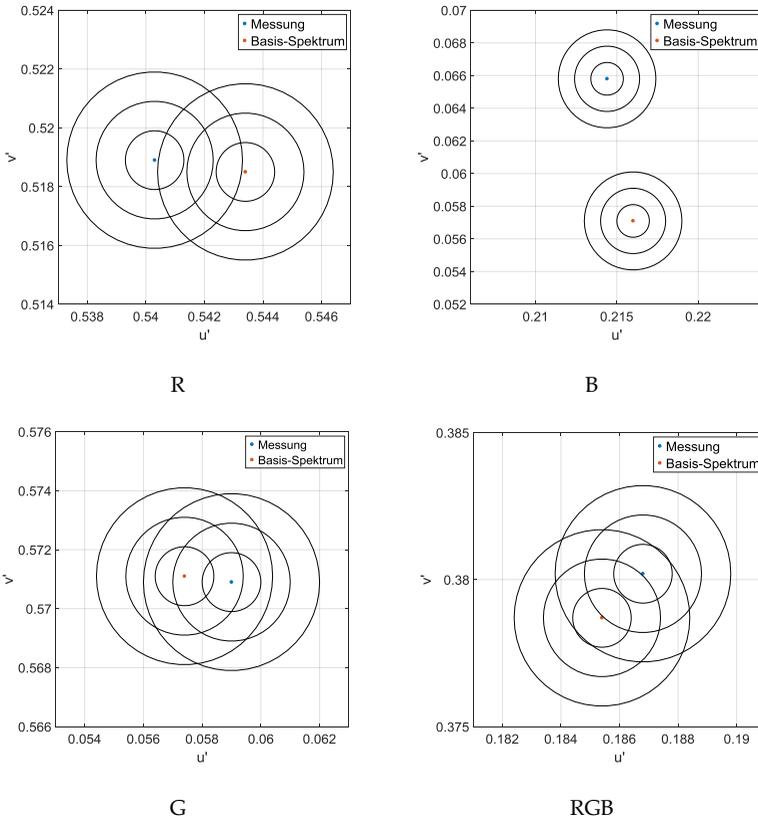
erkennbar. Es lässt sich ableiten, dass alle modellierten Farben nur teilweise die berechneten MU-Grenzen einhalten. Am schlechtesten schneiden die schmalbandigen roten und blauen LED-Spektren ab, bei denen die ausgewählten phänomenologischen Funktionen die spektrale Charakteristik nur bei Amplituden, die höher als 10% sind, zutreffend beschreiben.

**Tabelle 7.1:** Farbmtrische Analyse der modellierten und gemessenen LED-Spektren

LED	$u'$	$v'$	$\Delta u'v'$
$S_{R,M}(\lambda)$	$0,5403 \pm 9 \cdot 10^{-4}$	$0,5189 \pm 1,4 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$
$S_R(\lambda)$	0,5434	0,5185	
$S_{G,M}(\lambda)$	$0,059 \pm 5,4 \cdot 10^{-4}$	$0,5709 \pm 3,5 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$
$S_G(\lambda)$	0,0574	0,5711	
$S_{B,M}(\lambda)$	$0,2144 \pm 7,1 \cdot 10^{-4}$	$0,0658 \pm 5,7 \cdot 10^{-4}$	$8,8 \cdot 10^{-3}$
$S_B(\lambda)$	0,2160	0,0571	
$S_{RGB,M}(\lambda)$	$0,1868 \pm 9,4 \cdot 10^{-4}$	$0,3802 \pm 1,2 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$
$S_{RGB}(\lambda)$	0,1854	0,3787	

Basierend auf den Ergebnissen der spektralen Analyse, werden nun die daraus resultierenden Farbkoordinaten, Farbabstände und  $u'v'$ -Kreise berechnet. Dies schließt einen Vergleich mit denen aus spektralen Messungen berechneten Kenngrößen ein. Die resultierenden farbmtrischen Größen sind in Tabelle 7.1 zusammengefasst.

Zur Bestimmung der euklidischen Distanz  $\Delta u'v'$  zwischen den berechneten Farbkoordinaten wurde eine weitere Monte-Carlo-Simulation durchgeführt. Hierbei wurde bei jeder der aus spektralen Messungen zufällig generierten  $u'$  und  $v'$  die aus modellierten Spektren berechneten Farbkoordinaten subtrahiert. Hier ergeben sich absolute Messunsicherheiten der Farbabstände von  $\pm 0,0009$  für die R-,  $\pm 0,0005$  für G- und  $\pm 0,0008$  sowohl für B- als auch für die RGB-LED.



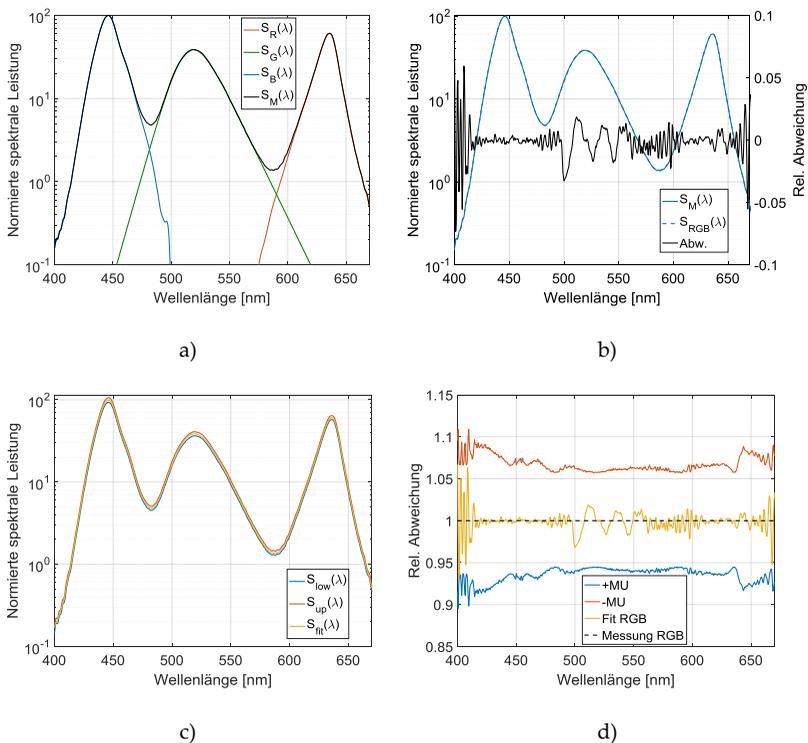
**Abbildung 7.14:** Dargestellte Farbkoordinaten der gemessenen und modellierten LED-Farben

Zur besseren Visualisierung der berechneten Farbabstände und deren physiologischer Bedeutung wurden diese Farbkoordinaten zusätzlich bei der  $u'v'$ -Farbtafel eingetragen und mit den entsprechenden  $u'v'$ -Kreisen dargestellt. Diese Information ist in Abbildung 7.14 vergrößert zu sehen. Sofern sich die Farbkoordinaten innerhalb der  $u'v'$ -Kreise befinden, sind für den Beobachter keine Farbunterschiede

sichtbar [78] [18]. Bei der LED-Industrie werden solche Messverfahren für LED-Binning verwendet. Hier ergeben sich je nach Anwendung und gewünschter Qualität verschiedene „Binningstufen“. In der Praxis werden Abweichungen von zwei oder drei  $u'v'$ -Kreisen in dem  $u'v'$ -Farbsystem akzeptiert, um LED für anspruchsvolle Anwendungen zu sortieren, obwohl die entsprechende Norm ANSI C78.377-2008 eine Abweichung bis zu sieben Kreisen erlaubt. Als Folgerung dieser Analyse können die in der Abbildung 7.14 dargestellten Farbkoordinaten als genügend „gleichfarbig“ für die Fälle einer R-, G- und RGB-LED angesehen werden. Lediglich die blaue LED weist eine Abweichung größer als drei  $u'v'$ -Kreise auf. Der Standard für LED-Binning wird mit der Methodik also eingehalten.

Um kleinere relative Abweichungen zu erzielen, sind weitere phänomenologische Funktionen nötig, die die spektrale Verteilung von LED besser beschreiben können, wenn Array-Spektrometer zum Einsatz kommen. Eine weitere spektrale Modellierungsmöglichkeit besteht darin, die einzelnen Spektren bei der globalen Messung mit Hilfe der phänomenologischen Funktionen zuerst von den restlichen Spektren zu trennen und anschließend das verbleibende Spektrum durch „Smoothing Spline“-Interpolation-Techniken zu fitten. Diese modellierten Spektren basieren nicht mehr auf spektralen physikalischen Modellen und sind stark vom verwendeten Spektrometer abhängig. Infolgedessen sind in diesem Fall beliebig niedrige Messsignale nicht mehr modellierbar, sodass Streulichteffekte und Rauschen bei der Interpolation bestehen bleiben. Die Ergebnisse dieser spektralen Modellierung in Bezug auf die globale spektrale Messung der RGB-Spektren werden in Abbildung 7.15 dargestellt. In der Teilabbildung **a)** sind die resultierenden modellierten Teilspektren und die globale Messung auf 100% normiert und bis 0,1% des maximalen

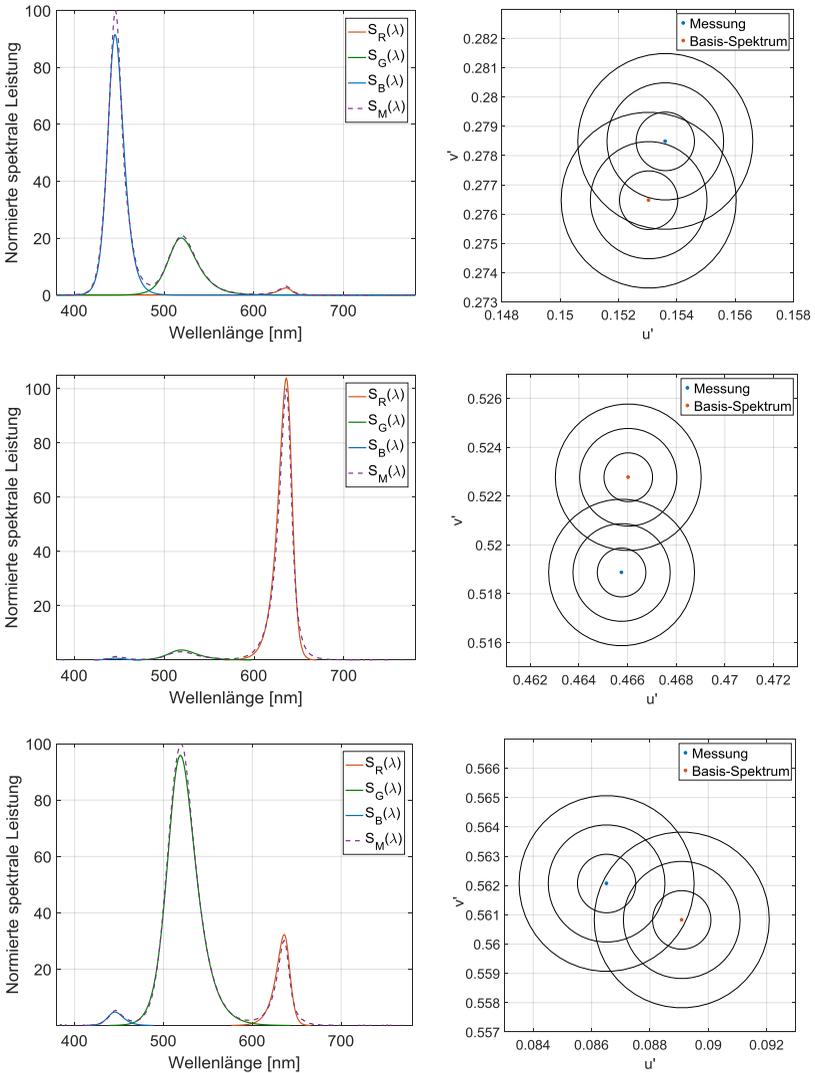
Messwertes dargestellt. Wie erwartet, passen sich die Basisspektren sehr gut an das gemessene Spektrum an. Dies wird in **b)** besser erkennbar, da nun viel niedrigere relative Messabweichungen erreicht werden. Abschließend befindet sich die Summe der Teilspektren immer innerhalb des MU-Überdeckungsintervalls der spektralen Messung. Dies wird in **c)** und **d)** eindeutig gezeigt. Logischerweise ergeben sich unter Anwendung dieser Basisspektren Farbkoordinaten, deren einzelne  $u'v'$ -Kreise sich mit den gemessenen Koordinaten stark überlappen.



**Abbildung 7.15:** Spektrale Validierung der mit „Smoothing Spline“ Interpolationstechniken erzeugten Basisspektren

Nun stellt sich die Frage, welche von beiden Modellierungsvarianten für die Erzeugung der Basisspektren besser geeignet ist, bzw. welche den besten „wahren“ Wert der Spektren beschreibt. Da die bisherigen Analysen der phänomenologischen Funktionen akzeptable Messabweichungen gezeigt haben, wird in dieser Arbeit eine korrekte physikalische Beschreibung der Basisspektren und nicht das Einhalten der MU-Überdeckungsintervall bevorzugt. Es muss auch berücksichtigt werden, dass bei den gemessenen Spektren aus technischen Gründen keine Streulichtkorrektur durchgeführt werden konnte. Wenn dies möglich wäre, würden die durch phänomenologische Funktionen modellierten Basisspektren niedrigere relative Abweichungen bei schwachen Messsignalen gegenüber den spektralen Messungen zeigen.

Bei allen durchgeführten Analysen wurden bis jetzt dieselben festen Winkelkoordinaten berücksichtigt. Um eine spektrale Validierung der mit der PMBS- und SCM-Methodik modellierten Spektren allgemein abzuschließen, werden nun beliebige Positionen der untersuchten RGB-Farbverteilung betrachtet. Die betrachteten Spektren sind durch unterschiedliche spektrale Amplituden der Basisspektren im Winkelraum bzw. bei Farbkombinationen gekennzeichnet.



**Abbildung 7.16:** Spektrale Amplituden und Farbkoordinaten der gemessenen und modellierten Spektren bei beliebigen Winkelkoordinaten

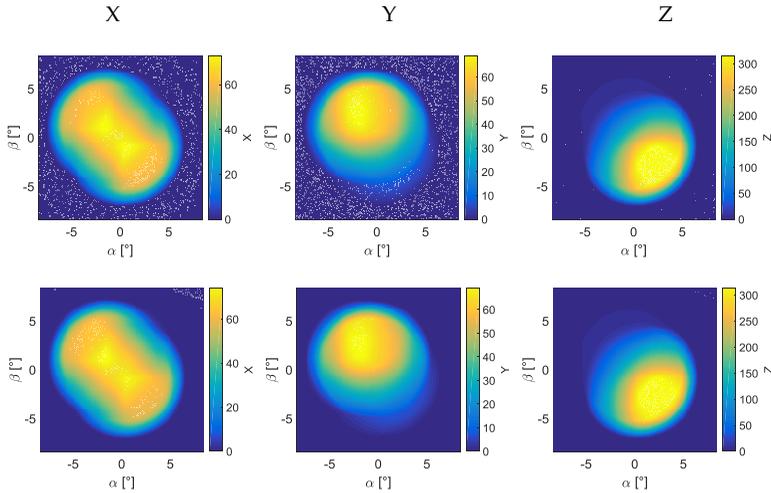
Insgesamt werden drei Validierungspunkte ausgewählt, die durch verschiedene Gewichtungen der Teilspektren charakterisiert sind. Sowohl die gemessenen Spektren als auch die mit der SCM-Methodik modellierten Amplitudenvariationen der Basisspektren bei denselben Winkelkoordinaten werden in Abbildung 7.16 dargestellt. Die betrachteten Messpunkte enthalten überwiegend eine der drei Basisspektren: die erste Reihe blau, die zweite rot und die letzte grün. Der direkte Vergleich der gemessenen und modellierten Spektren zeigt, dass die Amplitudenmodellierung durch Filterkammermessungen korrekt funktioniert. Als weitere Validierung werden die resultierenden Farbkoordinaten mit den entsprechenden  $u'v'$ -Kreisen ebenfalls dargestellt. Hier ergibt sich eine zufriedenstellende Überlappung der Kreise in allen untersuchten Fällen.

Die Analyse der W- und RW-Farbkombination ergeben ähnliche Ergebnisse. Diese werden in Anhang C.3 und C.4 jeweils gezeigt.

### 7.1.3 FARBWERTE

Nach der erfolgreichen Validierung der zusammengeführten Teil-LVK, können nun die kamerabasierten Farbmessungen mit dem SMCF korrigiert und abschließend mit den winkelaufgelösten Referenzmessungen verglichen werden. Die Quantifizierung der durch optische Filterung der Farbkamera verursachten spektralen Fehlanpassung wurde für den R-G-B Fall bereits in Abbildung 6.13 dargestellt. Ein Vergleich der kamerabasierten erfassten Lichtstärkewerte (Y-Kanal) mit Photometer-Messungen wurde bei der Validierung des Image-Merging-Verfahrens bereits gezeigt, allerdings ohne Berücksichtigung

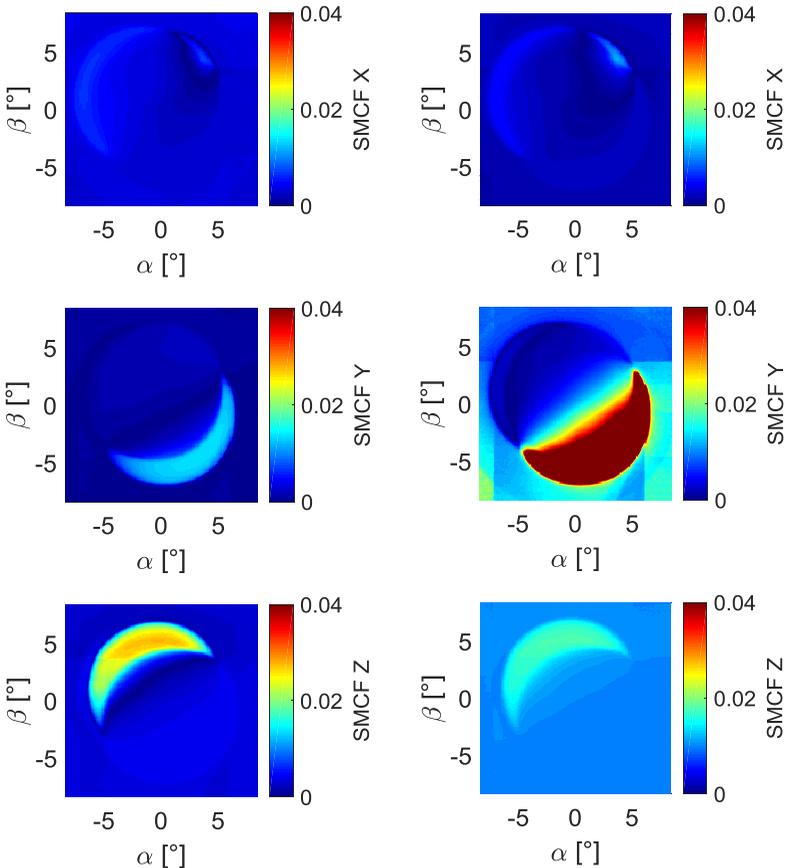
der spektralen Fehlanpassung. Nun werden die erfassten Kamerafarbwerte für das Messobjekt in der R-G-B-Konfiguration mit den entsprechenden spektralen SMCF-Werten korrigiert und mit den Farbwerten der Referenzmessung verglichen. Die daraus resultierenden Farbabweichungen werden ebenfalls analysiert.



