

Messung der fokussierten Reflektivität von Spiegelfacetten mit Ulbricht-Kugeln

Bachelorarbeit aus der Physik

Vorgelegt von
Mattias Tschiesche
am 05.08.2014

Erlangen Centre for Astroparticle Physics (ECAP)
Gruppe CTA
Friedrich Alexander Universität Erlangen-Nürnberg



Erstgutachter: Prof. Dr. Christopher van Eldik
Zweitgutachter: Prof. Dr. Wolfgang Eyrich

Abstrakt Diese Arbeit dokumentiert die Entwicklung respektive Weiterentwicklung einer 2f-Methode, welche die Messung der fokussierten Reflektivität von Spiegelfacetten ermöglicht. Behandelt wird die Wahl der Leuchtmittel, der optische Aufbau zur Homogenisierung des Lichtspots, sowie die verwendeten Messapparaturen. Über den Nachweis der Homogenität des erzeugten Lichtspots erfolgt schließlich die Messung der fokussierten Reflektivität.

Inhaltsverzeichnis

1 Cherenkov Telescope Array	1
1.1 Das Projekt	1
1.2 Spiegel für das CTA und deren Anforderungen	2
2 Fokussierte Reflektivität und Messmethodik	2
2.1 2f-Näherung	3
2.2 Lichtquellen und Optikaufbau	3
2.2.1 Leuchtdioden als Lichtquellen	4
2.2.2 Optikaufbau	5
2.2.3 Ulbricht-Kugel	6
2.2.4 Spektrometer	6
2.3 Charakterisierung der Lichtquellen	7
2.3.1 Schrittrasterung mit Photodiode	7
2.3.2 Abstandsmessung bzw. $1/r^2$ -Gesetz	8
2.4 Messablauf zur fokussierten Reflektivität	9
3 Messungen und Ergebnisse	10
3.1 Homogenität der Lichtquellen	10
3.1.1 Schrittrasterung mit Photodioden	10
3.1.2 Abstandsmessung mit Ulbrichtkugel	12
3.2 Reflektivitätsmessungen	13
3.2.1 LED-500 (Türkis)	14
3.2.2 LED-470 (Blau)	14
3.2.3 LED-405 (UV bis Violett)	14
3.2.4 LED-365 (UV)	14
3.2.5 effektive Spiegelflächen	15
4 Auswertung und Interpretation	15
5 Diskussion und Ausblick	18

1 Cherenkov Telescope Array



Abbildung 1: Illustration des CTA [7]

1.1 Das Projekt

Das Cherenkov Telescope Array (CTA) entsteht aus der Zusammenarbeit von über 1000 Wissenschaftlern und Ingenieuren aus insgesamt 28 Ländern. Mit dem Ziel, das Universum bei sehr hohen Energien zu beobachten, entwickelt diese Kollaboration ein ganzes Array aus sogenannten Imaging Air Cherenkov Telescopes (auch IACT genannt). Um diese hohen Energien wie auch den gesamten Himmel beobachten zu können, ist jeweils ein Array auf der Süd- sowie der Nordhalbkugel geplant. Auf der Südhalbkugel soll dieses aus bis zu 100 einzelnen Teleskopen bestehen, während die Planung auf der nördlichen Halbkugel ein kleineres Array vorsieht.

Das gesamte Projekt wird hierbei in drei unterschiedlich große Teleskop-Typen unterteilt, welche jeweils einem anderen Energiebereich zugeordnet sind. Um den niederenergetischen Bereich von 10 GeV - 100 GeV abzudecken, sind bis zu vier große Teleskope (LST - Large Sized Telescopes) mit einem Durchmesser von rund 24 Metern in der Mitte des Arrays vorgesehen. Um den höherenergetischen Bereich von 100 GeV bis 1 TeV beobachten zu können, werden ca. 20 Teleskope mittlerer Größe (MST - Medium Sized Telescopes) mit einem Durchmesser von rund 12 Metern geplant. Zum Abschluss der drei Teleskop-Typen und zum observieren der höchsten Energien von über 10 TeV werden rund 30 kleine Teleskope (SST - Small Sized Telescopes) mit einem Durchmesser von 6 Metern aufgestellt.

Da sich das gesamte Projekt noch in der Planungsphase befindet, ist das endgültige Design sowie die Standorte der Arrays noch nicht beschlossen.[7]

Imaging Air Cherenkov Telescopes (IACT)

Die Kollaboration um CTA plant ein Observatorium um hochenergetische γ -Strahlung aus dem Universum zu beobachten. Da die Erdatmosphäre für derartige Strahlung undurchlässig ist und daher ein direktes Beobachten mit einem bodengebundenen Teleskop nicht möglich ist, gibt es zwei Optionen zur Erschaffung bzw. Konzeption eines Observatoriums. Eine Möglichkeit wäre das verwenden eines Satelliten, welcher jedoch aufgrund seiner begrenzten Baugröße nur eine

relativ kleine effektive Detektorfläche hat und somit eine zu geringe Sensitivität für das zu beobachtende Energiespektrum besitzt.

Eine Alternative jedoch ist möglich, da die γ -Strahlung beim Eintreffen in die obere Erdatmosphäre, durch Wechselwirkung mit dieser, einen aus unterschiedlichen Teilchen bestehenden Schauer auslöst. Diese entstandenen Teilchen emittieren Cherenkov-Licht, welches dann auftritt, wenn die Geschwindigkeit eines geladenen Teilchens größer ist als die Lichtgeschwindigkeit in dem Medium, in dem das Teilchen sich bewegt.

Das Cherenkov-Licht wird im Wellenlängenbereich von 300 nm bis 600 nm emittiert und weiß hierbei ein Helligkeitsmaximum bei 400 nm auf. Es kann nun von einem IACT detektiert werden. Da die Ausbreitung des Cherenkov-Lichts konisch verläuft, erleuchtet es am Boden eine sehr große Fläche, weshalb ein ganzes Array nötig ist, um sowohl möglichst viel Licht zu erfassen, als auch die Richtung der Herkunft des Lichts und somit die Herkunft der γ -Strahlung im Universum ermitteln zu können. [12]

1.2 Spiegel für das CTA und deren Anforderungen

Um sowohl Gewicht als auch Kosten beim Bau der Teleskope bzw. der Arrays zu sparen, greift man auf ein bereits bekanntes und bewährtes Konzept¹, das der Verbundspiegel, zurück. Es ersetzt den schweren Vollglasspiegel mit der Idee, die Spiegel so zu konstruieren, dass die Glasschicht so dünn wie möglich ist und von einer Wabenstruktur getragen wird.

Um den Anforderungen des Teleskops bzw. der Kamera gerecht zu werden, sind für die Spiegelprototypen Qualitätskriterien festgelegt worden. Die zwei wichtigsten Kriterien sind hierbei zum einen die Güte der Fokussierung des Spiegels. Hierfür beobachtet man die sogenannte Punktstreufunktion (Point-Spread Function, kurz: PSF), welche die Größe des reflektierten Spots einer Lichtquelle, welche parallel einfallendes Licht auf den Spiegel einstrahlt, beschreibt. Um die Ergebnisse verschiedener Spiegel vergleichbar zu halten, wird die Größe d80 definiert, welche einen Kreis mit gerade dem Durchmesser beschreibt, welcher 80% des reflektierten Lichts enthält. Da dieser Kreis in die Öffnung der einzelnen Photomultiplier der Kamera passen soll, darf er ein Drittel der Pixelgröße (Öffnung eines einzelnen Photomultipliers) der Kamera nicht überschreiten. Für die Öffnungen der MST und LST ergibt das einen d80-Durchmesser von 17 mm, welcher durch die Spiegel zu erreichen oder im besten Fall zu unterbieten ist.