**Abbildung 7.17:** Erfasste Farbabweichungen beim R-G-B-Messobjekt: Referenzmessung mit Colorimeter (obere Reihe) und kamerabasierte Farbwertmessung (untere Reihe).

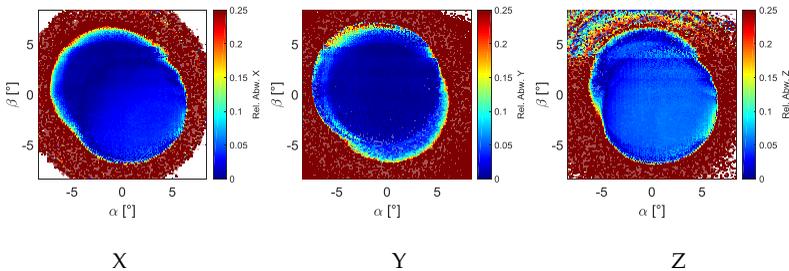
Zuerst sind die relativen spektralen Empfindlichkeiten der einzelnen Kanäle durch die lineare Kombination der relativen spektralen Empfindlichkeiten der Bandpass-Glasfilter mit den passenden Faktoren zu bestimmen, wie in 6.4 bereits ausführlich erklärt wurde. Die mit dem Standard-Filter der Farbkamera erfassten Werte werden ebenfalls mit diesen Gewichtungsfaktoren multipliziert. Auf diese Weise werden die korrekten relativen Verläufe der pixelaufgelösten gemessenen Farbabweichungen garantiert. Zur Minimierung der absoluten

Differenz in Bezug zu der Referenzmessung werden die Kameramessungen durch das Verhältnis zu einer Colorimeter-Punktmessung absolut ausgeglichen. Sowohl die Referenzmessung als auch die finalen kamerabasierten Farbwerte sind in Abbildung 7.17 dargestellt. Auf den ersten Blick ist eine Ähnlichkeit der Verteilung und der Skalierung bei beiden Arten von Messungen vorhanden.



**Abbildung 7.18:** Betrag der berechneten spektralen Korrekturfaktoren für: Colorimeter (links) und Kamera (rechts)

Die spektrale Fehlanpassung der relativ und absolut angepassten Kameraaufnahmen wird zunächst mit dem SMCF, welches mit den modellierten pixelaufgelösten Spektren berechnet wird, quantifiziert und korrigiert. Die verwendete Referenzmessung enthält ebenfalls eine spektrale Fehlanpassung aufgrund der Partialfilterung. Diese kann mit den modellierten Spektren ebenfalls korrigiert werden. In Abbildung 7.18 ist der Betrag der Differenz zum Wert eins der resultierenden Korrekturwerte für das Colorimeter und für die Farbkamera zu sehen. Wie erwartet, ist die sich relative ergebende Fehlanpassung einer Partialfilterung geringer als die mit Glas-Bandpass-Filter durchgeführte spektrale Anpassung. Dennoch wird die Fehlanpassung des Colorimeters korrigiert, um einen korrekten Vergleich zwischen den Messungen zu garantieren.

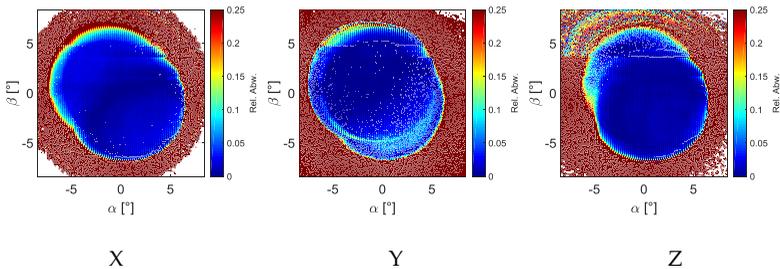


**Abbildung 7.19:** Relative Abweichung zwischen Kamera- und Referenzmessung (ohne spektrale Korrektur)

Für den relativen Vergleich der Messungen werden außerdem die Pixelwerte aller Filterkameraaufnahmen unter Berücksichtigung der Größe der lichtempfindlichen Oberfläche des Colorimeters gemittelt. Auf diese Weise werden Messwerte mit derselben Rasterung bzw. Winkelauflösung generiert. Die relative Abweichung beider

Messungen wird zuerst ohne spektrale Korrektur in Abbildung 7.19 betrachtet, um den Einfluss dieser Korrektur bei der Farbverteilung besser darzustellen. Diese Bilder zeigen eindeutig, dass sich ohne Berücksichtigung der spektralen Abhängigkeiten örtliche Abweichungen bzw. Abhängigkeiten ergeben

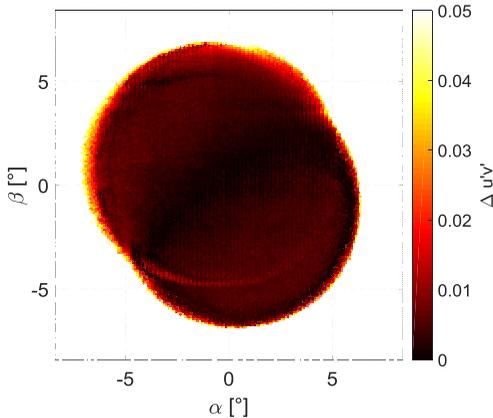
Nach der Durchführung der spektralen Korrektur sind die örtlichen spektralen Abhängigkeiten deutlich reduziert. Wie bereits erwähnt, werden sowohl die Referenzmessung als auch die Kameraaufnahmen spektral korrigiert. Die relative Abweichung beider korrigierter Messungen ist in Abbildung 7.20 für jeden Farbkanal dargestellt. Bei diesen Diagrammen sind die örtlichen spektralen Abhängigkeiten sowie die relativen Abweichungen zwischen den Messungen verringert. Dies ist in den Messpunkten mit ausreichendem Messsignalniveau anhand der so gut wie homogenen dunklen blauen Farbe erkennbar. Die Messabweichungen liegen im Mittel bei weniger als 1% und sind auf Streulichteffekte zurückzuführen.



**Abbildung 7.20:** Relative Abweichung zwischen der spektral korrigierten Kamera- und Referenzmessung

Zuletzt werden die Farbabstände zwischen den entsprechenden Farbkoordinaten in dem  $u'v'$ -Farbsystem analysiert. Die Ergebnisse

werden in Abbildung 7.21 dargestellt. Hier ergeben sich Farbdifferenzen im Mittelwert von ca.  $2,5 \cdot 10^{-3}$ . Die schwarzen Punkte entsprechen Farbabständen kleiner als  $1 \cdot 10^{-3}$ .



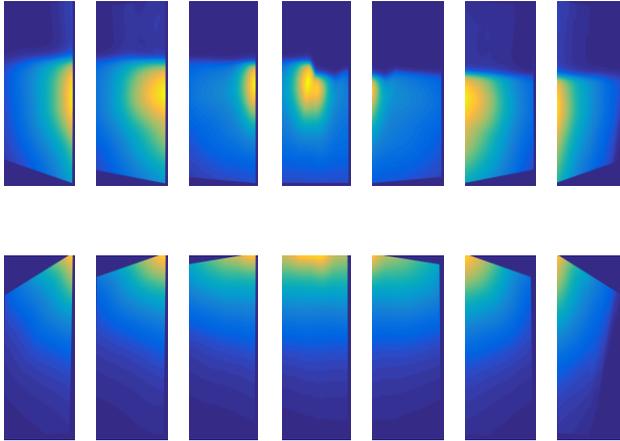
**Abbildung 7.21:** Farbabstand  $\Delta u'v'$  der Kamera- und Farbreferenzmessung beim R-G-B-Messobjekt

Eine komplette Anwendung der SCM-Methodik inklusive der entsprechenden spektralen Korrektur der kamerabasierten Messungen und ein Vergleich mit scannenden Systemen wird zunächst beispielhaft für einen LED-Automobilscheinwerfer durchgeführt.

## 7.2 LED-AUTOMOBILSCHEINWERFER

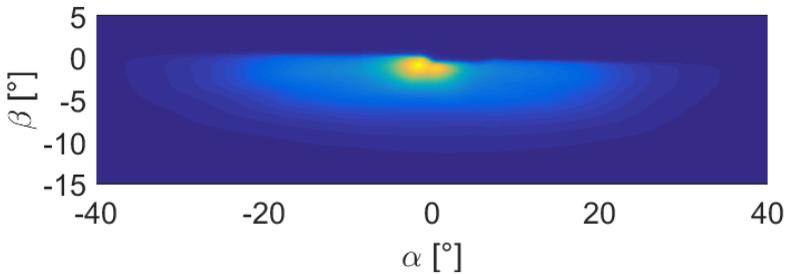
Um zu zeigen, dass die Messmethodik auch bei marktrelevanten Beleuchtungssystemen wie LED-Automobilscheinwerfern eingesetzt werden kann, wird dies im Folgenden näher erklärt. Hierfür wird eine LED-Abblendlichtverteilung für Linksverkehr mit der SCM-Methodik

farbmesstechnisch vollständig charakterisiert. Mit der generierten spektralen Information wird die spektrale Fehlanpassung der kamerabasierten Farbmessung korrigiert. Die Ergebnisse werden anschließend mit der entsprechenden Gonio-Colorimeter-Messung verglichen und analysiert.



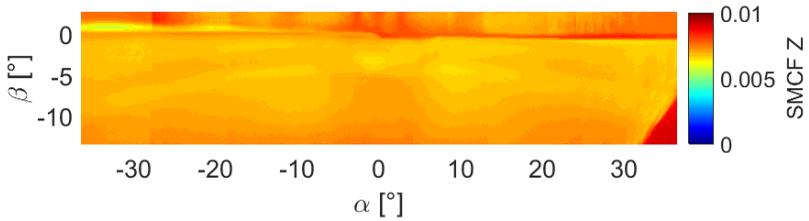
**Abbildung 7.22:** Entzerrte Aufnahmen der Teil-LVKs

Zunächst werden die benötigten Farbkameraaufnahmen mit den Standard-Glasfiltern des Filtrerrades  $X_{kurz}$ ,  $X_{lang}$ ,  $Y$  und  $Z$  erfasst. Dann werden die Perspektivenunterschiede zwischen den verschiedenen Aufnahmen in Bezug auf eine Referenzebene korrigiert und in eine komplette Verteilung kombiniert. Die in diesem Fall insgesamt vierzehn erfassten Teil-LVKs sind beispielhaft für den  $Y$  Filter in Abbildung 7.22 zu sehen, während die resultierende komplette Verteilung in Abbildung 7.23 dargestellt ist.



**Abbildung 7.23:** Fusionierte Lichtverteilung des Kanals Y

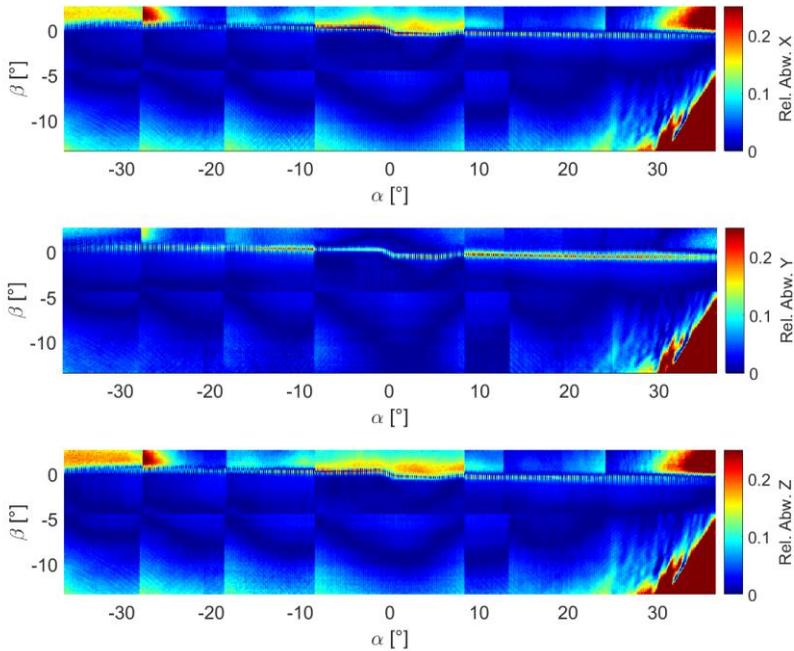
Die spektrale Charakteristik des untersuchten Automobilscheinwerfers enthält zwei zu modellierende Grundspektrale: einen blauen und einen leuchtstoffkonvertierenden spektralen Anteil. Diese werden mit der PMBS-Methodik anhand phänomenologischer Funktionen mathematisch beschrieben. Die mit den Bandpass-Glasfiltern des Filterrades zusammengeführten Kameraaufnahmen werden nun mit den aus der globalen Messung modellierten Spektren mit der SCM-Methodik fusioniert, um richtungsabhängige spektrale Informationen zu erzeugen. Diese Informationen werden für die Berechnung der pixelabhängigen SMCF-Korrekturfaktoren für jeden Farbkanal eingesetzt. In Abbildung 7.24 sind die berechneten SMCF-Werte beispielsweise für den Z-Kanal dargestellt, bei dem die örtlichen spektralen Abhängigkeiten des verwendeten optischen Filters eindeutig erkannt werden können. Da das weiße LED-Spektrum des Automobilscheinwerfers Informationen über den gesamten sichtbaren Wellenlängenbereich enthält, sind die resultierenden SMCF-Werte viel niedriger im Vergleich mit den schmalbandigen R-G-B-Spektren. Mit den berechneten Korrekturfaktoren wird zunächst die spektrale Fehlanpassung der Filterkammermessungen ausgeglichen.



**Abbildung 7.24:** Pixelaufgelöste SMCF für den Z-Kanal

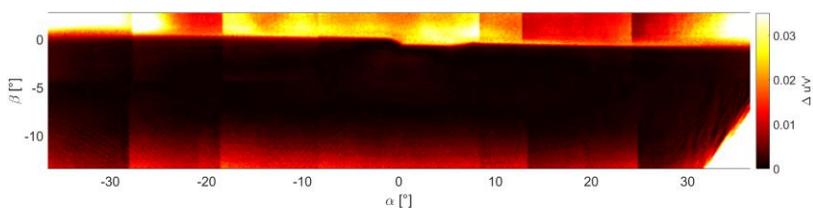
Der relative Vergleich zwischen den korrigierten, kamerabasierten und den spektralen, integrierenden Farbwerten wird durchgeführt. Die daraus resultierenden Ergebnisse für die drei Farbkanäle werden in Abbildung 7.25 gezeigt. In diesem Fall ergeben sich relative Abweichungen von bis zu 2%. Da der LED-Automobilscheinwerfer hohe Lichtstärkewerte generieren kann, sind größere Abweichungen im Vergleich zu dem R-G-B-Messobjekt durch stärkere Streulichteffekte aufgrund von Reflexionen im Messraum zu erklären. In der Abbildung 7.25 werden diese Effekte in den kreisförmigen räumlichen Abhängigkeiten sichtbar.

Mit den korrigierten Farbwerten werden die entsprechenden Farbkoordinaten berechnet und die resultierenden Farbabstände untersucht. Die Farbabstände  $\Delta u'v'$  sind in Abbildung 7.26 dargestellt. Da Automobilscheinwerfer hohe Gradienten an der Hell-Dunkelgrenze aufweisen, sind in diesen Bereichen größere Abweichungen der Farbkoordinaten zu erwarten. Die starken Farbabstände in den „dunklen“ Bereichen werden erneut durch Streulicht bei der kamerabasierten Messung verursacht, da der Empfänger von scannenden Systemen so gut wie streulichtunempfindlich ist.



**Abbildung 7.25:** Relative Abweichung der Referenzmessung und Farbkameramessung des Automobilscheinwerfers

Im Mittelwert ergeben sich in den Messregionen mit genügend Signalstärke Farbstände  $\Delta u'v' < 0,001$ , also viel niedrigere Farbdifferenzen im Vergleich zu den schmalbandigen R-G-B-Spektren. Diese Farbdifferenzen sind für das menschliche Auge nicht mehr wahrnehmbar bzw. kleiner als ein  $u'v'$ -Kreis [18].



**Abbildung 7.26:** Farbabstände  $\Delta u'v'$  der Kamera- und Farbreferenzmessung beim LED-Automobilscheinwerfer

### 7.3 AUSWERTUNG DER MESSERGEBNISSE

In diesem Teil der Arbeit wird die gesamte generierte Farbinformation in Bezug auf **Messunsicherheit**, **Messauflösung** und **Messdauer** ausgewertet und analysiert. Für die Validierung der vorgestellten SCM-Methodik wurden goniocolorimetrische Messungen durchgeführt. Dabei wurden Messwerte mit einer sehr hohen **Winkelauflösung** für scannende Systeme erfasst, und zwar von **0,1°** auf beiden Achsen. Diese Messungen haben eine gesamte Messdauer von **mehreren Tagen** im Anspruch genommen und sind von dem zu messenden Winkelbereich abhängig. Die durchgeführten Messungen des R-G-B-Testobjekts bei einem Winkelbereich von  $[-8,5^\circ; 8,5^\circ]$  auf beiden Winkelkoordinaten benötigten beispielweise insgesamt **zwei Tage**. Im Gegensatz dazu dauerte die manuelle Erfassung der einzelnen Filterkammermessungen mit einer intrinsischen **Messaufklärung** von **0,01°** nur **wenige Sekunden**. Bis jetzt war es aber nicht möglich, den gesamten Winkelraum in mehreren zu kombinierenden Aufnahmen im Fernfeld zu erfassen. Dies wird mit dem entwickelten Image-Merging-Verfahren und dem vorgestellten Messsystem ermöglicht. Dafür werden verschiedene kamerabasierte Aufnahmen

von einem durch das Messobjekt angestrahlten Schirm mit verschiedenen Blickrichtungen mit Hilfe des Goniometers erfasst.

Für die Messung von kamerabasierten Farbwerten erfasst die verwendete Farbmesskamera **immer** vier Aufnahmen mit den internen Filtern  $X_{kurz}$ ,  $X_{lang}$ ,  $Z$  und  $Y$ . Die Anzahl der Kameramessungen mit jedem dieser optischen Filter ist vom zu erfassenden Winkelbereich abhängig. Das entwickelte Messsystem ist in einem Winkelbereich von  $10^\circ \times 18^\circ$  messbar. Wenn die zu messende Farbverteilung größer als dieser Winkelbereich ist, sind zusätzliche Kameraaufnahmen mit Hilfe des Goniometers nötig. Beim gemessenen spektralen Normal in der R-G-B-Konfiguration waren **drei** Kameraaufnahmen mit jedem der vier Filter nötig, um die gesamte Farbverteilung erfassen zu können. D. h., dass zwölf Filterkameramessungen erfasst und kombiniert wurden. Im Fall einer automatisierten Steuerung sowohl des Goniometers als auch der Erfassung der Filterkameramessungen ergibt sich eine Messdauer von **einigen Minuten**. Durch die Implementierung der SCM-Methodik werden winkelaufgelöste spektrale Informationen für LED-Beleuchtungssysteme generiert. Insgesamt sind für die Anwendung dieser Methodik eine Filterkameramessung der kompletten Verteilung pro LED-Quelle des zu charakterisierenden Beleuchtungssystems, eine spektrale Messung und eine Punktmessung mit einem **Farbmesskopf** nötig. Die spektralen Messungen werden mit einem **Array-Spektrometer** durchgeführt. Die gesamte Messdauer wird hier aufgrund der zwei Punktmessungen kaum erhöht.

In [30] wurde gezeigt, dass die Modellierung der variierenden spektralen Amplituden im Winkelraum durch Kameramessungen mit den Bandpass-Glasfiltern des Filterrades der verwendeten Farbkamera im Nahfeld sehr gute Ergebnisse für marktübliche LED-Systeme erzielen kann. Infolgedessen werden diese Filter für die Trennung der

Farbregionen im Fernfeld und die entsprechende richtungsabhängige spektrale Amplitudenbestimmung bei der entwickelten kamerabasierten Fernfeld-Messtechnik ebenfalls eingesetzt. Die korrekte winkelaufgelöste spektrale Modellierung eines LED-Beleuchtungssystems im Fernfeld wurde bereits in 7.1.2 validiert. Hier wurden die modellierten Spektren mit spektralen Punktmessungen bei bekannten Winkelkoordinaten unter Beachtung der berechneten Messunsicherheit des Array-Spektrometers verglichen. Dies bedeutet, dass für die Durchführung der SCM-Methodik keine additionalen Filterkammermessungen nötig sind, da die für die Bestimmung der Farbwerte bereits erfassten Filterkameraaufnahmen noch einmal verwendet werden.

Im Fokus der SCM-Methodik steht das Anfitzen der Basisspektren anhand eines mit einem Array-Spektrometer erfassten Spektrums. Die Messunsicherheit dieser spektralen Messung hat dementsprechend einen direkten Einfluss auf das gesamte Modellierungsverfahren. Das MU-Überdeckungsintervall der spektralen Messung wird mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen und des in Kapitel 4.4 vorgestellten Messmodells für ein Array-Spektrometer bestimmt. Zunächst wird der Bandpass-Fehler des Array-Spektrometers mit dem Richardson-Lucy-Algorithmus korrigiert. Dieses korrigierte Spektrum wird anschließend mit der PMBS-Methodik in Basisspektren mathematisch modelliert. Ab diesem Punkt sind die Basisspektren **fest** definiert, und ihre Amplituden werden für die winkelaufgelöste Bestimmung der spektralen Variationen im Winkelraum anhand von Filterkammermessungen modelliert. Die daraus resultierenden modellierten spektralen Amplituden besitzen ebenfalls eine Messunsicherheit, die in Zukunft berücksichtigt werden sollte.

Zur Darstellung der korrekten Funktionsfähigkeit der Methodik wurde einerseits das spektrale Normal eingesetzt, das bekannte und

sehr stabile spektrale Informationen erzeugt. Dies minimiert den Einfluss des DUT auf die Modellierung der richtungsabhängigen Spektren. Andererseits sind die spektralen Eigenschaften der verwendeten Farbmesskamera durch den Hersteller bekannt und sehr gut charakterisiert. Hier wurde die spektrale relative Empfindlichkeit der Kombination des CCD-Chips mit den Bandpass-Glasfiltern des Filterrades und der Objektivlinse ermittelt. Die spektrale Information des Messsystems (Farbmesskamera plus Schirm) und des DUT (Basisspektren) wird in der Matrix  $M_{st}$  zusammengefasst. Diese Matrix ist für ein Beleuchtungssystem festgelegt und für alle betrachteten Filtermessungen **konstant**. Die Messunsicherheit der Matrix ist jedoch **unbekannt**. Messmodelle für die Bestimmung der Messunsicherheit der Filterkammermessungen wurden in [75] vorgestellt und anhand von Monte-Carlo-Simulationen und angenommenen PDF der Eingangparameter untersucht. Hier wurden verschiedene Filtertechnologien (Glas- und Interferenzfilter) und Einflussparameter, wie Filterdicke, Temperatur und Winkel des einfallenden Lichtes auf der Filteroberfläche betrachtet. Es stellt sich folglich die Frage, wie die relative spektrale Empfindlichkeit der Kombination von CCD-Chip, Objektivlinse und optischer Filter durch den Hersteller gemessen wurde.

Der Stand der Technik zur Bestimmung der relativen spektralen Empfindlichkeit eines spektral integrierenden Empfängers ist die Bestrahlung dieses Empfängers mit einem quasi monochromatischen, homogenen Strahlungsfeld bekannter Bestrahlungsstärke jede  $5\text{ nm}$  von  $360\text{ nm}$  bis  $830\text{ nm}$ . Aus dem Quotient der gemessenen Stromstärke und der bei jeder Wellenlänge eingestellten Bestrahlungsstärke ergibt sich die relative spektrale Empfindlichkeit des Messgerätes [68, p. 11 vgl.]. Da die daraus resultierende spektrale Empfindlichkeit

für jeden Empfänger charakteristisch und stark von den verwendeten Messgeräten abhängig ist, lässt sich hier **keine allgemeine Aussage** bezüglich der Messunsicherheit treffen. Diese Messunsicherheit der relativen spektralen Empfindlichkeit der Farbkamera ist zwar **unbekannt** aber für das Messsystem **festgelegt**, unabhängig davon, welches LED-Beleuchtungssystem mit der SCM-Methodik charakterisiert wird. Da die Erfassung einer Filterkameraaufnahme nur wenige Sekunden im Anspruch nimmt, kann hier angenommen werden, dass die spektrale Information der Matrix  $M_{st}$  während der Messung **konstant** bleibt und keine Variationen aufgrund von zeitvariierenden Effekten, wie z. B. Temperaturänderungen auftreten. Aus diesen Gründen ist es legitim zu sagen, dass der wichtigste Parameter zur Bestimmung der Amplitudenvariationen der Basisspektren eine „korrekte“ Charakterisierung der relativen spektralen Empfindlichkeit des Messsystems ist.

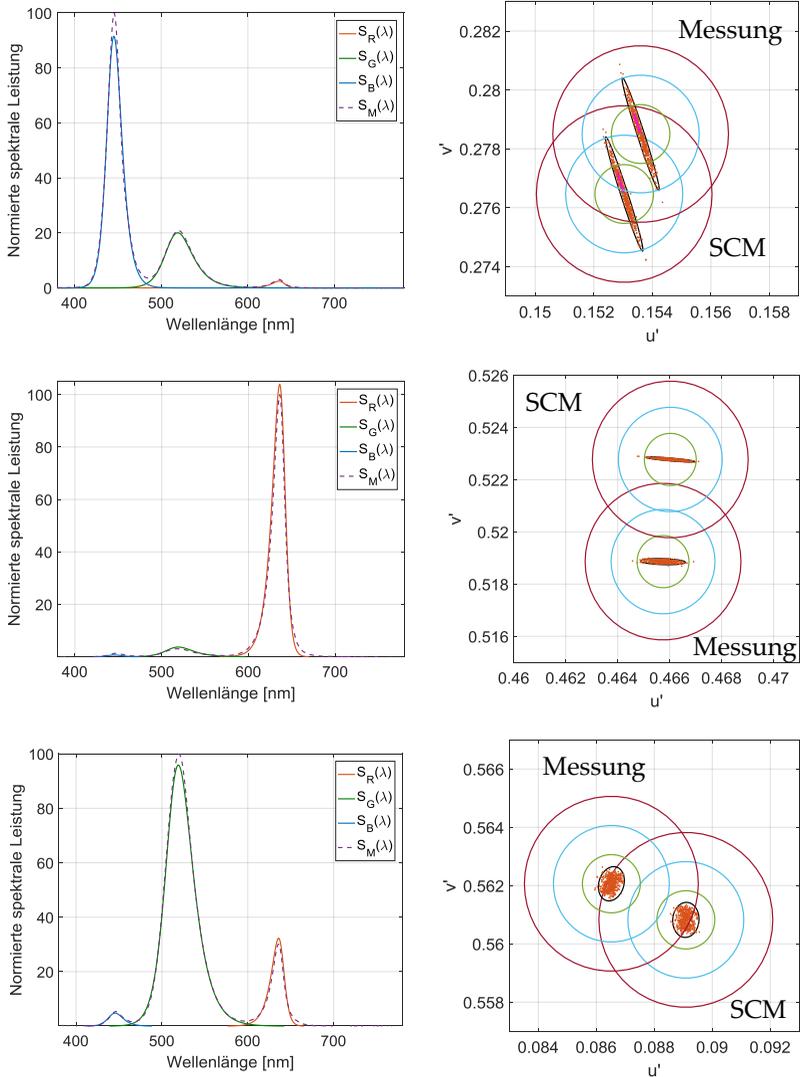
Zusammenfassend sind bei der Durchführung der SCM-Methodik sowohl die Basisspektren, nachdem sie anhand einer spektralen Messung angefüttet wurden, als auch die Matrix  $M_{st}$  bekannt und konstant. Variabel bleibt nur die spektrale Messunsicherheit der spektralen Messung mit dem Array-Spektrometer, welche für die Bestimmung der Basisspektren eine wichtige Rolle spielt. Die Eingangsparmeter des verwendeten Messmodells für die Bestimmung der spektralen Messunsicherheit wurden in dieser Arbeit in systematische und zufällige Effekte unterteilt und deren PDF für die MC-Simulation vom Kalibrierschein oder der entsprechenden Fachliteratur entnommen. Die resultierende spektrale Messunsicherheit ist in diesem Fall eine „best case“ Abschätzung. Eine Charakterisierung des Messgerätes bei einem nationalen Metrologie-Institut wäre

notwendig, um die reellen PDF der Eingangsparameter für die MC-Simulation zu bestimmen.

Durch den Vergleich der winkelaufgelösten modellierten Spektren mit spektralen Messungen bei den entsprechenden Winkelkoordinaten wurde gezeigt, dass die modellierten Spektren sich in den meisten Fällen innerhalb des berechneten MU-Überdeckungsintervalls befinden. Bei spektralen Amplituden unterhalb von 1 % wurde diese Kondition nicht eingehalten, da es bei den spektralen Messungen nicht möglich war, eine Streulichtkorrektur durchzuführen. Infolgedessen wird in dieser Arbeit angenommen, dass die mit der SCM-Methodik erzeugten Spektren ein Ergebnis einer spektralen Messung sind, und dass ihre Messunsicherheit mit dem Messmodell und Eingangsparameter des Spektrometers in einer MC-Simulation bestimmt werden können. Dies ist für den hier vorgestellten relativen Vergleich legitim, da der Einfluss der restlichen Parameter konstant ist. Die auf diese Weise berechnete Messunsicherheit der modellierten Spektren wird für weitere MU-Analysen verwendet.

Die Messunsicherheit von jedem modellierten Spektrum wird mit dem Messmodell des Array-Spektrometers ermittelt. Pro Winkelposition werden mit der Monte-Carlo-Simulation  $M$  Spektren simuliert, denen die entsprechenden Farbkoordinaten zugeordnet werden können. Die möglichen Farbkoordinaten werden in der  $u'v'$ -Farbtafel eingetragen und die Überdeckungsregion von 95 % in der Form von einer Ellipse markiert (schwarz). Außerdem werden  $u'v'$ -Kreise zur Darstellung der spektralen Messunsicherheit in Bezug auf die wahrnehmbaren Farbunterschiede gezeigt. Diese Information wird in Abbildung 7.27 beispielhaft für drei Spektren mit unterschiedlichen relativen spektralen Amplituden dargestellt.

### 7.3 Auswertung der Messergebnisse



**Abbildung 7.27:** Gemessene und modellierte Spektren und Farbkoordinaten unter Beachtung der Messunsicherheit

Für die Korrektur der spektralen Fehlanpassung der optischen Filterung der Farbmesskamera wird das SMCF verwendet. Hierfür werden die mit der SCM-Methodik modellierten winkelaufgelösten Spektren eingesetzt. Nach der spektralen Korrektur der kamerabasierten Farbmessungen und der Colorimeter-Messungen wurde gezeigt, dass die räumlichen spektralen Abhängigkeiten bei den untersuchten Farbwertverteilungen überwunden sind (s. 7.1.3). Dies ist bei dem relativen Vergleich der Farbwerte als auch der Farbstände  $\Delta u'v'$  erkennbar. Hierbei ergibt sich ein beinahe konstanter Offset, der auf unbekannte, jedoch konstante systematische Effekte der Matrix  $M_{ST}$  oder auf nicht korrigierte Streulichte effekte im Messsystem zurückzuführen ist. Zunächst werden die SMCF-Werte für verschiedene modellierte Spektren ermittelt und die daraus resultierenden Messunsicherheitswerte berechnet. Hierfür werden die mit der SCM-Methodik modellierten Spektren und die Realisierung der Normlichtart A betrachtet. Sowohl die winkelaufgelösten modellierten LED-Spektren als auch das mit Array-Spektrometer gemessene Spektrum eines thermischen Strahlers werden beim Array-Spektrometer-Messmodell in der MC-Simulation variiert. Da vom Kamerahersteller nur die relative spektrale Empfindlichkeit der Farbkanäle  $\bar{x}_{rel}(\lambda)$ ,  $\bar{y}_{rel}(\lambda)$  und  $\bar{z}_{rel}(\lambda)$  im Wellenlängenbereich von 400 bis 700nm zur Verfügung steht, aber der Standard [10] eine Integration zwischen 360 und 830 nm ausweist, werden die fehlenden Werte als Null<sup>10</sup> angenommen, um in der MU-Analyse berücksichtigt zu werden. Da die Werte zudem in einem regelmäßigen Stützstellenintervall von 10 nm gegeben sind, werden die Zwischenwerte mit einem Intervall von 0,5 nm interpoliert [9]. Aufgrund der großen

---

<sup>10</sup> In diesem Fall ein sehr kleiner Transmissionsgrad von 0,001% [79]

Wellenlängenintervalle zwischen den Stützstellen reicht eine einfache lineare Interpolation nicht aus. Deshalb wird hier eine **cubic-spline Interpolation** durchgeführt. Es wird angenommen, dass die interpolierte spektrale relative Empfindlichkeit der optischen Filterung für die MC-Simulation keine Messunsicherheit besitzt. Die berechneten Werte sind dementsprechend eine „best case“-Abschätzung, da die unbekannte aber feste Messunsicherheit der Bestimmung der spektralen Eigenschaften des Messsystems nicht berücksichtigt wird. Die berechneten Werte sollten also nur relativ betrachtet werden und sind als Tendenz für die Abhängigkeit der spektralen Fehlanpassung von verschiedenen modellierten LED-Spektren zu verstehen.

In der Tabelle 7.2 werden die resultierenden Korrekturfaktoren der spektralen Fehlanpassung der Farbkamera mit den entsprechenden Messunsicherheitsbeiträgen für ein Überdeckungsintervall von 95% beispielhaft für die vier einzelnen schmalbandigen Spektren R, G und B und für den Leuchtstoffkonvertierenden Anteil (P) der weißen LED als auch für die Kombination dieser Spektren bzw. RGB und W (BP) vorgestellt. Bezüglich der Korrekturwerte und deren MU wird der Betrag größer, wenn der spektrale Bereich der Anpassung, in welchem sich das zu messende Spektrum befindet, schlecht ist oder die Spektren sehr kleine Amplituden zeigen. Für Spektren, die sich über den gesamten spektralen Bereich verteilen, wie zum Beispiel RGB- oder W-Spektren, spielt die spektrale Anpassung nur bei den Korrekturfaktoren eine Rolle und die MU wird dementsprechend kleiner.

**Tabelle 7.2:** Messunsicherheitsanalyse der SMCF-Werte

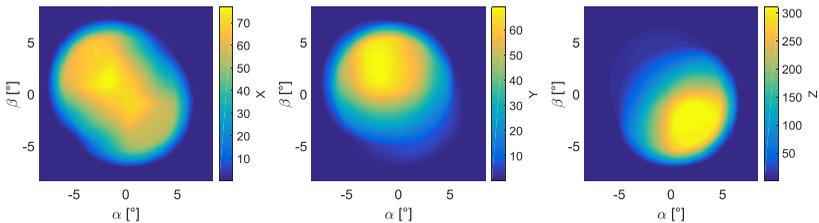
<b>LED</b>	<b>SMCF X</b>	<b>SMCF Y</b>	<b>SMCF Z</b>
<i>R</i>	$0,995 \pm 0,0002$	$0,997 \pm 0,0003$	$0,881 \pm 0,0057$
<i>G</i>	$1,016 \pm 0,0008$	$1,004 \pm 0,0003$	$1,019 \pm 0,0004$
<i>B</i>	$0,998 \pm 0,0001$	$1,158 \pm 0,0030$	$1,009 \pm 0,0002$
<i>P</i>	$0,998 \pm 0,0001$	$1,000 \pm 0,0001$	$0,955 \pm 0,0012$
<i>RGB</i>	$0,996 \pm 0,0001$	$1,028 \pm 0,0010$	$1,009 \pm 0,0002$
<i>BP (W)</i>	$0,999 \pm 0,0001$	$1,000 \pm 0,0001$	$1,006 \pm 0,0002$

Ein letzter wichtiger Aspekt der kamerabasierten Messtechnik ist die notwendige Streulichtunterdrückung. Im Normalfall, wie zum Beispiel beim Halbraum- oder Vollraumstrahler, ist eine Offset-Korrektur ausreichend, da ein großer Teil des Messraums gleichmäßig beleuchtet wird. Diese Offset-Korrektur wird, wie in 5.2.2 beschrieben, durchgeführt. Die Streulichtproblematik macht sich vor allem bei den Kameraaufnahmen bemerkbar, wenn sehr gerichtete und leistungsstarke Beleuchtungssysteme charakterisiert werden müssen, wie die vorgestellte LED-Automobilscheinwerfermessung. In diesen Fällen muss für jede Kameraaufnahme bzw. für jede Teil-LVK der Verteilung eine spezifische Korrektur durchgeführt werden. Diese wird durch eine komplette Abdeckung des Messschirmes mit einer Blende, während der Messraum von den nicht abgedeckten Teilen der Lichtverteilung beleuchtet wird, umgesetzt. Hier ergeben sich charakteristische Streulichteffekte auf dem Schirm, die mit einer

entsprechenden Kameraaufnahme erfasst werden. Diese Aufnahme wird von der eigentlichen gemessenen Teil-LVK subtrahiert und korrigiert auf diese Weise die Streulichteeffekte. Diese Vorgehensweise verdoppelt jedoch die Anzahl der nötigen Kameraaufnahmen und wird nur in den genannten speziellen Fällen gebraucht.

## 7.4 DISKUSSION

Für eine von Offset und Rauschen unabhängige Bestimmung der Farbkoordinaten können die Amplituden bei den spektralen Messungen, die kleiner als 1% des maximalen Wertes sind, in der Praxis vernachlässigt werden, bzw. durch 0 ersetzt werden. Wenn die spektralen Amplituden, die kleiner als 1% bei den modellierten Spektren sind, nicht mehr berücksichtigt werden, sind die größeren Abweichungen in Bezug auf die spektralen Messungen überwunden.