Zum Anderen ist die fokussierte Reflektivität wichtig. Sie gibt den Anteil der Lichtmenge an, der sicher in ein Kamerapixel fällt. Da die Teleskope entwickelt werden um Cherenkov-Licht zu beobachten, sollten innerhalb eines Wellenlängenbereichs von 300 nm bis 600 nm mindestens 85% des auf die Spiegeloberfläche einfallenden Lichts reflektiert werden. Fokussiert bedeutet hierbei, dass mindestens 85% des einfallenden Lichts innerhalb eines Kreises mit dem Durchmesser von zwei Dritteln der Pixelgröße der Kamera reflektiert werden.

Da das CTA eine Außeneinrichtung sein wird, müssen die Teleskope und somit deren Spiegel unterschiedlichen Umwelteinflüssen bzw. Umweltkonditionen gewachsen sein. Aufgrund der Größe der Spiegelfacetten, welche im Falle des LST hexagonal mit einer Länge von 1,50 m von Kante zu Kante und für das MST hexagonal mit einer Länge von 1,20 m von Kante zu Kante vorliegen, ergeben sich in Verbindung mit Temperaturschwankungen und anderen Umwelteinflüssen optische Veränderungen, welche nicht zu dramatisch werden dürfen. Die optischen Eigenschaften sollten daher in einem Temperaturbereich von -10 °C bis hin zu +30 °C gleichbleibend gut sein. [12]

2 Fokussierte Reflektivität und Messmethodik

Um die Umsetzung der oben erwähnten Anforderungen an die Spiegel zu kontrollieren, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Aufgrund des begrenzten Rahmens, soll hier nur eine Methode

¹MAGIC - Major Atmospheric Gamma-Ray Imaging Cherenkov Telescopes

behandelt werden. Die verhältnismäßig am leichtesten zu realisierende Methode zur Messung der fokussierten Reflektivität ist die 2f-Näherung, welche nachfolgend näher erläutert werden soll.

2.1 2f-Näherung

Die Spiegel respektive die Spiegelfacetten werden konstruiert um Licht aus der Atmosphäre zu detektieren, welche sich grob 10 km über dem Boden befindet. Dies bedeutet, dass die einfallenden Lichtstrahlen näherungsweise aus dem unendlichen kommen und somit als parallel angenommen werden können. Das auf diese Weise auf die Spiegeloberfläche einfallende Licht wird im Fokuspunkt mit der fokalen Länge f gebündelt. Die Fokallänge f entspricht hierbei dem Abstand des Fokuspunktes zur Spiegeloberfläche entlang der optischen Achse des Spiegels. Um die gestellten Anforderungen zu testen bedarf es der Simulation dieser Situation. Dafür würde man generell entweder eine punktförmige Lichtquelle im Abstand von 10 km zum Spiegel benötigen, oder aber eine Lichtquelle, die paralleles Licht auf die Spiegeloberfläche sendet, dementsprechend also groß genug ist, den gesamten Spiegel auszuleuchten. Diese Gegebenheiten lassen sich jedoch in der Realität nicht, oder nur mit sehr großem Aufwand realisieren.

Um dieses Hindernis zu umgehen, bedient man sich einer bereits bekannten Methode, der 2f-Näherung. Da die in diesem Messaufbau verwendete Lichtquelle punktförmig ist (siehe unten), wird das vom Spiegel reflektierte Licht auch hier in einem Punkt gebündelt. Stellt man die Lichtquelle in einem Abstand von $2f$ (doppelte nominale Fokallänge des Spiegels) zum Spiegel auf, so wird auch der Fokuspunkt in diesem Abstand zu beobachten sein. Also je nach Spiegelorientierung in direkter Umgebung der Lichtquelle (Vgl. Abbildung 2). Für die hier verwendeten MST-Spiegel entspricht der Abstand von $2f$ rund 32 Metern. Dies ermöglicht es, einen relativ kompakten Messaufbau, bestehend aus einer punktförmigen Lichtquelle, einem Detektor und den nötigen Auswertungsinstrumenten zusammenzustellen.

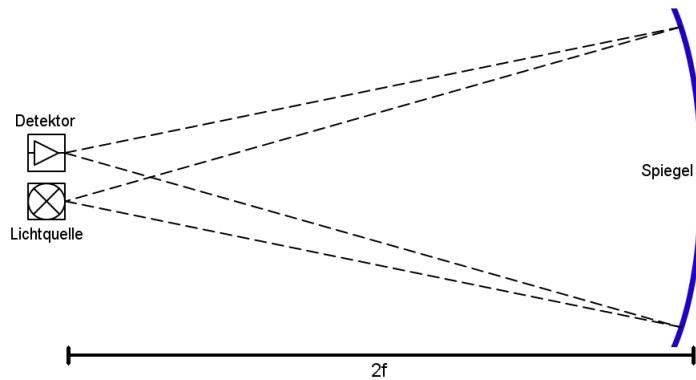


Abbildung 2: Skizze der 2f-Näherung, sehr vereinfachte Darstellung der Lichtstrahlen

2.2 Lichtquellen und Optikaufbau

Zur Ausleuchtung der Spiegel ist, wie oben beschrieben, eine punktförmige Lichtquelle nötig, da sich eine parallel aussende Lichtquelle dieser Größe nicht ohne enormen Kostenaufwand realisieren lässt. Hierzu wurden Leuchtdioden ausgewählt. Mittels eines optischen Aufbaus, bestehend aus einer kurzbrennweiten Sammellinse und einer mittelbrennweiten Justierlinse, wird das von den Leuchtdioden ausgesendete Licht zunächst gebündelt und schließlich leicht fokussiert und homogenisiert. Das Resultat ist ein nahezu perfekt gleichmäßig heller Lichtspot, welcher den Anforderungen für die Messungen genügt.

Als Detektor kommt eine Ulbricht-Kugel² zum Einsatz, welche über eine Lichtleitfaser mit einem Spektrometer verbunden ist und schließlich mittels Laptop ausgelesen wird.

2.2.1 Leuchtdioden als Lichtquellen

Bei der Wahl der Leuchtmittel zur Konstruktion einer homogenen Lichtquelle fiel die Wahl auf Leuchtdioden, da ein sehr großer Wellenlängenbereich von 300 nm bis 600 nm abzudecken ist. Herkömmliche kontinuierliche Lichtquellen senden meist kein Ultraviolettes (UV) Licht unterhalb von 400 nm aus. Dieser Umstand ist jedoch hier hinderlich, da bereits das Helligkeitsmaximum des Cherenkov-Lichts bei ca. 400 nm liegt, und somit ein Testen des Spiegels unterhalb von 400 nm nötig ist.