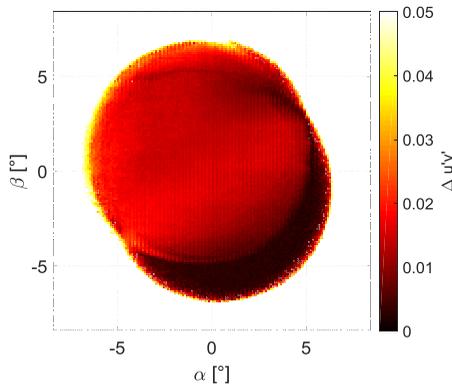


**Abbildung 7.28:** Farbwerte des R-G-B Messobjekts auf Basis der mit SCM-Methodik modellierten Spektren

Die mit der PMBS- und der SCM-Methodik modellierten Spektren wurden ursprünglich für die Korrektur der spektralen Fehlanpassung der kamerabasierten erfassten Farbwerte ermittelt. Sie können jedoch direkt angewendet werden, um diese Farbwerte mit den Formeln (2.3)

zu berechnen. Da sich die kamerabasierte Farbmessung immer aus der Kombination von vier Filterkameramessungen zusammensetzt, können je nach Anzahl der zu charakterisierenden LED-Quellen Filterkameraaufnahmen gespart werden. Die mit den modellierten Spektren berechneten Farbwerte sind beispielhaft für das R-G-B-Messobjekt in Abbildung 7.28 dargestellt. Auf den ersten Blick sind keine Differenzen zu den mit Colorimeter und Farbmesskamera gemessenen Farbwerte Verteilungen bemerkbar. Allerdings kann mit Hilfe der Darstellung des Farbstandes zwischen den mit modellierten Spektren ermittelten  $u'v'$ -Farbkoordinaten und denen von der Colorimeter-Referenzmessung die „Qualität“ der mit auf Sensorfusionsbasis erzeugten Farbkoordinaten evaluiert werden. In Abbildung 7.29 werden die  $\Delta u'v'$  zwischen beiden Messungen dargestellt. Hier ergeben sich minimal höhere Differenzen als bei den mit SMCF korrigierten Farbkameramessungen. Die schwarzen Messpunkte entsprechen Farbdifferenzen in der Größenordnung von 0,001, welche nicht für das menschliche Auge wahrnehmbar sind. Je nach Anwendungsgebiet können die resultierenden Farbabweichungen ausreichend sein.

Da eine spektrale Punktmessung für die Bestimmung der Basisspektren angewendet wird, sind die mit phänomenologischen Funktionen modellierten Spektren stark von der „Qualität“ der Messung abhängig. Spektrale Messungen mit geringer Messunsicherheit erhöhen dementsprechend die Qualität des Anfittens und reduzieren gleichzeitig die Messunsicherheit der mit der SCM-Methodik modellierten Spektren und die Farbabweichungen mit Referenzmessungen.



**Abbildung 7.29:** Farbabstand  $\Delta u'v'$  der korrigierten Farbreferenzmessung mit den anhand der SCM-Methodik ermittelten Farbkordinaten beim R-G-B Messobjekt

Die SCM-Methodik ist nur imstande, die spektralen Variationen im Winkelraum von LED-Quellen korrekterweise zu modellieren, wenn die spektralen Eigenschaften des Messsystems so gut wie möglich bekannt sind. Die gesamte spektrale Information des Messsystems und des DUT wird hierfür in die  $M_{st}$  Matrix eingetragen. LED-Spektren bzw. Amplituden der Basisspektren würden beispielweise falsch modelliert, wenn das wellenlängenabhängige Reflexionsverhalten des Messschirmes nicht berücksichtigt würde, vor allem für blaue LED-Quellen. Das vorgestellte „Spectral Camera Measurement“ kann folglich nur die spektralen Variationen im Winkelraum gut beschreiben, wenn die Matrix  $M_{st}$  alle bekannten spektralen Abhängigkeiten mitmodelliert.

Die vorgestellte Methodik kann ebenfalls zur Korrektur der relativen spektralen Anpassung bei den scannenden Methoden angewendet werden, wie es für den Vergleich der Ergebnisse von kamerabasierten mit spektral integrierenden Farbwerten bereits der Fall war.



## Kapitel 8

# ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

*Die entwickelte kamerabasierte Messmethodik für die vollständige farbmtrische Charakterisierung von LED-Quellen und -Leuchten wurde in den vorherigen Kapiteln vorgestellt. Die SCM-Messmethodik wurde anhand von spektralen und colorimetrischen Messungen eines speziell entwickelten Testobjekts validiert und die daraus resultierenden Ergebnisse ausgewertet. In diesem Kapitel wird der verwendete Sensorfusionsansatz und die Möglichkeit, durch dessen Anwendung die komplette Farbinformation zu erzielen, zusammengefasst. Des Weiteren werden Grenzen und Einsatzmöglichkeiten der Messmethodik diskutiert sowie Verbesserungspotential und zukünftige Arbeiten vorgestellt.*

## 8.1 ZUSAMMENFASSUNG

Das Ziel dieser Arbeit ist die vollständige und hochaufgelöste farbmtrische Charakterisierung von LED-Beleuchtungssystemen. Die Erfassung der vollständigen Farbinformationen soll hierbei mit einer möglichst kleinen Unsicherheit und in einer akzeptablen Messdauer durchgeführt werden. Komplette Farbinformation bedeutet in diesem Zusammenhang die Erfassung von sowohl winkelaufgelösten Farbwerten und daraus ermittelten Farbkoordinaten, als auch winkelaufgelöster Spektren. Da die notwendige Messdauer für eine vollständige farbmtrische Charakterisierung nicht unbeachtet bleiben

darf, ist die Fusionierung der Informationen verschiedener Messgeräte die einzige durchführbare Alternative.

Zu diesem Zweck wurde in dieser Arbeit die sogenannte SCM-Methodik entwickelt, die durch die Anwendung von Sensorfusionstechniken eine vollständige hochaufgelöste spektrale Charakterisierung von LED-Systemen ermöglicht. Eine hohe Messauflösung mit einer kurzen Messdauer wird hierbei mittels kamerabasierter Messtechniken erreicht. Ein Messkonzept für die kamerabasierte Erfassung von Licht- und Farbverteilungen im Fernfeld wurde hierfür entwickelt und in ein entsprechendes Messsystem implementiert. Für die Erfassung des kompletten Winkelraums einer zu charakterisierenden Lichtquelle wird ein Goniometer mit den Kameraaufnahmen eines diffus reflektierenden Schirms als Empfänger kombiniert. Die daraus resultierenden Kameramessungen werden dann mit dem ebenfalls in dieser Arbeit entwickelten Image-Merging-Verfahren zu einer vollständigen Verteilung zusammengefügt. Hierfür muss die Geometrie des Messsystems vollständig charakterisiert und ein Kameramodell erstellt werden. Mit der Verwendung von unterschiedlichen optischen Filtern mit einer spektralen Anpassung an einer definierten Gewichtungsfunktion werden die für Farbmessungen notwendigen Farbwerte erfasst.

Kamerabasierte Messtechniken erlauben eine schnelle Erfassung der Farbwerte mit hohen Auflösungen. Sie werden allerdings durch systematische Effekte beeinflusst. Diese Effekte müssen korrigiert werden, um gleichwertige Messwerte im Vergleich zu den klassischen scannenden Systemen zu erzielen. Hier müssen bei der entwickelten SCM-Methodik vor allem die **spektrale Fehlanpassung** der verwendeten optischen Filterung, **Streulichteffekte** im Messraum und die örtlich abhängigen **Reflexionseigenschaften** des verwendeten

Schirmes korrigiert werden. Einerseits werden die örtlichen Abhängigkeiten beim Schirm durch eine Charakterisierung mit einem passenden Beleuchtungssystem bestimmt. Diese örtlichen charakterisierten Reflexionsgraddifferenzen sind für alle zu messenden Lichtquellen konstant. Diese Korrektur wird folglich für alle Filterkammeramessungen eingesetzt. Andererseits sind die winkelaufgelösten Korrekturwerte für die Streulichteffekte und für die spektralen Fehler von der zu bestimmenden Lichtverteilung und von der spektralen Charakteristik der Lichtquelle jeweils abhängig. Infolgedessen müssen die entsprechenden Korrekturfaktoren bei jeder Messung individuell quantifiziert werden. Für die Streulichtunterdrückung wurde ein Blendensystem entworfen und im Messraum installiert. Dies erlaubt einerseits eine Minimierung der Lichtreflexionen im Messraum und andererseits eine prozentuale Korrektur der erfassten Kameramesswerte für Standard-Lichtverteilungen. Für eine von der Lichtverteilung abhängige Korrektur sind zusätzliche Kameraaufnahmen des mit einer passenden Blende komplett abgedeckten Schirms bei jeder Position des Goniometers erforderlich. Zuletzt ist die Korrektur der spektralen relativen Empfindlichkeit des Empfängers durchzuführen. Diese sollte insbesondere bei der Messung von schmalbandigen LED-Quellen beachtet werden. Hierbei sind für die winkelaufgelöste spektrale Korrektur der Fehlanpassung der erfassten Filterkammeramessungen winkelaufgelöste spektrale Informationen notwendig. Zu diesem Zweck werden die erfassten Informationen der Filterkameraaufnahmen mit spektraler Information in der entwickelten SCM-Methodik kombiniert. Der Arbeitsaufwand besteht im Fall der Sensorfusionstechnik nicht mehr in sehr zeitintensiven spektralen Messungen. Auch werden keine präzisen und kostspieligen Hardware-Elemente benötigt. Stattdessen geht es um die nachträgliche Verarbeitung und Fusionierung der erfassten Daten durch die passenden Algorithmen.

Die aus der Implementierung der vorgestellten SCM-Messmethodik resultierenden hochaufgelösten spektralen Informationen ermöglichen die Durchführung der notwendigen spektralen Korrekturen der gemessenen kamerabasierten Farbwerte. Die resultierenden spektralen Informationen können ebenfalls für die direkte Durchführung von hochaufgelösten Farbhomogenitätsanalysen und von farblichen optischen Simulationen im Fernfeld eingesetzt werden.

Die korrekte Datenerfassung dieses innovativen Messkonzeptes wurde durch die Messung eines speziell entwickelten Messobjektes validiert. Zuerst wurde hierbei das Image-Merging-Verfahren der Kameraaufnahmen anhand eines Vergleichs von einer Referenzmessung des Normals mit den entsprechend erfassten Kamerawerten der Lichtverteilung validiert. Dieser Vergleich zeigte, dass die Kombination von homogenen leuchtenden Flächen mit einem Blendensystem beim Messobjekt imstande ist, gezielte modellierbare Lichtverteilungen zu erzeugen. Es wurde ebenfalls gezeigt, dass die neuartige kamerabasierte Messmethodik, mit den entsprechenden zusammengeführten Teil-LVKs, gleichwertige relative Lichtverteilungen auf dem aktuellen Stand der Technik erzielen kann. Die Differenzen zwischen beiden Methoden in den Bereichen mit niedrigeren Signalwerten könnten durch nicht korrigierte Streulichteffekte bei der Kameramessung erklärt werden. Obwohl sowohl beim Messraum für Kameramessungen als auch bei den erfassten Bildern Streulichtminimierungskorrekturen eingesetzt werden, bleibt diese Messtechnik viel empfindlicher gegenüber Streulicht als die photometrischen Messungen.

Zunächst wurden die anhand der PMBS- und SCM-Methodik modellierten winkelaufgelösten Spektren mit spektralen Messungen des Testobjekts in bekannten Winkelkoordinaten unter Berücksichtigung der Messunsicherheit verglichen. Es wurde gezeigt,

dass sich die modellierten spektralen Verteilungen mit Amplituden größer als 1% innerhalb des vom Array-Spektrometer berechneten MU-Überdeckungsintervalls befinden. Die spektrale Messunsicherheit wurde anhand eines Messmodells der spektralen Messungen bestimmt, indem Eingangsparameter des Modells in systematische und zufällige Effekte klassifiziert wurden. Hierzu wurden die Informationen der Kalibrierung des Spektrometers verwendet und Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt. Die Differenzen zwischen den gemessenen und den modellierten Spektren können ebenfalls auf Streulichteffekte im Spektrometer zurückgeführt werden. In dieser Arbeit war es nicht möglich, solche Effekte zu korrigieren.

Zuletzt wurde die spektrale Fehlanpassung der erfassten kamerabasierten Farbmessungen des entwickelten Normals mit den erzeugten winkelaufgelösten spektralen Informationen mit Hilfe des SMCF korrigiert. Anschließend wurde die relative Abweichung der korrigierten Farbwerte mit winkelaufgelösten colorimetrischen Messungen berechnet und analysiert. Es wurde gezeigt, dass nach der Anwendung der spektralen Korrektur keine räumlichen Abhängigkeiten aufgrund verschiedener spektraler Zusammensetzungen vorhanden waren. Die  $u'v'$ -Farbkoordinaten wurden ebenfalls mit den entsprechenden Farbwerten ermittelt und deren Farbabstände sowie die  $u'v'$ -Kreise betrachtet. Hier wurden in den meistens Fällen keine Farbabweichungen größer als drei  $u'v'$ -Kreise festgestellt, welche für industrielle Anwendungen akzeptiert sind.

Das Messsystem und das zu messende DUT müssen jedoch für die Anwendung der vorgestellten SMC-Methodik möglichst genau spektral charakterisiert werden. Die erforderlichen spektralen Informationen des DUT werden anhand der PMBS-Methodik bestimmt, indem eine spektrale Messung in Basisspektren zerlegt

wird. Im Hinblick auf die spektrale Charakterisierung des Messsystems müssen hier die spektralen Empfindlichkeiten des Empfängers und die des Schirmes bestimmt werden. Wenn diese genau bekannt sind, werden korrekte winkelaufgelöste Spektren mit der Methodik auf Sensorfusionsbasis ermittelt. Die gesamte bekannte spektrale Information wird hierfür in der Matrix  $M_{ST}$  zusammengefasst.

Die entwickelte Methodik wurde ebenfalls bei einem marktrelevanten LED-Automobilbeleuchtungssystem angewendet und erfolgreich spektral charakterisiert.

## 8.2 AUSBLICK

Der in dieser Arbeit vorgestellte Sensorfusionsansatz kann für die direkte Charakterisierung von winkelaufgelösten spektralen Informationen verwendet werden. Hierfür sind sowohl eine spektrale Messung als auch eine Filterkammermessung pro LED-Quelle des Beleuchtungssystems nötig. Eine colorimetrische Punktmessung kann ebenfalls für eine absolute Normierung verwendet werden.

In den betrachteten Messungen des entwickelten Normal und des LED-Automobilscheinwerfers war es nicht notwendig, spektrale Abhängigkeiten von zusätzlichen spektralen Effekten, wie zum Beispiel chromatische Aberrationen an Linsen oder dispersive Effekte an Prismen, in der Matrix  $M_{ST}$  zu berücksichtigen. Die spektrale Charakterisierung des Messsystems könnte aber erweitert werden, um solche Effekte mit der entsprechenden Modellierung einkalkulieren zu können.

Die Möglichkeit, die modellierten spektralen Informationen zur Korrektur der spektralen Fehlanpassung von optisch gewichteten Empfängern anzuwenden, wird vor allem sehr brauchbar, wenn der Empfänger eine schlechte spektrale Anpassung besitzt. Wenn das verwendete Messgerät eine sehr gute spektrale Anpassung hat, können die Effekte der spektralen Modellierung und die entsprechende Messunsicherheit der spektralen Korrektur sogar größer als der eigentliche Korrekturwert sein.

Ein anderer offener Punkt in dieser Arbeit ist die Messunsicherheitsanalyse sowohl der modellierten Amplituden anhand von kamerabasierten Messungen, als auch die Messunsicherheit der benötigten Kameramodellparameter beim Zusammenfügen der Teil-LVKs. Für die Messunsicherheitsanalyse der spektralen Amplituden gibt es schon erste Ansätze, die in dieser Arbeit vorgestellt wurden. Die Problematik liegt hier in der Messunsicherheitsbestimmung der spektralen Informationen der Matrix  $M_{s\tau}$ , welche von einem nationalen Metrologie-Institut wie die PTB, durchgeführt werden sollte. Die Kombination der Teil-LVKs zu einer kompletten Verteilung mit dem vorgestellten Image-Merging-Verfahren hat in dieser Arbeit gute Ergebnisse erzielt. Jedoch sind die mit diesem Zweck verwendeten Kameramodellparameter wie Brennweite oder „principal point“ der Kamera entweder aus dem Datenblatt übernommen oder wurden durch Kalibrierungsverfahren bestimmt. Genauere Parameterwerte können zur Bestimmung der Messunsicherheit der berechneten Winkelkoordinaten und zur Minimierung des Messunsicherheitsbeitrags dieses Verfahrens zur SCM-Methodik eingesetzt werden. Eine Messunsicherheit der Winkelpositionierung mit dem Goniometer und der verwendeten Koordinatensysteme fehlt ebenfalls. Erste Ansätze und Kalibrierungsalternativen anhand von Photogrammetrie-Techniken und Normale

auf Laser-Basis werden in parallelen Projekten mit diesem Ziel getestet.

Eine Grenze der entwickelten Fernfeld Sensorfusionstechnik ist, dass sie die erforderliche Genauigkeit bezüglich der winkelaufgelösten modellierten Spektren nicht liefern kann, wenn starke Überlappungen im Fernfeld auf dem Messschirm zwischen LED-Quellen mit ähnlichen spektralen Verläufen bestehen. Dies ist z. B. bei der Trennung einer grünen von einer weißen LED-Quelle der Fall. Hier ist es zwar möglich, mit erhöhtem Aufwand die Basisspektren der LED zu bestimmen, aber nicht die entsprechenden Farbregionen im Fernfeld anhand Filterkammermessungen zu trennen. Diese Trennung ist erforderlich für eine korrekte Modellierung der variablen spektralen Amplituden der LED-Quellen im Winkelraum. In marktüblichen Beleuchtungssystemen treten solche Fälle allerdings sehr selten auf.

Eine winkelaufgelöste spektrale Modellierung anderer Arten von Lichtquellen als LED könnte mit der vorgestellten Sensorfusionsmethodik möglich sein, wenn ein Modell zur Beschreibung der spektralen Elemente des Systems vorhanden ist. Ein Beispiel wäre die Chlorophyll-Analyse für die Untersuchung der Konzentration im Wasser, indem Filterkammermessungen mit Drohnen erfasst werden. Mit einer entsprechenden spektralen Funktion des Chlorophylls könnte ihre Konzentration mit den ermittelten spektralen Amplituden modelliert werden.

# LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Bundesministerium für Bildung und Forschung, „Agenda Photonik 2020: Trends, Herausforderungen, Chancen,“ VDI Technologiezentrum GmbH, 2016.
- [2] Bundesverband der Deutschen Industrie, „Was bedeutet Industrie 4.0?,“ 12. 10. 2015. [Online]. Available: <https://bdi.eu/artikel/news/was-bedeutet-industrie-40/>.
- [3] G. Leschhorn und R. Young, Handbook of LED and SSL Metrology, Instrument Systems GmbH, 2017.
- [4] A. Sperling, „Die Candela als Maßeinheit des Lichtes,“ *PTB Mitteilungen: Das Jahr des Lichtes*, Bd. 125, Nr. 4, 2015.
- [5] H.-J. Hentschel, Licht und Beleuchtung, 5. Hrsg., Hüthig GmbH & Co. KG Heidelberg, 2002.
- [6] C. DeCusatis, Handbook of Applied Photometry, Springer-Verlag, 1997.
- [7] D. Gall, Grundlagen der Lichttechnik: Kompendium, Richard Pflaum Verlag GmbH & Co. KG München, 2004.
- [8] H. Naumann, G. Schröder und M. Löffler-Mang, Handbuch Bauelemente der Optik: Grundlagen, Werkstoffe, Geräte, Messtechnik, 7. Hrsg., Hanser Verlag, 2014.

- [9] International Commission on Illumination, "CIE International Standard S 025/E:2015: Test method for LED lamps, LED luminaires and LED modules," 2015.
- [10] International Commission on Illumination, „Standard CIE S 023/E:2013: Characterization of the Performance of Illuminance,“ 2013.
- [11] M. Schuster, S. Nevas, A. Sperling und S. Winter, „Korrekturmöglichkeiten der spektralen Fehlanpassung von Photometerköpfen,“ *LiTG-Fachgebiet Messen und Bewerten – Ausgewählte Themen der Lichtmesstechnik*, Nr. 27, 2015.
- [12] I. L. Sayanca, K. Trampert und C. Neumann, „Einfluss des spectral mismatch correction factors (SMCF) bei der Lichtstrombestimmung,“ in *LICHT 2016*, Karlsruhe, 2016.
- [13] U. Krüger und P. Blattner, „Spectral mismatch correction factor estimation for white LED spectra based on the photometer's  $f_1$  value,“ in *CIE x038:2013 Proceedings of the CIE Conference "Towards a New Century of Light"*, Paris, 2013.
- [14] I. L. Sayanca, K. Trampert und C. Neumann, „Fehlanpassung der Normspektralwertfunktionen bei spektral integrierender Farbmessung,“ in *Lux junior 2017*, Dörfeld, 2017.
- [15] International Commission on Illumination, „Technical Report CIE 15:2004: Colorimetry,“ 2004.
- [16] Deutsches Institut für Normung, „DIN EN ISO 11164-1:2011: Teil 1: CIE farbmimetrische Normalbeobachter,“ 2011.

- [17] M. Richter, Einführung in die Farbmétriek, de Gruyter, 1980.
- [18] T. Q. Khanh, P. Bodrogi, Q. T. Vihn und H. Winkler, LED lighting: technology and perception, Wiley-VCH, 2015.
- [19] Deutsches Institut für Normung, „DIN EN 13032-1: Licht und Beleuchtung – Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten – Teil 1: Messung und Datenformat,“ 2012.
- [20] T. Gerloff, „Metrologie für moderne Lichtquellen: LEDs und OLEDs,“ *PTB Mitteilungen: Das Jahr des Lichtes*, Nr. 4, 2015.
- [21] R. Heinz, Grundlagen der Lichterzeugung : von der Glühlampe bis zum Laser, 4 Hrsg., Rùthen : Highlight Verl.-Ges., 2011.
- [22] T. Bonenberger, „LED Farbmischung mit chaotischen Lichtleitern,“ KIT Scientific Publishing, Dissertation, 2016.
- [23] EU Richtlinie 874/2012, „Energieverbrauchskennzeichnung von elektrischen Lampen und Leuchten,“ Amtsblatt der Europäischen Union, 2012.
- [24] Instrument Systems GmbH, „CAS 140CT Array Spektrometer,“ [Online]. Available: <http://www.instrumentsystems.de/fileadmin/editors/downloads/Products/CAS140CT.pdf>. [Zugriff am Juli 2018].
- [25] ECE Vehicle Regulations - 1958 Agreement, „Regulation No. 123 - Rev.2: Adaptive front-lighting systems (AFS),“ United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), 2016.

- [26] I. Moreno und C.-C. Sun, „Three-dimensional measurement of light-emitting diode radiation pattern: a rapid estimation,“ *Measurement Science and Technology*, Bd. 20, Nr. 7, Juni 2009.
- [27] M. Bürmen, F. Pernuš und B. Likar, „Automated optical quality inspection of light emitting diodes,“ *Measurement Science and Technology*, Bd. 17, Nr. 6, Mai 2006.
- [28] V. A. Jacobs, J. Audenaert, J. Bleumers, G. Durinck, P. Rombauts und P. Hanselaer, „Rayfiles including spectral and colorimetric information,“ *Optics Express*, Nr. 23, pp. A361-A370, 2015.
- [29] D. Hansen, „Spectral Raydata for Simulation of Color Rendering Indices,“ in *LED Professional Symposium + Expo*, Begrenz, 2013.
- [30] I. Rotscholl, „Spectral near field data of LED systems for optical simulations,“ KIT Scientific Publishing, Dissertation, 2017.
- [31] N. Welsch und C. C. Liebmann, *Farben : Natur, Technik, Kunst, Spektrum Akademischer Verlag*, 2012.
- [32] National Institute of Standards and Technology, „NIST Atomic Spectra Database Lines Form,“ [Online]. Available: [https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines\\_form.html](https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html). [Zugriff am Mai 2018].
- [33] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP und OIML, „JCGM 200:2012 International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM),“ Joint Committee for Guides in Metrology, 2012.

- [34] F. Adunka, *Meßunsicherheiten: Theorie und Praxis*, Vulkan-Verlag Essen, 2000.
- [35] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP und OIML, „JCGM 104:2009 Evaluation of Measurement Data - An Introduction to the "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" and related Documents,“ Joint Committee for Guides in Metrology, 2009.
- [36] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP und OIML, „JCGM 100:2008 Evaluation of Measurement Data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement,“ Joint Committee for Guides in Metrology, 2010.
- [37] K. Weise und W. Wöger, *Meßunsicherheit und Meßdatenauswertung*, Wiley-VCH Verlag GmbH, 1999.
- [38] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP und OIML, „JCGM 102:2011 Evaluation of measurement data – Supplement 2 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Extension to any number of output quantities,“ Joint Committee for Guides in Metrology, 2011.
- [39] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP und OIML, „JCGM 101:2008 Evaluation of Measurement Data – Supplement 1 to the "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" – Propagation of Distributions using a Monte Carlo Method,“ Joint Committee for Guides in Metrology, 2008.

- [40] M. Zeier, „Der ISO-GUM erhält Verstärkung,“ *METInfo*, Bd. 3, Nr. 15, 2008.
- [41] M. Cox und B. R. L. Siebert, „The use of a Monte Carlo method for evaluating uncertainty and expanded uncertainty,“ *Metrologia*, Nr. 43, pp. 178-188, 2006.
- [42] G. Wübbeler, M. Krystek und C. Elster, „Evaluation of measurement uncertainty and its numerical calculation by a Monte Carlo method,“ *Measurement Science and Technology*, Nr. 19, 2008.
- [43] M. Solaguren-Beascoa Fernández, J. M. Alegre Calderón und P. M. Bravo Díez, „Implementation in MATLAB of the adaptive Monte Carlo method for the evaluation of measurement uncertainties,“ *Accreditation and Quality Assurance*, Bd. 14, Nr. 2, pp. 95-106, 2009.
- [44] International Commission on Illumination, „Technical Report CIE 202:2011: spectral responsivity measurement of detectors, radiometers and photometers,“ 2011.
- [45] E. R. Woolliams, „Determining the uncertainty associated with integrals of spectral quantities: A report of the EMRP Joint Research Project,“ National Physical Laboratory, 2013.
- [46] E. Woolliams und T. Goodman, „Determining the uncertainty associated with an integrated quantity calculated from correlated spectral data,“ in *CIE Conference*, Hangzhou, China, 2012.

- [47] U. Krüger, P. Blattner, R. Hornischer, W. Bechter, W. Steudtner und W. Jordan, „Messunsicherheit photometrischer Messungen unter Berücksichtigung der Anforderungen der prEN13032-T4,“ in *Gemeinschaftstagung LICHT*, Den Haag, Niederlande, 2014.
- [48] S. Park, D.-H. Lee, Y.-W. Kim und S.-N. Park, „Uncertainty evaluation for the spectroradiometric measurement of the averaged light-emitting diode intensity,“ *Applied Optics*, Bd. 46, Nr. 15, 2007.
- [49] N. Pousset, B. Rougié und A. Razet, „Uncertainty evaluation for measurement of LED colour by Monte Carlo simulations,“ *Metrologia*, Nr. 49, pp. 704-718, 2009.
- [50] Y. S. Zong, S. W. Brown, B. C. Johnson, K. R. Lykke und Y. Ohno, „Simple spectral stray light correction method for array spectroradiometers,“ *Applied Optics*, Bd. 45, Nr. 6, 2006.
- [51] S. Nevas, G. Wübbeler, A. Sperling, C. Elster und A. Teuber, „Simultaneous correction of bandpass and stray-light in array spectroradiometer data,“ *Metrologia*, Nr. 49, pp. 43-47, 2012.
- [52] D. Konjhodzic, „Stray light corrected spectroradiometers in application,“ in *LICHT 2016*, Karlsruhe, 2016.
- [53] E. R. Woolliams, R. Baribeau, A. Bialek und M. G. Cox, „Spectrometer bandwidth correction for generalized bandpass functions,“ *Metrologia*, Nr. 48, pp. 164-172, 2011.

- [54] S. Eichstädt, F. Schmähling, G. Wübbeler, K. Anhalt, L. Bünger, U. Krüger und C. Elster, „Comparison of the Richardson-Lucy method and a classical approach for spectrometer bandpass correction,“ *Metrologia*, Nr. 50, pp. 107-118, 2013.
- [55] S. Eichstädt und F. Schmähling, „Download der Richardson-Lucy Software,“ 2014. [Online]. Available: <https://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt8/fb-84/ag-842/dynamischemessungen-842/download-richardson-lucy.html>. [Zugriff am Februar 2018].
- [56] F. Schmähling, G. Wübbeler, U. Krüger, B. Ruggaber, F. Schmidt, R. D. Taubert, A. Sperling und C. Elster, „Uncertainty evaluation and propagation for spectral measurements,“ *Color Research and Application*, Nr. 43, pp. 6-16, 2017.
- [57] V. Spruyt, „How to draw an error ellipse representing the covariance matrix?,“ [Online]. Available: [www.visiondummy.com/2014/04/draw-error-ellipse-representing-covariance-matrix/](http://www.visiondummy.com/2014/04/draw-error-ellipse-representing-covariance-matrix/). [Zugriff am Februar 2018].
- [58] TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, „LID Checker: R&D and production accompanying measuring technique for luminous intensity distribution analysis,“ 2017. [Online]. Available: [https://www.technoteam.de/apool/tnt/content/e5183/e5432/e5733/e7273/KMP-LIDweb\\_ger.pdf](https://www.technoteam.de/apool/tnt/content/e5183/e5432/e5733/e7273/KMP-LIDweb_ger.pdf). [Zugriff am Mai 2018].
- [59] M. Planeck, „Steulichtunterdrückung für direkte und indirekte Lichtstärkeverteilungsmessungen im Fernfeld,“ Karlsruher Institut für Technologie, Masterarbeit, 2015.

- [60] TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, *Video photometer: imaging light and colour measuring technique LMK*, 2016.
- [61] TAMRON Co. Ltd., „Tamron BIZ | Model: M23FM25,“ 2013. [Online]. Available: <http://www.tamron.biz/en/data/ipcctv/pdf/spec/h/M23FM25.pdf>. [Zugriff am Mai 2018].
- [62] P. Corke, *Robotics, Vision and Control*, Springer, 2011.
- [63] R. Hartley und A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, 2. ed. Hrsg., Cambridge University Press, 2006.
- [64] R. C. Gonzalez, R. E. Woods und S. L. Eddins, *Digital Image Processing using MATLAB*, 2. Hrsg., Gatesmark Publishing, 2009.
- [65] I. L. Sayanca, K. Trampert und C. Neumann, „Indirect Light Intensity Distribution Measurement using Image Merging,“ in *Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing XI*, Glasgow, UK, 2017.
- [66] Sony Semiconductor Solutions Corporation, „ICX825ALA/AQA | Sony Semiconductors Solution,“ 2018. [Online]. Available: [http://www.sony-semicon.co.jp/products\\_en/new\\_pro/may\\_2014/icx825\\_e.html](http://www.sony-semicon.co.jp/products_en/new_pro/may_2014/icx825_e.html). [Zugriff am Mai 2018].
- [67] LMT Lichtmesstechnik GmbH Berlin, „Goniometer LMT GO-H 1300,“ [Online]. Available: <http://www.lmt-berlin.de/de/goh1300.html>. [Zugriff am Mai 2018].

- [68] D. Lindner und S. Winter, „Rückführung in der Photometrie - die Realisierung und Rückführung der Candela,“ *PTB Mitteilungen: Das Jahr des Lichtes*, Bd. 4, Nr. 125, 2015.
- [69] A. Pera, „Streulichtanalyse bei kamerabasierten Lichtstärkeverteilungsmessungen,“ Karlsruher Institut für Technologie, Masterarbeit, 2017.
- [70] OSRAM Opto Semiconductors GmbH, *OSRAM OSTAR Stage Datasheet: LE RTDUW S2W*, 2017.
- [71] M. Scholdt, „Temperaturbasierte Methoden zur Bestimmung der Lebensdauer und Stabilisierung von LEDs im System,“ KIT Scientific Publishing, Dissertation, 2013.
- [72] C. Schreiber, „Entwicklung eines multidimensionalen photometrischen Normals auf LED-Basis,“ Karlsruher Institut für Technologie, Masterarbeit, 2017.
- [73] Opsira GmbH, „Material data sheet diffusil-T“.
- [74] I. Rotscholl, M. Katona, K. Trampert, U. Krüger, F. Schmidt und C. Neumann, „Hyperspectral LED models for optical simulations,“ *Optics Express*, Bd. 24, Nr. 26, pp. A1597-A1611, 2016.
- [75] I. Rotscholl, K. Trampert, U. Krüger, M. Perner, F. Schmidt und C. Neumann, „Determination of tailored filter sets to create rayfiles including spatial and angular resolved spectral information,“ *Optics Express*, Bd. 23, Nr. 23, pp. 29543-29554, 2015.

- [76] F. Reifegerste und J. Lienig, „Modelling of the Temperature and Current Dependence of LED Spectra,“ *Journal of Light & Visual Environment*, Bd. 32, Nr. 3, pp. 288-294, 2008.
- [77] SONY Corporation, *Datasheet ICX285AL: Diagonal 11 mm (Type 2/3) Progressive Scan CCD Image Sensor with Square Pixel for B/W Cameras*.
- [78] CREE Inc., „LED Color Mixing: Basics and Background,“ 2010-2016.
- [79] Edmund Optics, „Langpassfarbfilter aus Glas,“ [Online]. Available: <https://www.edmundoptics.de/optics/optical-filters/longpass-edge-filters/longpass-glass-color-filters/#resources>.



# ABBILDUNGSVERZEICHNIS

<b>Abbildung 1.1:</b>	Hell-Dunkel-Grenze eines LED Automobilscheinwerfers .....	3
<b>Abbildung 1.2:</b>	Beispiel LED-Leuchte mit stark richtungsabhängiger spektraler Information.....	4
<b>Abbildung 2.1:</b>	Hellempfindlichkeitsfunktion $V(\lambda)$ .....	11
<b>Abbildung 2.2:</b>	Partielle Filterung für: a) $V(\lambda)$ Funktion und b) Normalspektralwertfunktionen $x(\lambda)$ , $y(\lambda)$ und $z(\lambda)$ .....	13
<b>Abbildung 2.3:</b>	Spektralwertfunktionen des farbmetrischen Normalbeobachters $x(\lambda)$ , $y(\lambda)$ und $z(\lambda)$ (oben) und Darstellung der Farbkoordinaten bei der $u'v'$ -Farbtafel (unten) .....	18
<b>Abbildung 2.4:</b>	a) Gemessene mattierte Glühlampe, b) resultierende LVK und c) Lichtstärkeverteilungskörper.....	20
<b>Abbildung 2.5:</b>	Farbige LED-Spektren (oben) und Spektrum von phosphorkonvertierenden LED (unten) .....	22
<b>Abbildung 3.1:</b>	Modifizierter Czerny-Turner spektraler Aufbau: a) Monochromator mit Punkt-detektor [8, p. 456 Abb. 16.10 vgl.] und b) Polychromator mit Zeilenarray- Detektor [24, p. 2].....	26

	Relative spektrale Fehlanpassung eines Photometers. ....	28
<b>Abbildung 3.3:</b>	Beispiel Kalibrierlampe für photometrische Kalibrierung: a) Lampe Wi40 [8, p. 173 Abb 6.4] , b) spektrale Charakteristik und c) sichtbares Spektrum der Normlichtart A Lampe [31, p. 299] .....	34
<b>Abbildung 3.4:</b>	Spektrales Normal: a) Gasentladungslampen [20, p. 37 Bild 10] , b) spektrale Charakteristik und c) [31, p. 299] Linienspektrum einer HgAr-Lampe .....	35
<b>Abbildung 4.1:</b>	Spektrale Messung einer LED zur Veranschaulichung der spektralen Messunsicherheit.....	48
<b>Abbildung 4.2:</b>	Korrelierte Messunsicherheit der Wellenlänge in zwei umgekehrten Richtungen (rechts und links) .....	51
<b>Abbildung 4.3:</b>	prozentuale unkorrelierte (zufällige) Amplitudenvariationen, bezogen auf den aktuellen Wert .....	53
<b>Abbildung 4.4:</b>	Darstellung der MC-Simulationsergebnisse.....	55
<b>Abbildung 4.5:</b>	Zusammenfassung der Messunsicherheitsanalyse von spektralen Messungen anhand MC-Simulationen.....	57
<b>Abbildung 4.6:</b>	Elliptische Überdeckungsregion für die Messunsicherheitsanalyse der Farbkoordinaten einer LED. ....	64

<b>Abbildung 5.1:</b>	Verwendete Goniometer mit Farbmesskamera inklusive einstellbare Befestigung .....	67
<b>Abbildung 5.2:</b>	a) Messsystemkonfiguration [59, p. 17 vgl.] und b) Positionierung der Farbkamera (ILMD) [59, p. 25 vgl.] .....	68
<b>Abbildung 5.3:</b>	Installiertes Blendensystem: a) Seitenansicht mit drei Querblenden [59, p. 21] und b) Draufsicht mit den Seitenblenden [59, p. 28] .....	71
<b>Abbildung 5.4:</b>	Messraum mit Schirm aus der Lichtquelleperspektive: a) ohne und b) mit Blendensystem.....	72
<b>Abbildung 5.5:</b>	Zusammenhang zwischen Welt- und Pixelkoordinaten beim Kameramodell [62, p. 256 vgl. Abb. 11.5] .....	75
<b>Abbildung 5.6:</b>	a) Verzerrte Kameraperspektive und b) projizierte Laser-Matrix zur Bestimmung der optischen Achse .....	77
<b>Abbildung 5.7:</b>	Kameraperspektive: a) verzerrte und b) korrigierte Kameraaufnahme mit der Transformation von Formel (5.4).....	79
<b>Abbildung 5.8:</b>	Homographie-Bestimmung anhand von acht Punkte: a) vier Ecken Laser-Matrix und b) Rechteck-Punkte.....	80
<b>Abbildung 5.9:</b>	Entzerrte Schirmaufnahme, bei der die „Region of Interest“ und „principal point“ festgelegt sind .....	81