Bei der Auswahl der Leuchtdioden wurden (mit einer Ausnahme) Produkte der Firma Nichia³ verwendet (Abb. 3), da diese ein sehr breites Spektrum an monochromatischen LEDs anbieten, welche problemlos über einen Händler zugänglich sind. Da die primäre Aufmerksamkeit dem Wellenlängenbereich zwischen 300 nm und 450 nm gegeben wurde, konnte man mit zwei monochromatischen Leuchtdioden die Wellenlängen 365 nm (UV, LED der Firma Seoul⁴, siehe auch Vergleichstyp in Abbildung 4) und 405 nm (UV bis Violett) abdecken. Da der höhergelegene Wellenlängenbereich nicht vernachlässigt werden sollte, kommen auch hier zwei monochromatische LEDs mit den nominalen Wellenlängen 470 nm (Blau) und 500 nm (Türkis) zum Einsatz.



Abbildung 3: Bsp. einer Chip-LED von Nichia, hier 405 nm Chip, angebracht auf kleiner Platine [11]

Abbildung 4: Beispiel für eine Chip-LED der Firma Seoul gleichen Gehäusetyps [11]

Abbildung 5: Nichia LED (470 nm) eingelassen in Kühlkörper mit blauen Schraubklemmen

Alle LEDs der Firma Nichia sind als Chips ausgelegt, die ihrerseits auf einer kleinen Platine ($10 \text{ mm} \cdot 10 \text{ mm}$) angebracht sind (Abb. 3). Alle LEDs wurden, um eine bessere Kühlung gewährleisten zu können, auf jeweils einem Kühlkörper angebracht, sodass auch längere Betriebszeiten (mehrere Stunden) möglich sind. Da ein manueller Wechsel der Leuchtmittel aufgrund einer bislang noch fehlenden Justiervorrichtung nötig war, wurde die Stromversorgung über einfache Schraubklemmen realisiert (Abbildung 5).

²benannt nach Friedrich Richard Ulbricht (* 6. August 1849 in Dresden, † 13. Januar 1923), deutscher Ingenieur und Professor

³NICHIA Corporation, www.nichia.co.jp/de

⁴SEOUL Semiconductor, www.seoulsemicon.com/en

2.2.2 Optikaufbau

Die Optik, welche die mit rund 160° abstrahlenden LEDs homogenisiert, besteht, wie oben erwähnt, aus einer Sammellinse mit einer Brennweite von 40 mm und einer Justier- bzw. Fokussierlinse mit einer Brennweite von 100 mm (siehe auch Abbildung 6). Eine Sammellinse fokussiert prinzipiell dann am genauesten, wenn sie entweder von parallelen Lichtstrahlen getroffen, oder von einer wirklich punktförmigen Lichtquelle (exakt im Punkt des Fokus der Linse) angeleuchtet wird. Da der LED-Chip eine endliche Größe besitzt, wurde nur der Teil in der Linse gesammelt, der relativ parallel eintritt. Dies gelingt durch eine (trotz kurzer Brennweite) weite Entfernung zwischen der LED und der Sammellinse, was zusätzlich den Vorteil mit sich bringt, dass nur 5° (um die optische Achse) des emittierten Lichts der LEDs auf die Sammellinse treffen. Die Intensitätsvariation des emittierten Lichts der LEDs ist in diesem Bereich verhältnismäßig gering - nur ca. 2%⁵. Gute Voraussetzungen für einen homogenen Lichtspot. Das nun gebündelte Licht wird durch eine einstellbare Verschlussblende geleitet, die so positioniert ist, dass sie annähernd im Fokus der Sammellinse steht, womit eventuell noch vorhandenes störendes Streulicht abgeblockt werden kann. Die darauf folgende Justier- bzw. Fokussierlinse dient nun dazu, den aufgrund der 40 mm Sammellinse viel zu groß aufgeweiteten Spot wieder zu schmälern und perfekt zu homogenisieren (Abbildung 6).

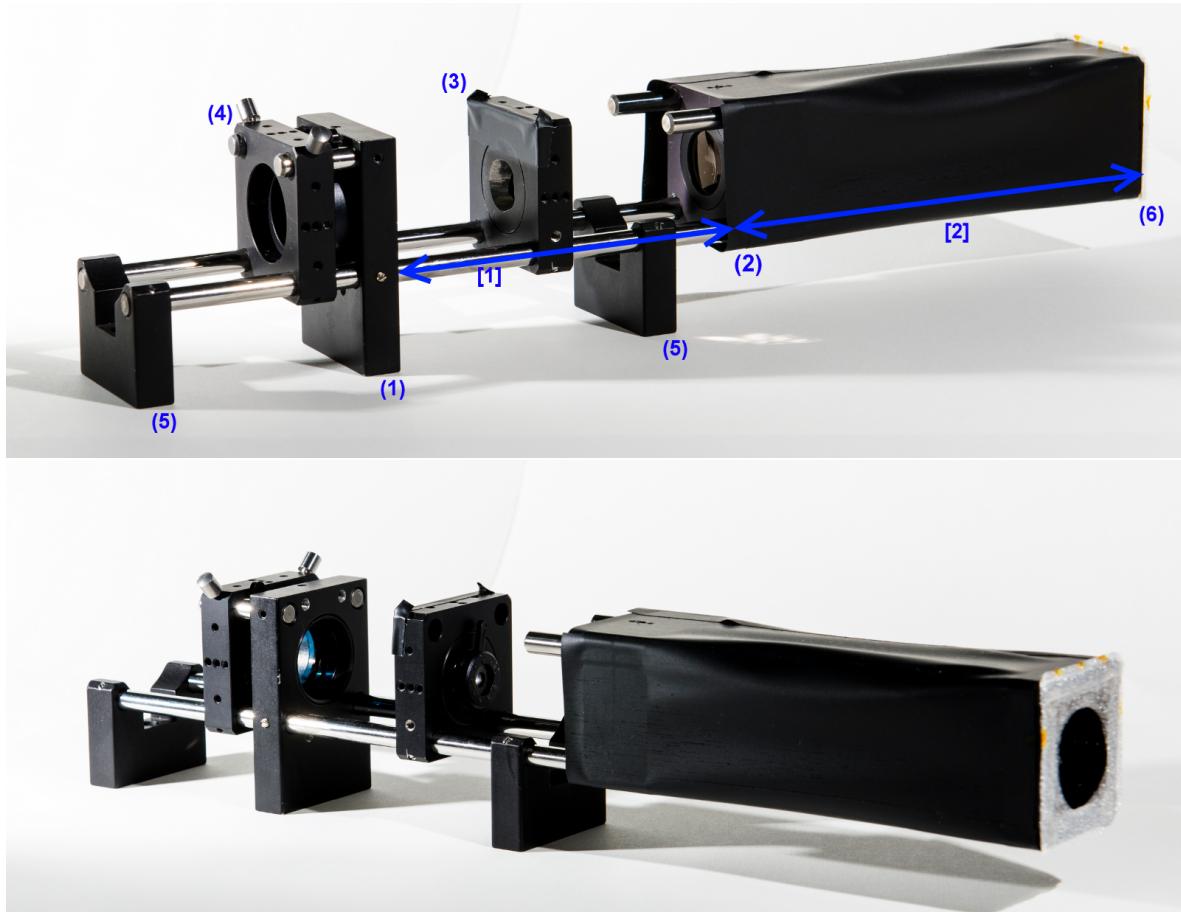


Abbildung 6: Optikaufbau; [1] Abstand zwischen Sammel- und Justierlinse, [2] Abstand zwischen Sammellinse und LED Anpressfläche (konstant 130 mm), (1) Justierlinse, (2) Sammellinse, (3) kleine Streulichtblende, (4) große Abschlussblende, (5) Verschraubungsfüße, (6) LED Anpressfläche

⁵siehe Spezifikationen in [3, 1, 2, 5]

2.2.3 Ulbricht-Kugel

Die Ulbrichtkugel ist ein Instrument der technischen Optik. Sie wird sowohl als Lichtquelle eingesetzt, um diffuse Strahlung aus Gerichteter zu erhalten, oder auch um das Licht stark diffuser Strahlungsquellen zu sammeln (man spricht daher auch häufig von einer Integrationskugel). Ferner kann sie auch zur Homogenisierung und Einkopplung in optische Fasern eingesetzt werden, was hier der Fall ist. Dies ermöglicht ein stabileres Auslesen von beispielsweise Lichtströmen. Je nach Anwendungsgebiet kommen hierbei verschiedene Größen solcher Kugeln zum Einsatz. Beginnend bei den kleinsten Kugeln mit einem Innendurchmesser von wenigen Zentimetern, bis hin zu sehr großen Kugeln mit Innendurchmessern von bis zu zweieinhalb Metern. Dabei sind die Kugeln relativ kostenintensiv, da deren innenwandige Beschichtung aus *BaSO₄* (Bariumsulfat), *PTFE* (Polytetrafluorethylen) oder *Gold* besteht [9] und abhängig vom Wellenlängenbereich gewählt wird.

In diesem Aufbau kommt eine Ulbrichtkugel der Firma LOT Oriel⁶ (Abbildung 8) zum Einsatz. Die mit Bariumsulfat beschichtete Kugel hat einen Innendurchmesser von 100 mm, 2 Öffnungen mit je 25 mm Durchmesser, welche exakt gegenüber zueinander liegen, sowie eine Detektoröffnung. Die Kugelinnenseite weist eine Reflektivität von 97,2% bei 365 nm bis hin zu 97,8% bei 510 nm auf [9].

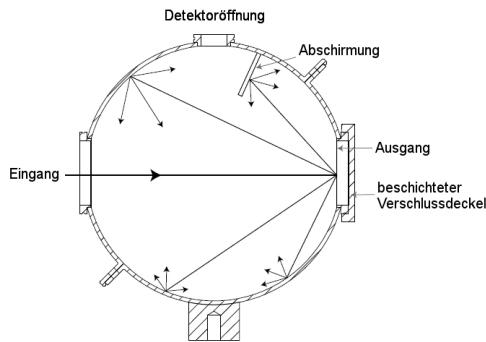


Abbildung 7: Schema einer Ulbrichtkugel, ähnlich der verwendeten [9]



Abbildung 8: Ulbrichtkugel mit Ein-gangsöffnung und Kupplung für Lichtfaser (rechts oben im Bild)

2.2.4 Spektrometer

Als Spektrometer kommt ein portables, modular aufbaubares Gerät der Serie JAZ der Firma Ocean Optics⁷ zum Einsatz (Abbildung 9). Es wird über eine Lichtleitfaser mit der Ulbrichtkugel verbunden, um so als Ausleseeinheit bzw. vollständige Detektoreinheit zu fungieren.

Das Spektrometer-Modul JAZ-S arbeitet in einem Wellenlängenbereich von 200 - 1100 nm mit einem Sensitivitätspeak bei 650 nm (Rot). Dabei kann die Integrationszeit von 3 Millisekunden bis hin zu 65 Sekunden gewählt werden, was ein Messen von dunklen Lichtquellen möglich macht. Das Gerät ist weiterhin mit einem Xenon-Lampen-Modul (JAZ-PX) ausgerüstet, womit mittels einer Messsonde direkte Reflektivitätsmessungen (lokaler Art) gemacht werden können (siehe Abschnitt 4). Diese gepulste Xenon-Lampe deckt dabei einen Wellenlängenbereich von 190 - 1100 nm ab und erreicht mit maximal 200 Hz Pulsfrequenz eine Durchschnittsleistung von rund 2,5 W.

⁶LOT Oriel GmbH & Co.KG, www.lot-qd.de

⁷Ocean Optics, www.oceanoptics.com

Das Display-Modul (JAZ-DPU), welches auch in Abbildung 9 oben sitzend zu sehen ist, ermöglicht ein mobiles und PC freies Arbeiten mit dem Spektrometer. So können bspw. zu messende Spektren einfach und direkt auf dem Display dargestellt werden. Dieses Feature wird jedoch hier nicht verwendet.

Ein Batteriemodul (JAZ-B) macht das gesamte System sehr flexibel und vom Stromnetz unabhängig. [10]



Abbildung 9: JAZ-Spektrometer mit oben sitzendem Display-Modul

2.3 Charakterisierung der Lichtquellen

Um die Homogenität der Lichtquellen bzw. der Lichtspots, welche den Spiegel ausleuchten sollen, zu überprüfen, werden zwei Methoden verwendet. Zum einen das Scannen des Spots mit einer Photodiode (siehe Abschnitt 2.3.1), welche an einem über Schrittmotoren in horizontaler und vertikaler Richtung verfahrbaren Schlitten montiert ist (Abbildung 10), zum Anderen eine einfache Abstandsmessung zur Verifizierung des Abstandsgesetzes für Lichtquellen (Abschnitt 2.3.2). Diese wird mit der Ulbrichtkugel durchgeführt.

2.3.1 Schrittrasterung mit Photodiode

Die Schrittrasterung bzw. das Scannen des Lichtspots bringt den Vorteil mit sich, Inhomogenitäten relativ genau vermessen zu können. Der Nachteil einer solchen Messung liegt jedoch im hohen Zeitaufwand begründet. Da ein genaues Scannen des gesamten Spots, welcher in einem Abstand von knapp einem Meter bereits einen Durchmesser von rund 15 cm besitzt, viele Messpunkte benötigt und daher sehr anfällig für äußere Störeinflüsse ist. Die Methode eignet sich dennoch hervorragend für einfache vertikale oder horizontale Fahrten, also zum groben Scannen des Spots in diesen Richtungen, da sich der Zeitaufwand hier auf wenige Minuten beschränkt. Die Schrittrastermessungen werden also eher qualitativ als quantitativ ausgewertet.

Als Photodioden kommen zwei Typen zum Einsatz. Zum einen eine handelsübliche Standard-Photodiode, welche im Bereich des sichtbaren Lichts⁸ passiv (also als lichtabhängiger Widerstand) arbeitet. Es wird also eine Spannungsquelle benötigt, welche die Photodiode in Sperrrichtung mit Strom versorgen kann. Der Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts wird von einer Silizium-Photodiode der Firma Osram⁹ gemessen, welche in einem Wellenlängenbereich von 350 nm bis 1100 nm (mit einem Sensitivitätspeak bei 850 nm)[4] eingesetzt werden kann.