<b>Abbildung 5.10:</b>	Beziehung zwischen den Pixel-, Kugel- und kartesischen Koordinaten für einen schematischen Strahl.....	82
<b>Abbildung 5.11:</b>	Projektion eines Kugelpunkts auf dem Schirm, notwendig für indirekte Farbverteilungsmessungen.....	84
<b>Abbildung 5.12:</b>	Verwendete Goniometer (oben) [67] und Filterkameraaufnahme ( $Y$ ) eines LED-Automobilscheinwerfers in der $(0,0)$ Goniometerposition (unten) .....	86
<b>Abbildung 5.13:</b>	Perspektivenkorrektur anhand von Homographien.....	87
<b>Abbildung 5.14:</b>	Bestimmung des Streulicht-Offsets eines Halbraum-Strahlers aufgrund der Rückreflexionen.....	94
<b>Abbildung 5.15:</b>	Räumliche Abhängigkeiten der Reflexionseigenschaften des verwendeten Schirms .....	96
<b>Abbildung 5.16:</b>	a) Verwendete LED der Firma OSRAM Opto Semiconductors GmbH [70] und b) entwickelte Metallkernplatine mit fünf räumlich getrennten LED-Chips .....	99
<b>Abbildung 5.17:</b>	a) CAD-Modell des Normals mit Blendensystem, b) Messobjekt mit den vier äußeren LED mit jeweils einer Farbe, c) Beispiel erzeugter additiver Farbeffekte (Abstand ca. 30 cm) und d) Farbeffekte im Fernfeld (10 m) .....	100

<b>Abbildung 5.18:</b>	a) Mehrdimensionales Normal mit Ulbricht-Kugel, Diffusor und Blendensystem und b) homogen leuchtende Flächen mit verschiedenen Farbkombinationen .....	103
<b>Abbildung 5.19:</b>	Darstellung der Kern- und Halbschattenbereiche einer symmetrischen homogen leuchtenden Fläche [72, p. 23 vgl.] .....	105
<b>Abbildung 6.1:</b>	Basisspektren einer RGB-LED.....	115
<b>Abbildung 6.2:</b>	Basisspektren weißer LED.....	116
<b>Abbildung 6.3:</b>	Erzeugte Farbverteilung in zunehmendem Abstand des Testobjekts mit der Farbkombination R, G und B. ....	118
<b>Abbildung 6.4:</b>	Getrennte Messung der Farbregionen .....	119
<b>Abbildung 6.5:</b>	Erfasste R-, G- und B-Farbregionen mit den Bandpass-Glasfiltern der Farbkamera $X_{kurz}$ , $X_{lang}$ und $Y$ .....	121
<b>Abbildung 6.6:</b>	Schritte der SCM-Methodik für eine relative winkelaufgelöste spektrale Charakterisierung .....	125
<b>Abbildung 6.7:</b>	Schritte für eine absolute Normierung der modellierten spektralen Werte .....	128
<b>Abbildung 6.8:</b>	Beispiele von erzeugten spektralen Charakteristiken des Testobjekts an verschiedenen Winkelkoordinaten. ....	129
<b>Abbildung 6.9:</b>	Normierte spektrale Empfindlichkeit der optischen Filter der verwendeten Farbkamera [60] .....	131

<b>Abbildung 6.10:</b>	Reflexionsgrad der verwendeten weißen Farbe des Schirmes.....	132
<b>Abbildung 6.11:</b>	Reflexionsverhalten des weißen Schirms.....	133
<b>Abbildung 6.12:</b>	Vergleich der erreichten spektralen Anpassung für den Z-Kanal, wenn a) nur ein Bandpass-Filter oder b) die lineare Kombination aller vier Filter verwendet wird .....	136
<b>Abbildung 6.13:</b>	Analysierter Betrag der spektralen Fehlanpassung der Farbkanäle beim untersuchten R-G-B-Testobjekt .....	138
<b>Abbildung 7.1:</b>	a) Verwendete Einkoppeloptik EOP 120 [24], b) technische Zeichnung [24] und c) gezoomtes Kamerabild mit Winkelkoordinaten .....	143
<b>Abbildung 7.2:</b>	a) Verwendete Konfiguration des Normals für die Validierung des Image-Merging, b) direkte Ansicht der leuchtenden Fläche und c) Lichtverteilung in 10 m Abstand .....	146
<b>Abbildung 7.3:</b>	Bestimmung des Lichtschwerpunkt anhand eines Kreuzlasers.....	147
<b>Abbildung 7.4:</b>	a) Winkelaufgelöste Photometermessung und b) Vergleich einer konstanten A-Ebene der Messung mit der theoretischen mathematischen Funktion.....	148
<b>Abbildung 7.5:</b>	Prozentuale Abweichung zwischen der goniophotometrischen Messung und deren Modellierung .....	149
<b>Abbildung 7.6:</b>	Kameramessungen der Teil-LVK.....	150
<b>Abbildung 7.7:</b>	Kamerabasierte LVK-Messung.....	151

<b>Abbildung 7.8:</b>	Vergleich der Messergebnisse von Photometer- und Kameramessungen: a) bei der vertikalen Ebene der optischen Achse und b) relative Abweichungen .....	152
<b>Abbildung 7.9:</b>	Relative Abweichung zwischen kamerabasierter Messmethodik und Referenzmessung.....	154
<b>Abbildung 7.10:</b>	Untersuchte Farbkombinationen in ca. 30cm (erste Reihe) und 10m Abstand (zweite) vom Messobjekt .....	157
<b>Abbildung 7.11:</b>	Vergleich der gemessenen Spektren der einzeln LED mit den anhand phänomenologischer Funktionen modellierten R-, G- und B-Teilspektren (von oben nach unten) .....	159
<b>Abbildung 7.12:</b>	Vergleich des gemessenen Spektrums mit der gewichteten Summe der Teilspektren.....	161
<b>Abbildung 7.13:</b>	Relative Abweichung der modellierten Spektren relativ zu Messungen unter Beachtung der MU.....	162
<b>Abbildung 7.14:</b>	Dargestellte Farbkoordinaten der gemessenen und modellierten LED-Farben.....	164
<b>Abbildung 7.15:</b>	Spektrale Validierung der mit „Smoothing Spline“ Interpolation-Techniken erzeugten Basisspektren.....	166
<b>Abbildung 7.16:</b>	Spektrale Amplituden und Farbkoordinaten der gemessenen und modellierten Spektren bei beliebigen Winkelkoordinaten.....	168

<b>Abbildung 7.17:</b>	Erfasste Farbwerte beim R-G-B-Messobjekt: Referenzmessung mit Colorimeter (obere Reihe) und kamerabasierte Farbwertmessung (untere Reihe).....	170
<b>Abbildung 7.18:</b>	Betrag der berechneten spektralen Korrekturfaktoren für: Colorimeter (links) und Kamera (rechts) .....	171
<b>Abbildung 7.19:</b>	Relative Abweichung zwischen Kamera- und Referenzmessung (ohne spektrale Korrektur).....	172
<b>Abbildung 7.20:</b>	Relative Abweichung zwischen der spektral korrigierten Kamera- und Referenzmessung .....	173
<b>Abbildung 7.21:</b>	Farbabstand $\Delta u'v'$ der Kamera- und Farbreferenzmessung beim R-G-B- Messobjekt.....	174
<b>Abbildung 7.22:</b>	Entzerrte Aufnahmen der Teil-LVKs .....	175
<b>Abbildung 7.23:</b>	Fusionierte Lichtverteilung des Kanals Y .....	176
<b>Abbildung 7.24:</b>	Pixelaufgelöste SMCF für den Z-Kanal.....	177
<b>Abbildung 7.25:</b>	Relative Abweichung der Referenzmessung und Farbkameramessung des Automobilscheinwerfers .....	178
<b>Abbildung 7.26:</b>	Farbabstände $\Delta u'v'$ der Kamera- und Farbreferenzmessung beim LED- Automobilscheinwerfer.....	179
<b>Abbildung 7.27:</b>	Gemessene und modellierte Spektren und Farbkoordinaten unter Beachtung der Messunsicherheit.....	185

---

<b>Abbildung 7.28:</b>	Farbwerte des R-G-B Messobjekts auf Basis der mit SCM-Methodik modellierten Spektren .....	189
<b>Abbildung 7.29:</b>	Farbabstand $\Delta u'v'$ der korrigierten Farbreferenzmessung mit den anhand der SCM-Methodik ermittelten Farbkoordinaten beim R-G-B Messobjekt .....	191
<b>Abbildung B.1:</b>	Relativer Fehler der spektralen Anpassung an die Normalspektralwertfunktion $\bar{y}(\lambda)$ .....	243
<b>Abbildung B.2:</b>	Relativer Fehler der spektralen Anpassung an die Normalspektralwertfunktion $\bar{x}_{kurz}(\lambda)$ .....	244
<b>Abbildung B.3:</b>	Relativer Fehler der spektralen Anpassung an die Normalspektralwertfunktion $\bar{x}_{lang}(\lambda)$ .....	244
<b>Abbildung B.4:</b>	Relativer Fehler der spektralen Anpassung an die Normalspektralwertfunktion $\bar{z}(\lambda)$ .....	245
<b>Abbildung C.5:</b>	Normierte spektrale Empfindlichkeit der verwendeten Langpass-Glasfilter .....	247
<b>Abbildung C.6:</b>	Trennung der R-G-B-Farbgionen mit den entsprechenden Langpass-Glasfilterkombinationen .....	248
<b>Abbildung C.7:</b>	Gewichtung der Basisspektren anhand von Langpass-Glasfiltern .....	248
<b>Abbildung C.8:</b>	Vergleich des gemessenen Spektrums mit der gewichteten Summe der Teilspektren anhand von Langpass-Glasfiltern .....	249

<b>Abbildung C.9:</b>	Spektrale Amplituden bei beliebigen Winkelkoordinaten, sowie Vergleich der Farbkoordinaten anhand von Langpass-Glasfiltern.....	250
<b>Abbildung C.10:</b>	Normierte spektrale Empfindlichkeit der verwendeten Interferenzfilter.....	251
<b>Abbildung C.11:</b>	Trennung der R-G-B-Farbregionen mit den entsprechenden Interferenzfiltern .....	251
<b>Abbildung C.12:</b>	Gewichtung der Basisspektren anhand von Interferenzfiltern .....	252
<b>Abbildung C.13:</b>	Vergleich des gemessenen Spektrums mit der gewichteten Summe der Teilspektren anhand von Interferenzfiltern .....	252
<b>Abbildung C.14:</b>	Spektrale Amplituden bei beliebigen Winkelkoordinaten, sowie Vergleich der Farbkoordinaten anhand von Interferenzfiltern .....	253
<b>Abbildung C.15:</b>	Erfasste B- und Leuchtstoff-Farbregionen mit den Bandpass-Glasfiltern: a) $X_{kurz}$ , b) $X_{lang}$ und c) $Y$ .....	254
<b>Abbildung C.16:</b>	Vergleich des gemessenen Spektrums mit der gewichteten Summe der B- und Leuchtstoff-Teilspektren .....	254
<b>Abbildung C.17:</b>	Spektrale Amplituden bei beliebigen Winkelkoordinaten, sowie Vergleich der Farbkoordinaten (WW).....	255
<b>Abbildung C.18:</b>	a) Farbbild W-W Messobjekt und b) Farbabstand $\Delta u'v'$ der Kamera- und Farbreferenzmessung .....	255

**Abbildung C.19:** Analysierter Betrag der spektralen Fehlanpassung der Farbkanäle beim untersuchten W-W-Testobjekt .....256

**Abbildung C.20:** Erfasste R-, B- und Leuchtstoff-Farbkregionen mit den Bandpass-Glasfiltern  $X_{kurz}$ ,  $X_{lang}$  und Y .....257

**Abbildung C.21:** Vergleich des gemessenen Spektrums mit der gewichteten Summe der R-, B- und Leuchtstoff-Teilspektren.....257

**Abbildung C.22:** Spektrale Amplituden bei beliebigen Winkelkoordinaten, sowie Vergleich der Farbkoordinaten (RW) .....258

**Abbildung C.23:** a) Farbbild R-W Messobjekt und b) Farbabstand  $\Delta u'v'$  der Kamera- und Farbreferenzmessung.....258

**Abbildung C.24:** Analysierter Betrag der spektralen Fehlanpassung der Farbkanäle beim untersuchten R-W-Testobjekt.....259



# TABELLENVERZEICHNIS

<b>Tabelle 4.1:</b>	Erweiterungsfaktoren für multivariate Ausgangsgrößen (bis fünf) mit Vertrauensniveau $p = 95\%$ . ....	63
<b>Tabelle 6.1:</b>	Phänomenologische LED-Funktionen .....	114
<b>Tabelle 7.1:</b>	Farbmetrische Analyse der modellierten und gemessenen LED-Spektren.....	163
<b>Tabelle 7.2:</b>	Messunsicherheitsanalyse der SMCF-Werte....	188
<b>Tabelle A.1:</b>	Wellenlängenabhängige Bestrahlungsstärkemessunsicherheit des verwendeten Array-Spektrometers .....	241



# ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

<b>Abkürzung</b>	<b>Beschreibung</b>
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
DUT	engl. <i>Device Under Test</i>
LED	engl. <i>Light emitting diode</i> , Licht emittierende Diode
SMCF	engl. <i>Spectral mismatch correction factor</i>
PMBS	engl. <i>Physically Motivated Basis Spectra</i>
SCM	engl. <i>Spectral Camera Measurement</i>
RGBW	Rot Grün Blau Weiß
ILMD	engl. <i>Imaging Luminance Measurement Device</i>
CCD	engl. <i>Charged Coupled Device</i>
CMOS	engl. <i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i>
LVK	Lichtstärkeverteilungskurve
CIE	frz. <i>Commission Internationale de l'Éclairage</i>
VIM	frz. <i>Vocabulaire Internationale de Métrologie</i>
UV-VIS-IR	engl. <i>Ultraviolet-Visible-Infrared</i>
UN/ECE	engl. <i>United Nations/Economic Commission for Europe</i>
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt

NIST	engl. <i>National Institute of Standards and Technology</i>
GUM	engl. <i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i>
PDF	engl. <i>Probability Density Function</i>
MCM	Monte-Carlo-Methode
MC	Monte-Carlo
MU	Messunsicherheit
ROI	engl. <i>Region of Interest</i>
PP	engl. <i>Principal Point</i>
OA	engl. <i>Optical Axis</i>
CAD	engl. <i>Computer Aided Design</i>
OLED	engl. <i>Organic Light Emitting Diode</i>

# FORMELZEICHEN

Formelzeichen	Beschreibung
$\lambda$	Wellenlänge
$V(\lambda)$	CIE-Hellempfindlichkeitsfunktion
$\Phi$	Lichtstrom
$I$	Lichtstärke
$E$	Beleuchtungsstärke
$L$	Leuchtdichte
$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda)$ und $\bar{z}(\lambda)$	CIE-Normalspektralwertfunktionen
$f'_1$	Mismatch-Index
$S_A(\lambda)$	Strahlungsfunktion Normlichtart A
$S_Z(\lambda)$	Strahlungsfunktion Lichtquelle
$x_{rel}(\lambda), y_{rel}(\lambda)$ und $z_{rel}(\lambda)$	Relative spektrale Empfindlichkeit
$X, Y$ und $Z$	CIE-Farbwerte
$u'$ und $v'$	Farbkoordinaten in CIE- $u'v'$ -Farbraum
$\Delta u'v'$	Farbortabstand
$I(\theta, \varphi)$	Lichtstärkeverteilung
$E(\theta, \varphi, r)$	Beleuchtungsstärkeverteilung

$L(\theta, \varphi, r)$	Leuchtdichteverteilung
$r$	Abstand Quelle-Empfänger
$(x, y, z)$	Kartesische Koordinaten
$(\theta, \varphi)$	Sphärische Koordinaten
$(\alpha, \beta)$	Koordinaten KFZ-Goniometer
$S_Z(\theta, \varphi, \lambda)$	Winkelaufgelöste spektrale Information
$F_{rel}(\lambda)$	Relative spektrale Empfindlichkeit (allg.)
$F(\lambda)$	Gewichtungsfunktion (allg.)
$Y_{i,\dots,n}$	Ausgangsparameter
$X_{i,\dots,n}$	Eingangsparameter
$y_{i,\dots,n}$	Schätzung des Ausgangsparameters
$x_{i,\dots,n}$	Schätzung des Eingangsparameters
$Y_i = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$	Messmodell
$U(y)$	Messunsicherheitsintervall
$u(y)$	Standard-Messunsicherheit
$p$	Vertrauensniveau (Wahrscheinlichkeit)
$k(p)$	Erweiterungsfaktor
$r(x_i, x_j)$	Korrelationskoeffizient
$c_i$	Sensitivitätskoeffizient
$g_X(\xi)$	PDF Eingangsparameter
$g_Y(\eta)$	PDF Ausgangsparameter

$M$	Anzahl der Monte-Carlo-Iterationen
$l$	Systematische Wellenlängenvariationen
$l_k$	Zufällige Wellenlängenvariationen
$R$	Systematische Amplitudenvariationen
$R_k$	Zufällige Amplitudenvariationen
$E_{test}(\lambda)$	Spektrum des DUT
$E_{ref}(\lambda)$	Spektrum des Normals (Kalibrierschein)
$S_{test}(\lambda)$	Messung Spektrum des DUT
$S_{ref}(\lambda)$	Messung Spektrum des Normals
$C_{kal}$	Spektrale Kalibrierungsfaktor
$1/a_F^*$	SMCF-Wert
$\tilde{P}(x, y, z)$	Punkt im 3-D Weltkoordinatensystem
$\tilde{p}(u, v)$	Punkt im 2-D Pixelkoordinatensystem
$f$	Brennweite
$\rho_w$ und $\rho_h$	Vertikale und horizontale Pixelgröße
$(u_0, v_0)$	Principal point
$H$	Homographie
$\rho(\lambda)$	Reflexionsgrad
$k_p(\theta, \varphi)$	Korrekturfaktor Homogenität Schirm
$I_0$	HV0-Lichtstärkewert

$A(\theta)$	Gesehene leuchtende Fläche
$g$	Fokussierungsfaktor
$S_i(\lambda)$	Basisspektren
$A_i(\theta, \varphi)$	Gewichtungsfaktor spektrale Amplitude
$M_m(\theta, \varphi)$	Erfasste Kamerawerte
$\tau(\lambda)$	Transmissionsgrad
$\tau_{sys}(\lambda)$	Transmissionsgrad Messsystem
$M_{st}$	Spektrale Charakterisierung Messsystem
$G_{1,\dots,m}$	Absolute spektrale Gewichtungsfaktoren

# VERÖFFENTLICHUNGEN

- I. L. Sayanca, K. Trampert und C. Neumann: „*Fehlanpassung der Normspektralwertfunktionen bei spektral integrierender Farbmessung*“, Lux Junior 2017, Dörnfeld/Ilm, September 2017.
- I. L. Sayanca, K. Trampert und C. Neumann: „*Indirect Light Intensity Distribution Measurement using Image Merging*“, Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing XI (AMCTM 2017), Glasgow UK, August 2017.
- I. L. Sayanca, K. Trampert und C. Neumann: „*Einfluss des spectral mismatch correction factors (SMCF) bei der Lichtstrombestimmung*“, Licht 2016, Karlsruhe, September 2016.
- I. Rotscholl, K. Trampert, U. Krüger, M. Perner, I. L. Sayanca, F. Schmidt und C. Neumann: „*Bestimmung von winkel- und orts aufgelösten spektralen Ray-Files*“, Licht 2016, Karlsruhe, September 2016.
- I. Rotscholl, K. Trampert, U. Krüger, I. L. Sayanca, F. Schmidt und C. Neumann: „*Measurement of angular and spatial resolved spectral Ray-Files with conventional nearfield gonio-photometers and standard optical filters*“, LED professional Review, no. 63, pp. 48-56, 2017.