⁸das menschliche Auge kann Licht in einem Spektrum von ca. 400 nm bis ca. 750 nm wahrnehmen

⁹OSRAM Opto Semiconductors GmbH & Co. OHG, www.osram-os.com

Da der Ultraviolette (365 nm) Teil der zur Verfügung stehenden LEDs damit noch nicht abgedeckt ist, kommt hier eine spezielle UV sensitive Photodiode der Firma sglux¹⁰ zum Einsatz. Diese kann einen Wellenlängenbereich von 200 nm bis 375 nm detektieren (mit Empfindlichkeitspeak bei 300 nm) und ist somit bei 365 nm noch gut sensitiv [6]. Da diese spezielle Photodiode ein aktives Bauelement ist, ist eine externe Spannungsversorgung wie zuvor nicht möglich. Die Photodiode erzeugt bei Lichteinstrahlung selbst eine geringe Spannung, welche einen sehr kleinen Stromfluss ermöglicht. Dieser wird mit einem Picoamperemeter vom Typ 6485 der Firma Keithley¹¹ gemessen und über eine RS-232 Schnittstelle an das auf einem PC arbeitende Mess- und Steuerungsskript übertragen. Als Spannungsversorgung für die Silizium-Photodiode kommt eine handelsübliche, regelbare Spannungsquelle, mit ebenso regelbarer Strombegrenzungsmöglichkeit zum Einsatz.

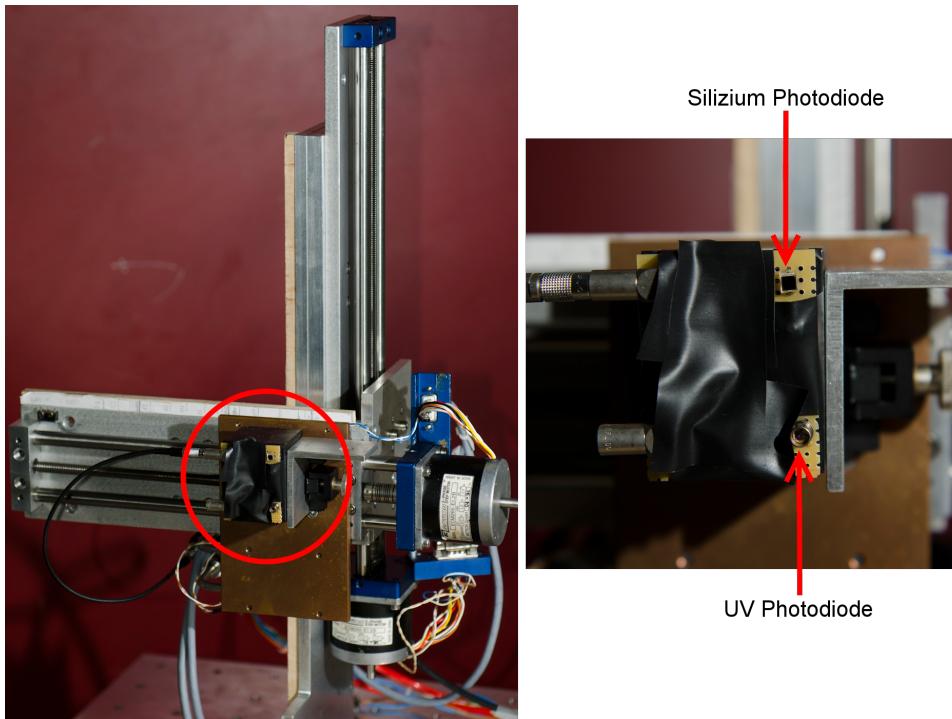


Abbildung 10: Photodioden auf einem mit Schrittmotoren in horizontaler und vertikaler Richtung verstellbaren Schlitten angebracht, Silizium-Photodiode oben, UV-Diode unten (Vergrößerung roter Kreis)

2.3.2 Abstandsmessung bzw. $1/r^2$ -Gesetz

Die Abstandsmessung erfüllt zwei Zwecke. Zum einen den Hauptzweck des Verifizierens der $1/r^2$ -Gesetzmäßigkeit, welche nötig ist, um die Menge an Licht pro Fläche, welche den Spiegel trifft, bestimmen zu können, zum anderen indirekt auch als Nachweis dafür, dass die zuvor als homogen eingestellte und erachtete Lichtquelle tatsächlich homogen ist.

Die Gesetzmäßigkeit

$$I(r) \sim \frac{1}{r^2}, \quad (1)$$

welche auch als $1/r^2$ -Gesetz bekannt ist, beschreibt den Zusammenhang zwischen der Intensität I eines freien elektromagnetischen Feldes mit dem Abstand r zur Quelle des Feldes. Hier beschreibt

¹⁰sglux GmbH, www.sglux.de

¹¹Keithley Instruments Inc., www.keithley.de

es also konkret die Abnahme des Lichtstroms mit zunehmender Entfernung zur Lichtquelle. Es ist leicht zu sehen, dass diese Intensität I (des Lichtstroms) mit zunehmendem Abstand r quadratisch abnimmt. Gleichung 1 kann also auch geschrieben werden als

$$I_0 \cdot r_0^2 = I(r) \cdot r^2, \quad (2)$$

und durch einfaches umformen schließlich als

$$I(r) = \frac{I_0 \cdot r_0^2}{r^2}. \quad (3)$$

Durch vergleichen mit (1) wird ersichtlich, dass $I_0 \cdot r_0^2$ durch einen konstanten und einheitenlosen Faktor C ersetzt werden kann. Dieser wird als Intensität des Lichtstroms in einem Millimeter Entfernung zum Ursprung des Lichts angesehen.

Zur Veranschaulichung kann Abbildung 11 betrachtet werden.

Durch Einführung eines weiteren Parameters A , welcher den Versatz der physikalischen Lichtquelle zu einer festen Bezugskante darstellen soll, wird Gleichung 3 zu

$$I(r) = \frac{C}{(r + A)^2}. \quad (4)$$

Das Messen der Intensitäten geschieht mit der Ulbrichtkugel. Im Messaufbau wird diese an einem Ort aufgestellt, über das Spektrometer und die Software ausgelesen, und der Schlitten, auf welchem sich die Optik bzw. der Optikaufbau befindet, schrittweise von der Kugel entfernt. Dabei ist es empfehlenswert die Kugel so einzurichten, dass deren Öffnung mit der Vorderkante der Optikplatte (VKOP) am Startpunkt zusammenfällt. Somit ist der erste gemessene Abstandswert gleich Null. Aus den Abständen und den Intensitäten einer Messreihe können schließlich die Parameter A und C ermittelt werden. Hiermit wird später die Intensität des Lichtstroms am Ort des Spiegels errechnet.

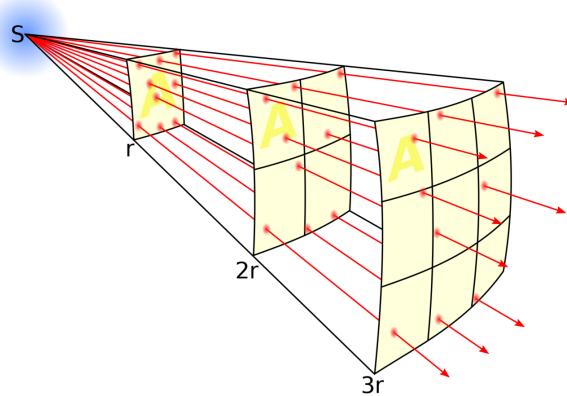


Abbildung 11: Veranschaulichung des Abstandsgesetzes mit Strahlungsquelle S [8]

2.4 Messablauf zur fokussierten Reflektivität

Zusammenfassend wird nun der Messablauf kurz dargestellt.

Zunächst wird die LED mit der gewünschten Wellenlänge in der Halterung angebracht und die Schrittrasterung vorbereitet. Anschließend wird mit dem Schrittmotoren-Steuerungsskript die LED-Position sukzessive approximiert. Hierbei ist der Vorgang so oft zu wiederholen, bis der erzeugte Lichtspot Homogenität aufweist, beziehungsweise bis ein homogener, nicht an- oder absteigender Verlauf entlang der horizontalen und vertikalen Messfahrten erreicht ist. Ist dieses

Kriterium erfüllt, wird die Position der LED nicht mehr verändert und die Messung zur Verifizierung des Abstandsgesetzes vorbereitet (Spektroskop, Laptop und Ulbrichtkugel einrichten) und durchgeführt. Sind die daraus resultierenden Fitparameter A und C bestimmt, wird die Ulbrichtkugel so positioniert, dass deren Öffnung sich - laut ermitteltem Parameter A - auf einer Höhe mit der physikalischen Lichtquelle befindet. Nun kann die Messung der fokussierten Reflektivität für jeden Spiegel nacheinander durchgeführt werden.

Wichtig: Die LED darf zwischen Abstandsmessung und Reflektivitätsmessung nicht abgeschaltet, oder in ihrer Energieversorgung verändert werden¹².

3 Messungen und Ergebnisse

Nachfolgend werden die Messungen und Messwerte, welche mit der oben beschriebenen Methodik gemacht wurden, dargestellt.

3.1 Homogenität der Lichtquellen

3.1.1 Schrittrasterung mit Photodioden

Um die LEDs am Optikaufbau einzurichten, also so einzustellen, dass der erzeugte Spot am Ende des Optikaufbaus homogen ist, wird die Schrittrastersteuerung verwendet. Durch einfache vertikale und horizontale Messfahrten (Crossings genannt) durch den Mittelpunkt des Spots ist es möglich, den Intensitätsverlauf entlang dieses Weges darzustellen (siehe auch Abschnitt 2.3.1). Ist das Einstellen des Verlaufs, also nach Eliminieren eines Ansteigens oder Abfallens entlang einer Richtung, was durch exaktes Positionieren der LED in ihrer Halterung entlang der horizontalen bzw. vertikalen Richtung geschieht, abgeschlossen, so folgt das Feineinstellen der Justier- bzw. Fokussierlinse. Dies ist notwendig, da die exakte Position der Justierlinse (somit auch die Aufweitung des endgültigen Lichtspots) LED abhängig ist und einen erheblichen Einfluss auf die Homogenität des Lichtspots hat. Die Positionen sind nach dieser Arbeit bekannt und werden unten aufgeführt (Tabelle 1). Zu Dokumentationszwecken, jedoch für den weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht relevant, sind auch die auf den Abstand von Sammel- zu Justierlinse (siehe Kapitel 2.2.2 Abbildung 6) umgerechneten Werte mit angegeben.

Da die Photodioden unterschiedlich stark auf die jeweiligen Wellenlängen der LEDs reagieren [4, 6], werden zur Versorgung der Silizium-Photodiode unterschiedliche Spannungswerte verwendet. Wie bereits oben erwähnt, wird bei der UV-Photodiode keine Versorgungsspannung (Sperrspannung) angelegt, da diese ein aktives Bauelement darstellt. Um den Effekt der unterschiedlichen Photodioden-Sensitivitäten nochmals abzumildern, kann auch der Leuchtdiodenstrom erhöht werden, was zu einem helleren Spot führt und somit ein größeres Signal am Amperemeter verursacht. Die verwendeten Zahlenwerte sind in Tabelle 1 dargestellt.

	LED-365	LED-405	LED-470	LED-500
Photodioden-Sperrspannung (V)	-	20	10	10
LED-Strom (mA)	700	400	400	400
Abstand der Justierlinse (mm)	89	86	89	93
Abstand [1] (mm)	97	100	97	93

Tabelle 1: Sperrspannungswerte, Abstand von VKOP zur Vorderkante der Justierlinse, sowie LED-Betriebsstromwerte für die Schrittrastermessungen, LED-Strom wurde an der Stromquelle abgelesen

¹²Bei der Messung, die mehrere Stunden dauerte, wurde ein leichter Stromanstieg um wenige Milliampere beobachtet, jedoch nicht korrigiert.

Nachfolgend werden Diagramme für die horizontalen (auch vertretend für die vertikalen) Crossings der LEDs dargestellt (siehe Abbildung 12 und 13).

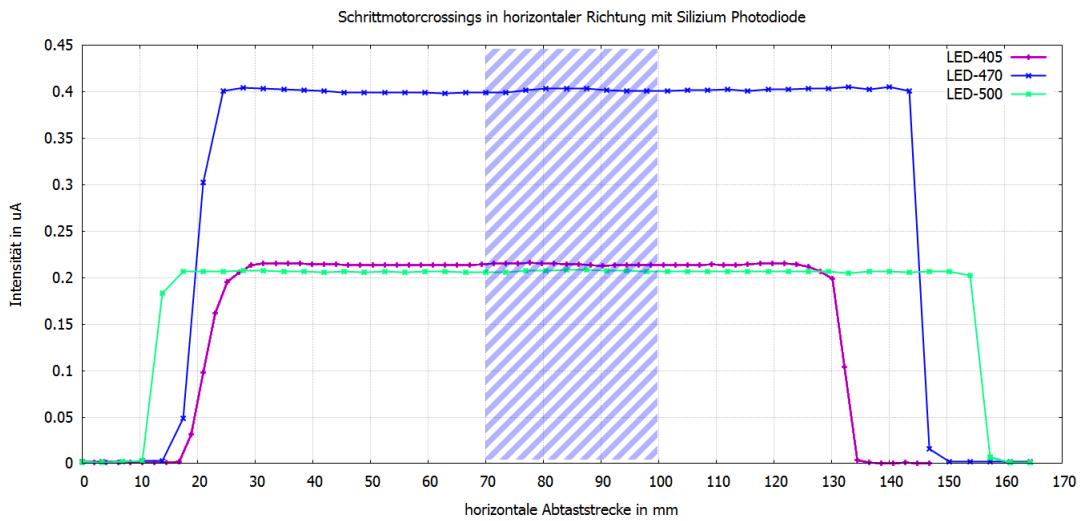


Abbildung 12: horizontale Crossings der visuell wahrnehmbaren LEDs; Schraffur: mittenumgebender Teil der LED-470 beispielhaft für LED-405 und LED-500

Wie in Abbildung 12 zu sehen ist, haben die Lichtspots relativ scharfe Kanten, welche sie sauber von Untergrundrauschen trennen. Außerdem kann die Größe der Spots, am Ort des Photodioden-schlittens, einfach abgelesen werden. Ebenfalls gut zu erkennen ist eine leichte Welligkeit innerhalb des Spots. Diese Welligkeit lässt den Spot von der perfekten Homogenität leicht abweichen, tatsächlich liegen die Schwankungen bei ca. 2 %. Dies kann bei einer Messentfernung (wie oben erwähnt) von nur knapp einem Meter als unproblematisch angesehen werden, da sich im weiteren Verlauf diese Schwankungen noch leicht ausgleichen werden. Der für die Messung relevante Bereich des Spots ist, nachdem die optische Achse relativ gut auf den Spiegel ausgerichtet wurde, nur ein mittenumgebender Teil der Breite der in den Abbildungen 12 und 13 dargestellten Spotbreite (siehe auch Abschnitt 3.1.2).