## BETREUTE ARBEITEN

- Mario Planeck, „Streulichtunterdrückung für direkte und indirekte Lichtstärkeverteilungsmessungen im Fernfeld“, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Dezember 2015.
- Carmen Schreiber, „*Entwicklung eines multidimensionalen photometrischen Normals auf LED-Basis*“, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Juli 2017.
- Alexandra Pera, „*Streulichtanalyse bei kamerabasierten Lichtstärkeverteilungsmessungen*“, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, September 2017.



# DANKSAGUNG

Die vorliegende Dissertation wurde am Lichttechnischen Institut (LTI) des Karlsruher Instituts für Technologie geschrieben und wurde vom *Bundesministerium für Bildung und Forschung* im Rahmen des Förderprogramms Photonik Forschung Deutschland unter dem Förderkennzeichen **13N13396** und dem Akronym **UNILED II** gefördert.

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Mein erster Dank geht an meinen Doktorvater Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann für die Betreuung dieser Arbeit. Er hat mich durch meine gesamte Zeit am LTI immer auf eine freundliche Art unterstützt und fachlich sehr geholfen.

Ich danke herzlich Prof. Dr. rer. nat. Wilhelm Stork für die Übernahme des Korreferats.

Bei Dr. Klaus Trampert, Geschäftsführer des Messlabors vom LTI, möchte ich mich besonders bedanken. Für fachliche Diskussionen stand er stets zur Verfügung. Ohne seine mehrjährige Erfahrung im Bereich der Lichtmesstechnik wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Ein spezieller Dank geht an Dr. Udo Krüger, Knut Bredemeier und Christian Schwanengel, Mitarbeitern unserer Partner Firma **TechnoTeam** GmbH aus Ilmenau im Projekt UNILED II, deren fachliches Know-how, die regelmäßigen Meetings und kontinuierliche Beantwortung aller meiner Fragen enorm geholfen haben, diese Arbeit zu verfassen.

Bei allen meinen Kolleginnen und Kollegen der Abteilungen „Allgemeine Lichttechnik“ und „Optische Technologien im Automobil“ bedanke ich mich für die schöne gemeinsame Zeit am Lichttechnischen Institut, u.a. Markus Katona, Ingo Rotscholl, Patric Jahn, Annie Shalom, Melanie Helmer, Christian Herbold und Tino Weiß.

Ebenso möchte ich mich bei Melanie Helmer und Bernd Wilhelm besonders bedanken für die Lesekorrektur dieser Arbeit und die konstruktiven Anmerkungen. Dies war keine leichte Aufgabe, da „mein“ Deutsch nicht immer einfach zu verstehen ist.

An Mario Süttsch und Hans Vögele, jeweils Leiter und Mitarbeiter der Werkstatt am LTI, geht ebenfalls ein besonderer Dank für die schnelle Fertigung verschiedener Teile, wie z. B. das für diese Arbeit sehr wichtige multidimensionale Normal.

Ich möchte mich für die Unterstützung seitens der „*Karlsruhe School of Optics and Photonics*“ bedanken, für deren sehr interessante Kurse und die Betreuung meiner Arbeit.

Abschließend und vor allem bedanke ich mich bei meiner Familie, meiner Frau Mirjam und meiner Tochter Ida Pauline, sowie auch meinen Eltern und Schwiegereltern für den mehrjährigen persönlichen Rückhalt und die Unterstützung während meines Studiums.

# ANHANG



# Anhang A: MESSUNSICHERHEIT

## A.1 SPEKTROMETER CAS 140 CT-152

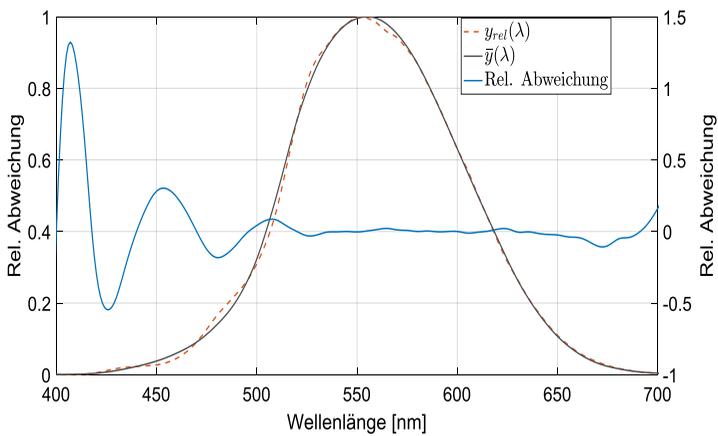
**Tabelle A.1:** Wellenlängenabhängige Bestrahlungsstärkemessunsicherheit des verwendeten Array-Spektrometers

Wellenlänge $\lambda$ in [nm]	Erweiterte relative Messunsicherheit
$200 \leq \lambda \leq 250$	17%
$250 \leq \lambda \leq 300$	10%
$300 \leq \lambda \leq 360$	8,5%
$360 \leq \lambda \leq 400$	5%
$400 \leq \lambda \leq 450$	4%
$450 \leq \lambda \leq 800$	3,5%

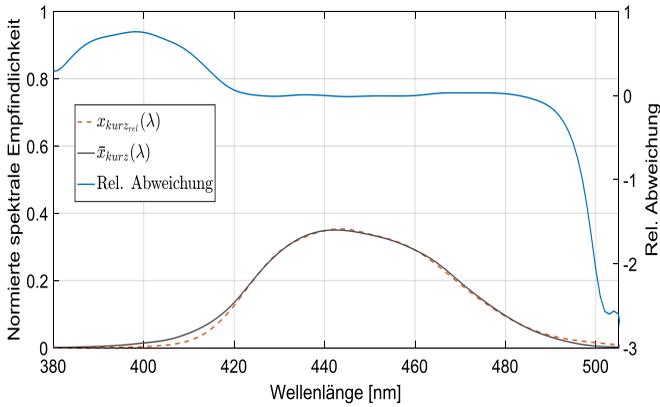


# Anhang B: SMCF

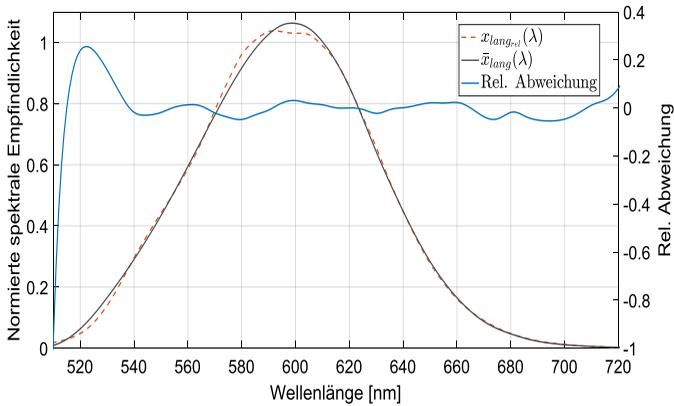
## B.1 RELATIVE SPEKTRALE EMPFINDLICHKEIT FILTERRAD FARBMESSKAMERA



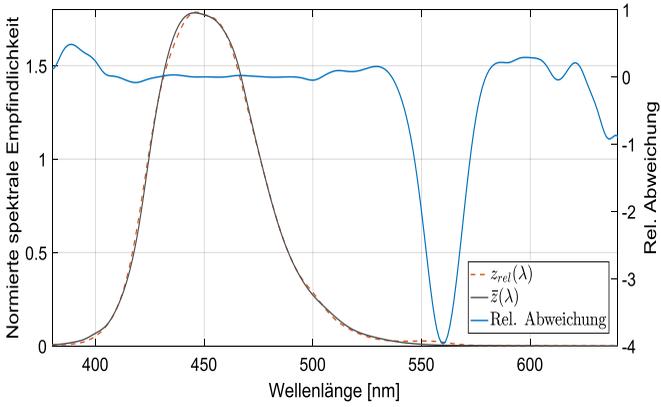
**Abbildung B.1:** Relativer Fehler der spektralen Anpassung an die Normalspektralwertfunktion  $\bar{y}(\lambda)$



**Abbildung B.2:** Relativer Fehler der spektralen Anpassung an die Normalspektralwertfunktion  $\bar{x}_{kurz}(\lambda)$



**Abbildung B.3:** Relativer Fehler der spektralen Anpassung an die Normalspektralwertfunktion  $\bar{x}_{lang}(\lambda)$

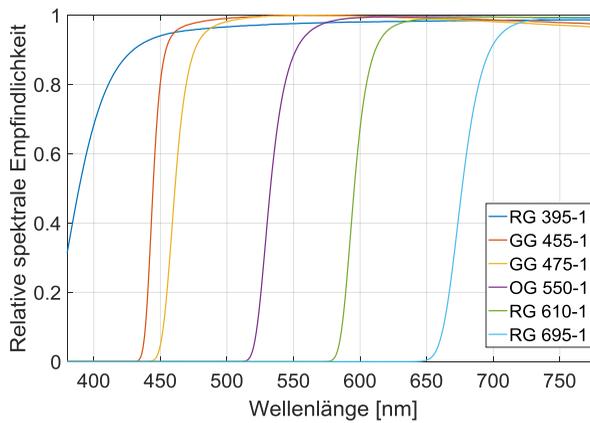


**Abbildung B.4:** Relativer Fehler der spektralen Anpassung an die Normalspektralwertfunktion  $\bar{z}(\lambda)$

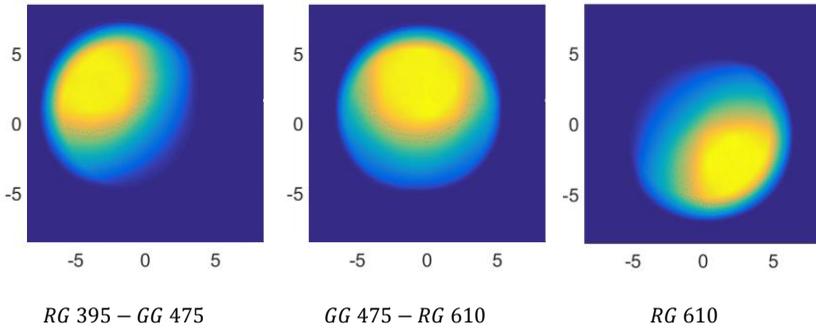


# Anhang C: SCM-METHODIK

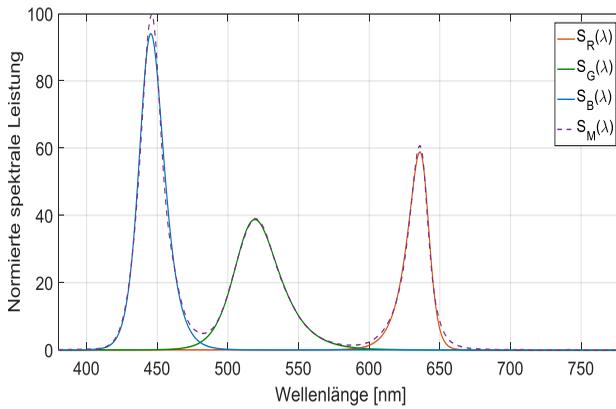
## C.1 SPEKTRALE MODELLIERUNG DES NORMALS (RGB) MIT LANGPASS-GLASFILTERN



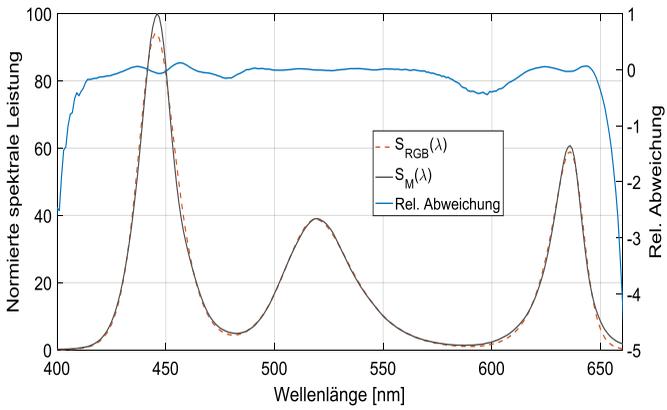
**Abbildung C.5:** Normierte spektrale Empfindlichkeit der verwendeten Langpass-Glasfilter



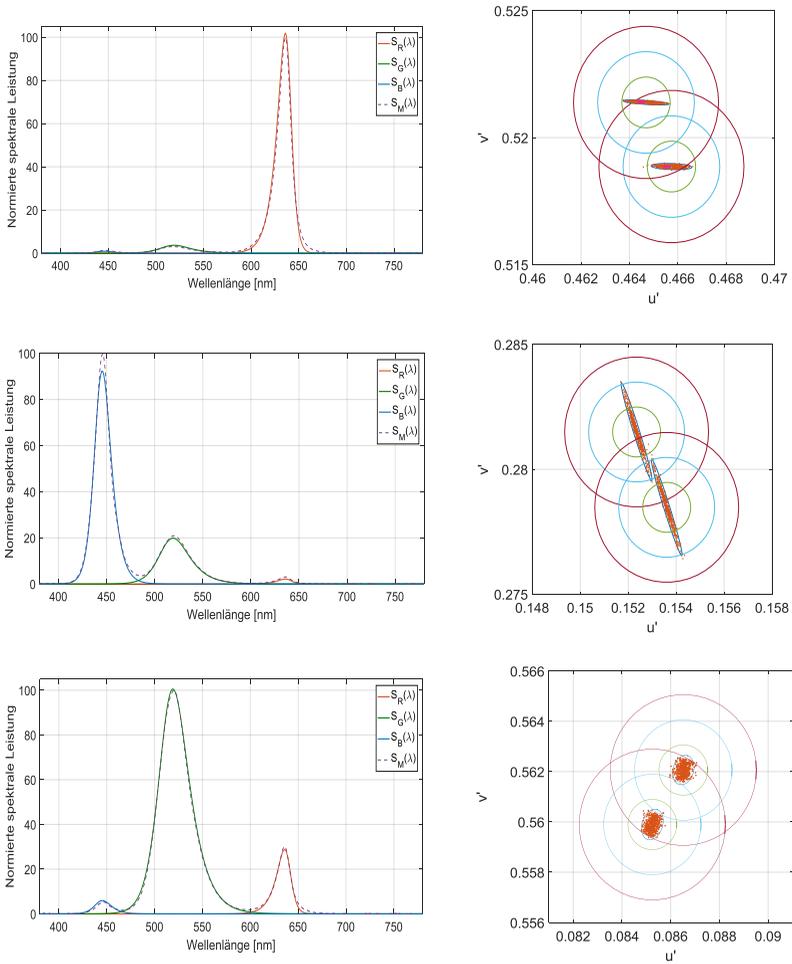
**Abbildung C.6:** Trennung der R-G-B-Farbregionen mit den entsprechenden Langpass-Glasfilterkombinationen



**Abbildung C.7:** Gewichtung der Basisspektren anhand von Langpass-Glasfiltern



**Abbildung C.8:** Vergleich des gemessenen Spektrums mit der gewichteten Summe der Teilspektren anhand von Langpass-Glasfiltern



**Abbildung C.9:** Spektrale Amplituden bei beliebigen Winkelkoordinaten, sowie Vergleich der Farbkoordinaten anhand von Langpass-Glasfiltern

## C.2 SPEKTRALE MODELLIERUNG DES NORMALS (RGB) MIT INTERFERENZ-GLASFILTERN

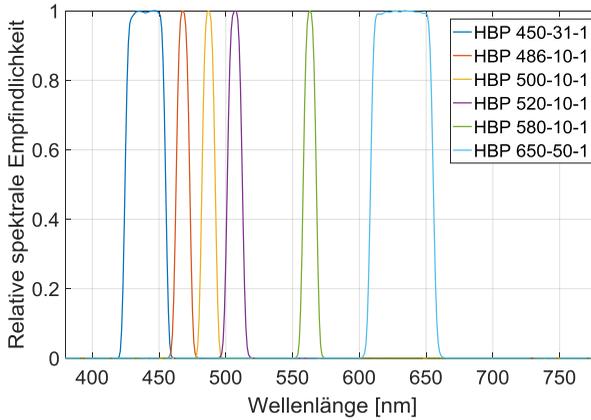


Abbildung C.10: Normierte spektrale Empfindlichkeit der verwendeten Interferenzfilter

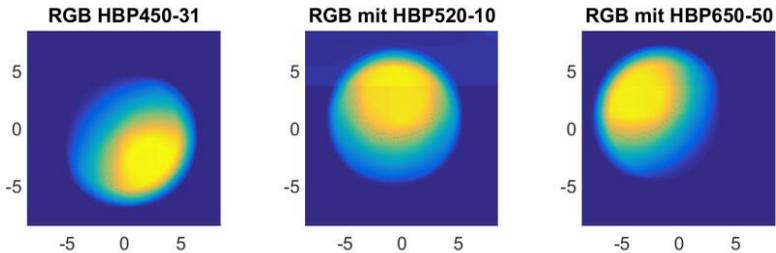


Abbildung C.11: Trennung der R-G-B-Farbregionen mit den entsprechenden Interferenzfiltern

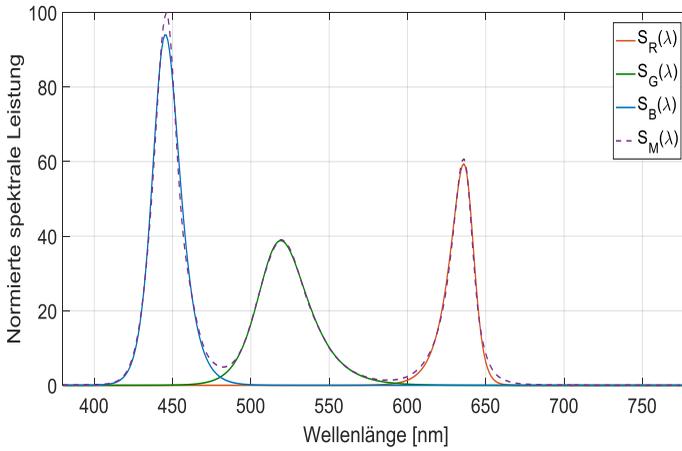


Abbildung C.12: Gewichtung der Basisspektren anhand von Interferenzfiltern

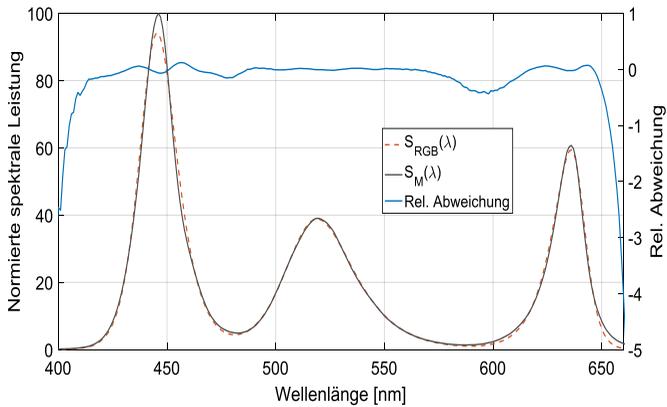
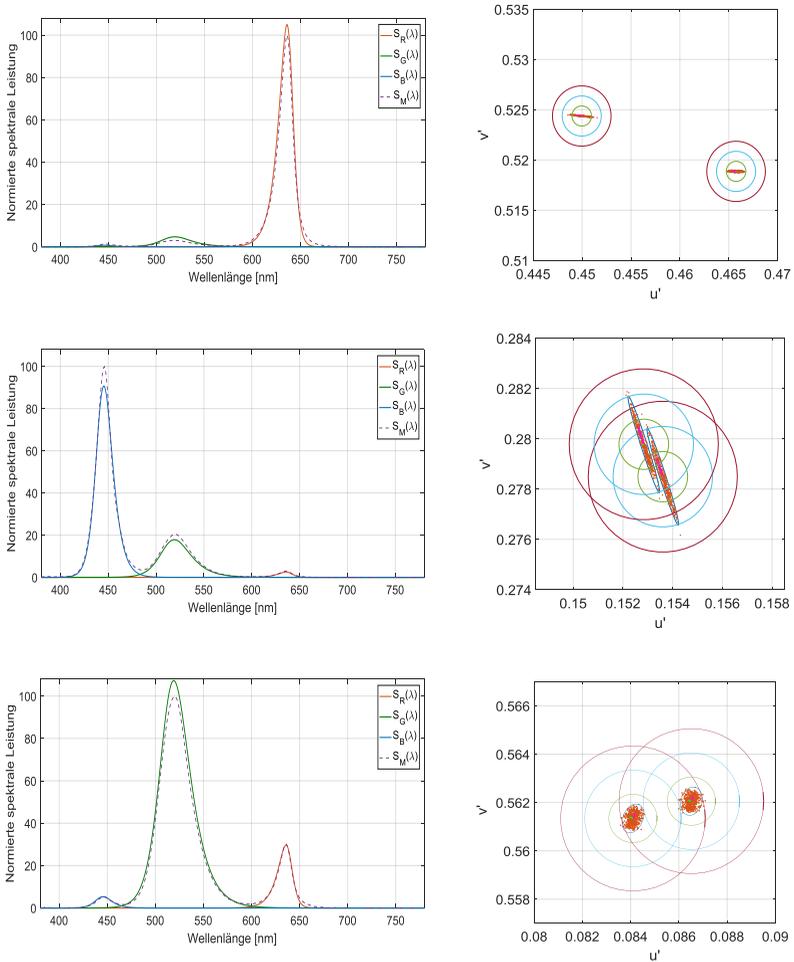
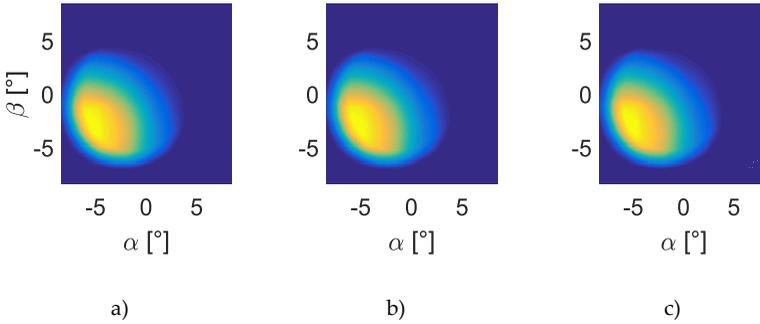


Abbildung C.13: Vergleich des gemessenen Spektrums mit der gewichteten Summe der Teilspektren anhand von Interferenzfiltern

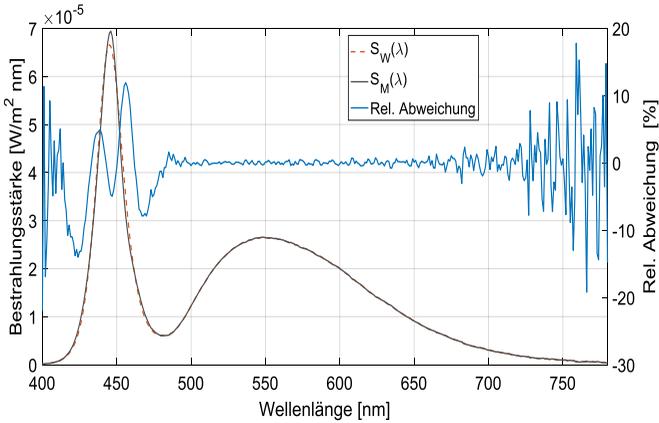


**Abbildung C.14:** Spektrale Amplituden bei beliebigen Winkelkoordinaten, sowie Vergleich der Farbkoordinaten anhand von Interferenzfiltern

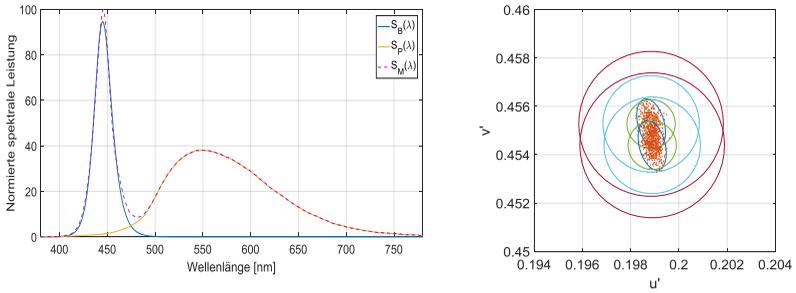
### C.3 SPEKTRALE MODELLIERUNG DES NORMALS (WW)



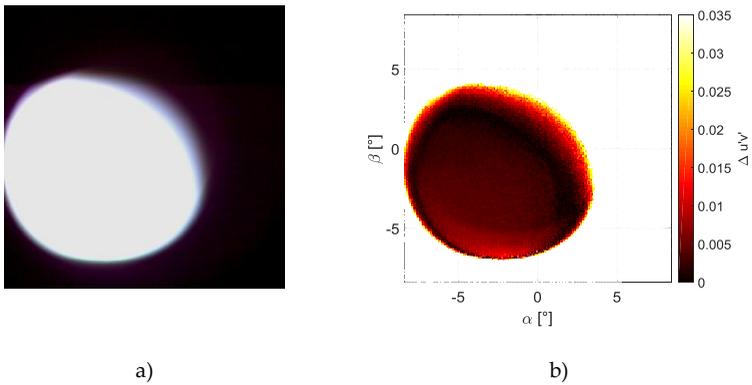
**Abbildung C.15:** Erfasste B- und Leuchtstoff-Farbregionen mit den Bandpass-Glasfiltern: a)  $X_{kurz}$ , b)  $X_{lang}$  und c)  $Y$



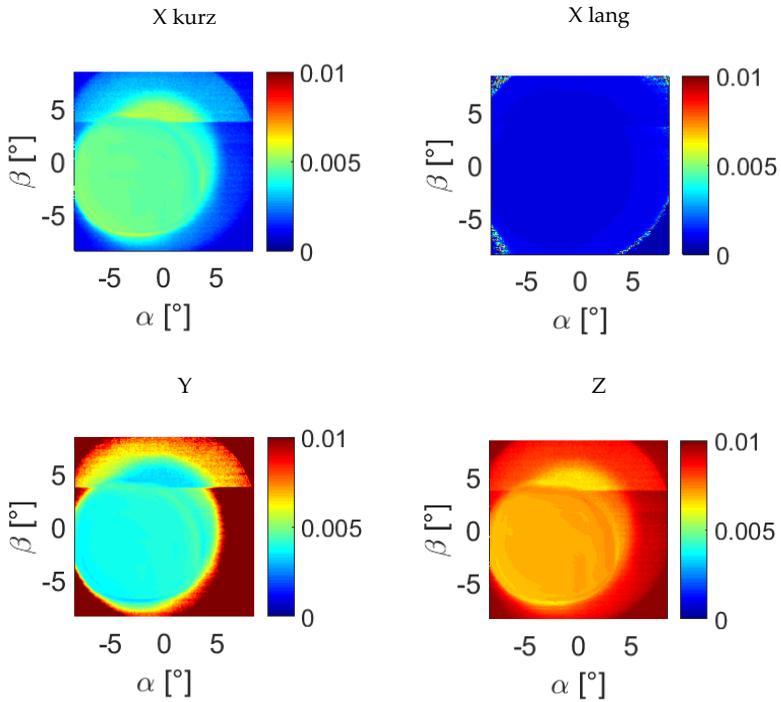
**Abbildung C.16:** Vergleich des gemessenen Spektrums mit der gewichteten Summe der B- und Leuchtstoff-Teilspektren



**Abbildung C.17:** Spektrale Amplituden bei beliebigen Winkelkoordinaten, sowie Vergleich der Farbkoordinaten (WW)

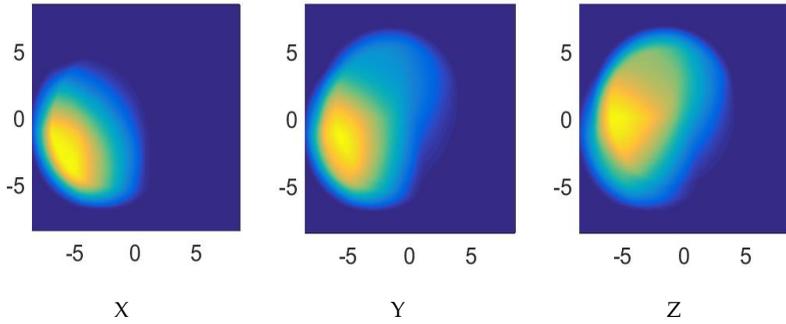


**Abbildung C.18:** a) Farbbild W-W Messobjekt und b) Farbabstand  $\Delta u'v'$  der Kamera- und Farbreferenzmessung

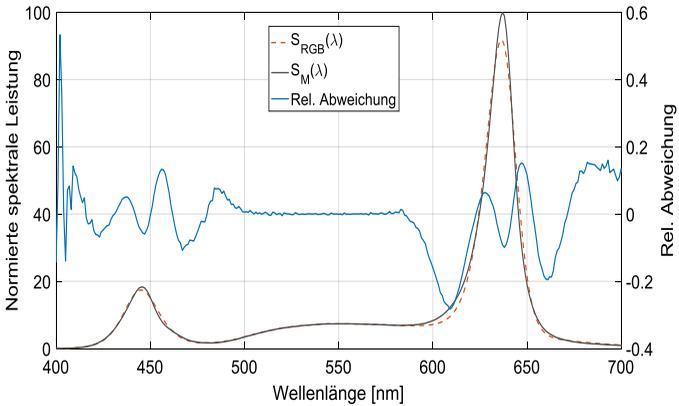


**Abbildung C.19:** Analysierter Betrag der spektralen Fehlanpassung der Farbkanäle beim untersuchten W-W-Testobjekt

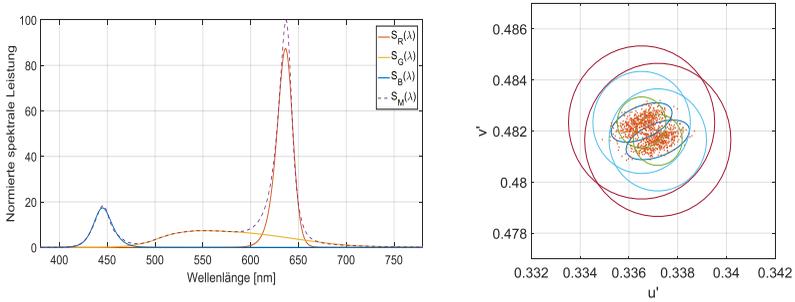
## C.4 SPEKTRALE MODELLIERUNG DES NORMALS (RW)



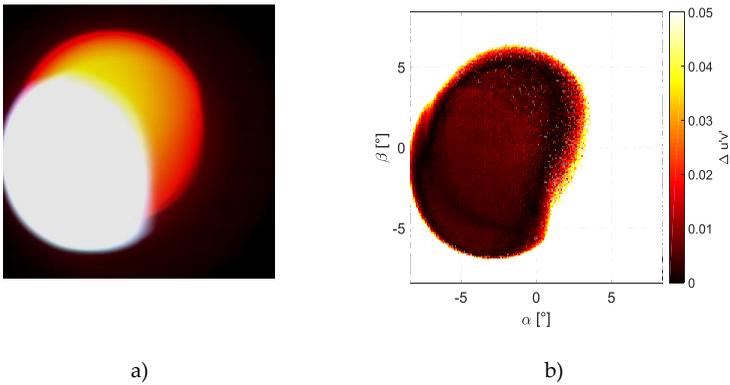
**Abbildung C.20:** Erfasste R-, B- und Leuchtstoff-Farbregionen mit den Bandpass-Glasfiltern  $X_{kurz}$ ,  $X_{lang}$  und  $Y$



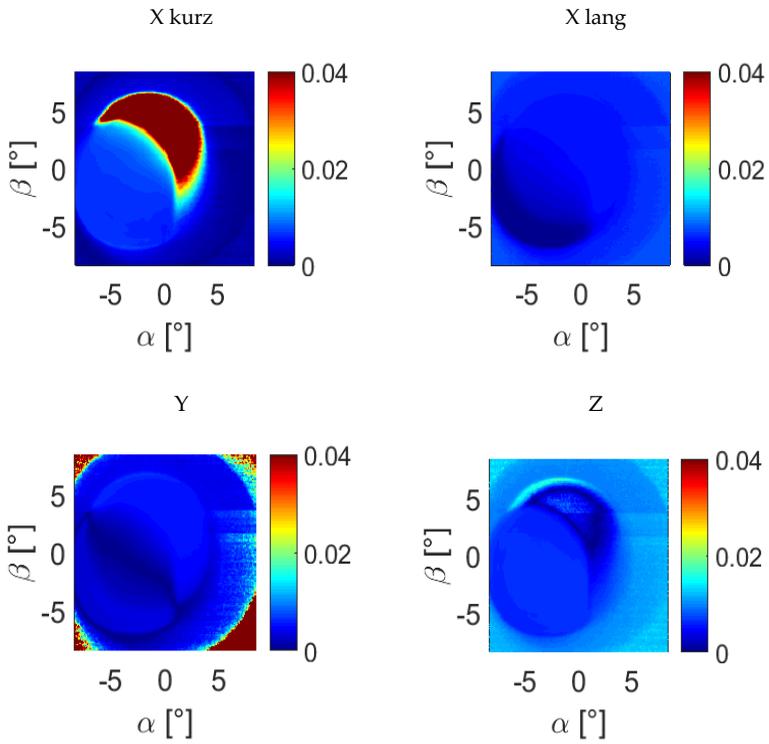
**Abbildung C.21:** Vergleich des gemessenen Spektrums mit der gewichteten Summe der R-, B- und Leuchtstoff-Teilspektren



**Abbildung C.22:** Spektrale Amplituden bei beliebigen Winkelkoordinaten, sowie Vergleich der Farbkoordinaten (RW)



**Abbildung C.23:** a) Farbbild R-W Messobjekt und b) Farbabstand  $\Delta u'v'$  der Kamera- und Farbbreferenzmessung



**Abbildung C.24:** Analysierter Betrag der spektralen Fehlanpassung der Farbkanäle beim untersuchten R-W-Testobjekt



## **SPEKTRUM DER LICHTTECHNIK**

Lichttechnisches Institut Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

ISSN 2195-1152

---

- Band 1     Christian Jebas  
**Physiologische Bewertung aktiver und passiver  
Lichtsysteme im Automobil.** 2012  
ISBN 978-3-86644-937-4
- Band 2     Jan Bauer  
**Effiziente und optimierte Darstellungen von  
Informationen auf Grafikanzeigen im Fahrzeug.** 2013  
ISBN 978-3-86644-961-9
- Band 3     Christoph Kaiser  
**Mikrowellenangeregte quecksilberfreie  
Hochdruckgasentladungslampen.** 2013  
ISBN 978-3-7315-0039-1
- Band 4     Manfred Scholdt  
**Temperaturbasierte Methoden zur Bestimmung der  
Lebensdauer und Stabilisierung von LEDs im System.** 2013  
ISBN 978-3-7315-0044-5
- Band 5     André Domhardt  
**Analytisches Design von Freiformoptiken  
für Punktlichtquellen.** 2013  
ISBN 978-3-7315-0054-4
- Band 6     Franziska Herrmann  
**Farbmessung an LED-Systemen.** 2014  
ISBN 978-3-7315-0173-2
- Band 7     Simon Wendel  
**Freiform-Optiken im Nahfeld von LEDs.** 2014  
ISBN 978-3-7315-0251-7
- Band 8     Carmen Kettwich  
**Ablenkung im Straßenverkehr und deren  
Einfluss auf das Fahrverhalten.** 2014  
ISBN 978-3-7315-0288-3

- Band 9      Steffen Michenfelder  
**Konzeption, Realisierung und Verifikation eines  
automobilen Forschungsscheinwerfers auf Basis  
von Digitalprojektoren.** 2015  
ISBN 978-3-7315-0301-9
- Band 10     Celal Mohan Ögün  
**Surface wave driven molecular low pressure plasmas  
for general lighting.** 2016  
ISBN 978-3-7315-0464-1
- Band 11     Theresa Bonenberger  
**LED Farbmischung mit chaotischen Lichtleitern.** 2016  
ISBN 978-3-7315-0480-1
- Band 12     Michael Schöne  
**Diffraktive Optiken im Automobil:  
Achromatisierung, Athermalisierung, Formung  
von Scheinwerferlichtverteilungen.** 2017  
ISBN 978-3-7315-0613-3
- Band 13     Tobias Werner  
**Simulation, Aufbau und Charakterisierung  
von autostereoskopischen Display-Systemen  
im Fahrzeugbereich.** 2017  
ISBN 978-3-7315-0617-1
- Band 14     Christian Herbold  
**Entwicklung und Herstellung naturähnlich  
verzweigter Kühlkörper für LED-Systeme.** 2017  
ISBN 978-3-7315-0635-5
- Band 15     Carsten Gut  
**Laserbasierte hochauflösende Pixellichtsysteme.** 2018  
ISBN 978-3-7315-0710-9
- Band 16     Annie Shalom Samji Isaac Chandra  
**Intelligent Freeform Deformation for LED  
Illumination Optics.** 2018  
ISBN 978-3-7315-0741-3

- Band 17 Ingo Rotscholl  
**Spectral near field data of LED systems  
for optical simulations. 2018**  
ISBN 978-3-7315-0750-5
- Band 18 Inca Leopoldo Sayanca  
**Sensorfusion zur Kompensation von Messfehlern bei  
kamerabasierter Farbverteilungsmessung. 2018**  
ISBN 978-3-7315-0830-4



Lichttechnisches Institut  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

In dieser Arbeit wird eine Farbmess technik auf Basis von Sensorfusion für die vollständige Charakterisierung von LED-Beleuchtungssystemen vorgestellt. Hierbei werden die Informationen von indirekten, hoch aufgelösten Filterkammermessungen mit spektralen und photometrischen Punktmessungen kombiniert. Ergebnis der entwickelten Methodik sind sowohl winkelaufgelöste Farbwerte als auch spektrale Informationen. Die Messergebnisse können beispielsweise zur Korrektur der spektralen Fehlanpassung von Filterkammermessungen oder zur Durchführung von realitätsnahen optischen Simulationen eingesetzt werden. Im Vergleich mit herkömmlichen Farbmess techniken wird die Messdauer deutlich reduziert bei gleichzeitig höherer Messauflösung.

ISSN 2195-1152  
ISBN 978-3-7315-0830-4