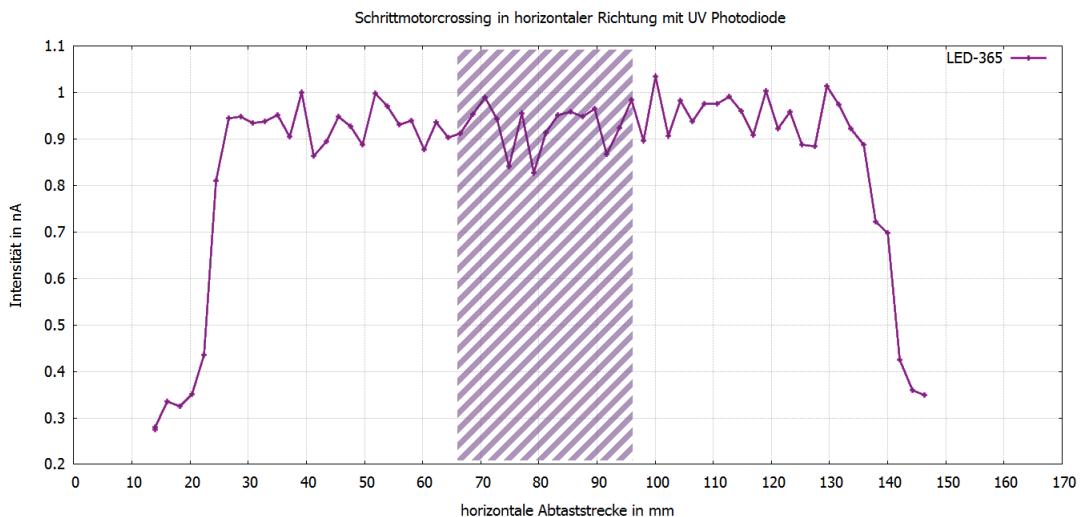


Abbildung 13: horizontales Crossing der 365 nm UV LED; Schraffur: mittenumgebender Teil

Abbildung 13 zeigt das Crossing in horizontaler Richtung mit der UV-Photodiode. Hier ist zu

erkennen, dass aufgrund der aktiven Bauart der Photodiode, die Schwankungen selbst innerhalb des Spots vergleichsweise groß sind, was auf ein niedriges Signal-zu-Rausch Verhältnis schließen lässt ($S/R = 5$). Zur Stabilisierung des Signals wäre - wie vorgesehen [6] - noch eine Modifikation der Auslese über das Picoamperemeter möglich. Als Nachweis dafür, dass der Spot keinerlei Anstieg oder Abfall entlang des Crossings aufweist, ist diese Messung jedoch ausreichend.

3.1.2 Abstandsmessung mit Ulbrichtkugel

Bei der Durchführung der Abstandsmessung mit dem Spektrometer stellt man fest, dass der monochromatische Peak der LEDs, unter den jeweiligen Betriebsbedingungen, um wenige Nanometer zur nominalen Wellenlänge verschoben liegt. Dies ist jedoch nicht überraschend, da die Peak-Wellenlänge mit dem LED-Strom variiert¹³. Die tatsächlichen Wellenlängen λ sind in Tabelle 2 notiert.

Es ist empfehlenswert die Ulbrichtkugel so in den Strahlverlauf zu stellen, dass der gesamte Spot nahezu komplett und zentriert in die Öffnung der Kugel passt, da somit entlang der optischen Achse der Lichtquelle gemessen wird. Später wird die optische Achse auf den Spiegel ausgerichtet, um so möglichst wenig zusätzliche systematische Fehler zu erzeugen.

Nach der Durchführung der Abstandsmessung werden die Werte umgerechnet, also an die Überlegung des Fits angepasst, mit einem geeigneten Programm geplottet und eine Funktion der Form (4) daran gefittet. Um durch den Fit den richtigen Wert des Parameters C zu erhalten, muss die Kugelöffnung erneut betrachtet werden. Da die Öffnung einen gemessenen Durchmesser von 23,85 mm besitzt und somit die Öffnungsfläche größer als 1 mm^2 ist, muss die gemessene Intensität (Counts) normiert werden. Hierzu wird der Normierungsfaktor D eingeführt, der die Intensität auf die Fläche von einem Quadratmillimeter reduziert.

$$D = \frac{1}{(23,85 \text{ mm})^2 \cdot \pi/4}. \quad (5)$$

Somit wird aus den gemessenen Counts der Kugelöffnungsfläche \tilde{I} die auf einen Quadratmillimeter normierte Intensität $I = D \cdot \tilde{I}$, womit schließlich der Fit durchgeführt werden kann.

Für den Fit-Algorithmus werden meist geeignete Startwerte für die Fitparameter A und C benötigt, welche für A (in diesem speziellen Fall des Aufbaus) bei rund 175 mm und für C in der Größenordnung von rund $2,3 \cdot 10^7$ liegen. Nachfolgend werden die Diagramme inkl. Fits dargestellt; sowie die gefitteten Parameter aller LEDs in Tabelle 2 zusammengefasst.

Gut zu erkennen ist die Abweichung der Messwerte vom Fit im Anfangsbereich der Messung, also dem Nahbereich von Kugelöffnung und VKOP. Da die Extrapolation zu großen Abständen hin wichtig ist, wurden die ersten 2-3 Messpunkte beim Fit ausgenommen. Es ergeben sich für alle vier Fits reduzierte χ^2 -Werte kleiner 3, was für einen derartigen Fit ausreichend gut ist.

	LED-365	LED-405	LED-470	LED-500
Wellenlänge λ (nm)	368	410	474	510
LED-Betriebsstrom (mA)	700 (1)	600 (1)	400 (2)	400 (2)
A (mm)	$168,3 \pm 2,6$	$184,6 \pm 1,2$	$179,5 \pm 1,4$	$168,5 \pm 1,4$
C (10^7 Counts)	$2,57 \pm 0,04$	$2,48 \pm 0,02$	$2,65 \pm 0,03$	$1,70 \pm 0,02$
reduziertes χ^2	2,33	0,35	2,61	2,01

Tabelle 2: Mess- und Fitparameter der Abstandsmessungen; (1) Multimeter, (2) Stromquelle

Damit ist, wie oben bereits erwähnt wurde, nicht nur die Gültigkeit des Abstandsgesetzes für diese Messung und Methodik nachgewiesen, sondern auch die Homogenität der Lichtquelle entlang der optischen Achse.

¹³siehe Spezifikationen in [3, 1, 2, 5]

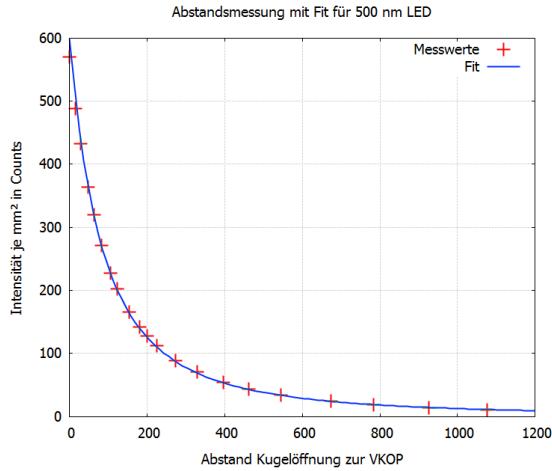


Abbildung 14: Messpunkte und Fit für die 500 nm LED

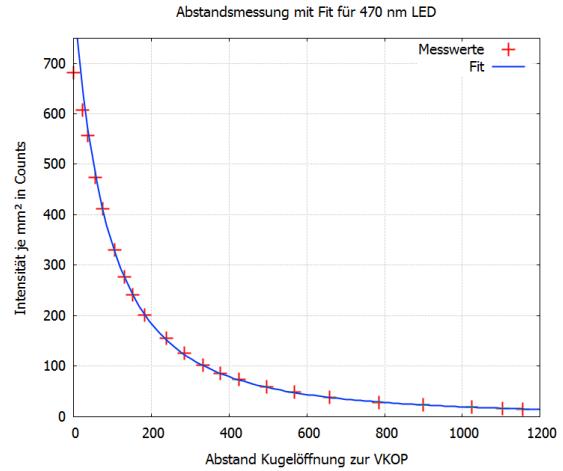


Abbildung 15: Messpunkte und Fit für die 470 nm LED

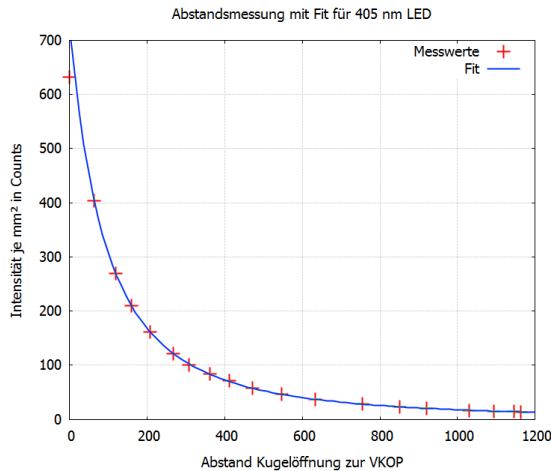


Abbildung 16: Messpunkte und Fit für die 405 nm LED

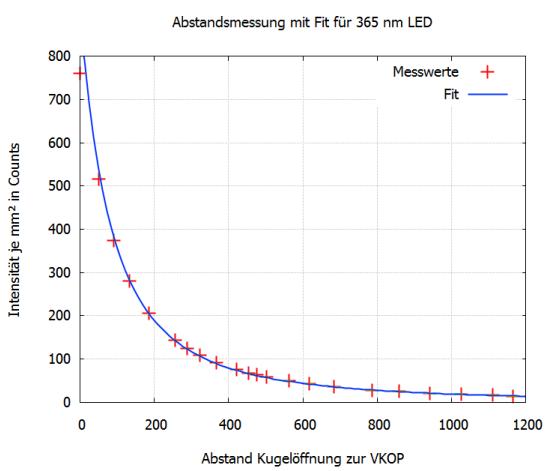


Abbildung 17: Messpunkte und Fit für die 365 nm LED

Da die Abstandsmessungen (wie auch daraus resultierend die Messungen der Counts, welche vom reflektierten Licht im Spektrometer erzeugt werden) je nach LED mit unterschiedlichen Integrationszeiten des Spektrometers gemessen wurden, sind die Parameterwerte C nicht direkt miteinander vergleichbar.

3.2 Reflektivitätsmessungen

Nach den vorbereitenden Messungen zur Sicherung der Homogenität der Strahlungsquelle und dem Ermitteln der jeweiligen Parameter des Abstandsgesetzes, ist es nun möglich, die Reflektivitätsmessungen durchzuführen. Hierbei ist ein großer Vorteil dieser Messmethode, dass die Empfindlichkeit des Spektrometers bei unterschiedlichen Wellenlängen keine Rolle spielt. Da sowohl die Abstands- als auch die Reflektivitätsmessung bei der selben Wellenlänge gemessen wird, kürzen sich bei den endgültigen Berechnungen eventuelle Sensitivitätsschwankungen des Spektrometers heraus. Während der Messung wurde die Kugel nur wenige Zentimeter von der Lichtquelle entfernt aufgestellt und die PSF möglichst mittig in die Kugelöffnung geführt. Des Weiteren ist darauf zu achten, dass sich aufgrund von Herstellungsprozessen bereits werkseitig nicht-reflektierende (also nicht beschichtete) Flächen am Spiegel ergeben (Abschnitt 3.2.5).

Diese wurden ausgemessen und werden später in die endgültigen Berechnungen in Kapitel 4 mit einfließen.

Um die Messmethode zu testen, standen 4 Spiegel zur Verfügung. Darunter zwei Verbundspiegel aus Japan (Sanko 2 und 3), ein dielektrisch beschichteter Spiegel aus Kraków/Polen (Kraków Diele), sowie ein Vollglasspiegel eines armenischen Herstellers (Arm 1).

Nachfolgend werden die detektierten Counts des reflektierten Lichts dargestellt (Tabelle 3). Die Ergebnisse, also der tatsächliche Reflektivitätswert, ist in Abschnitt 4 zu finden.

	Sanko 2	Sanko 3	Kraków Diele	Arm 1
detektierte Counts bei 510 nm	19.150	19.000	19.250	12.700
detektierte Counts bei 474 nm	27.100	27.350	27.800	17.000
detektierte Counts bei 410 nm	26.400	26.550	24.850	16.800
detektierte Counts bei 368 nm	29.400	29.050	26.200	18.400

Tabelle 3: detektierte Counts der LEDs bei deren tatsächlichen Peak-Wellenlängen für die verschiedenen Spiegel

3.2.1 LED-500 (Türkis)

Nachdem die Fitparameter, also auch der Abstand der physikalischen Lichtquelle zur Vorderkante der Optikplatte bekannt ist, kann die Ulbrichtkugel wie oben beschrieben positioniert werden. Der Parameter A betrug für die LED-500 168,5 mm.

Die Ergebnisse, also die detektierten reflektierten Counts, sind in Tabelle 3 dargestellt. Gemessen wurde mit (Einstellungen am Spektrometer bzw. in der Spektrometer-Software) einer Integrationszeit von 200 ms, einer Mittelung über 8 Integrationen (8 Averages), also somit einer gesamten Messzykluszeit von 1600 ms.

Die Reflektivitätsmessung mit der 500 nm LED war die erste, welche (in Erlangen) nach dieser Methode durchgeführt wurde. Leider wurde während den Messungen die LED mehrfach aus- und wieder eingeschaltet, was wie oben erwähnt der Messung Fehler zuführen kann.

3.2.2 LED-470 (Blau)

Das Resultat, die detektierten Counts im Falle der Messung bei 474 nm, ist in Tabelle 3 dargestellt. Wie bereits in Abschnitt 3.1.2 angemerkt wurde, sind auch die detektierten Counts nicht direkt von LED zu LED miteinander vergleichbar. Gemessen wurde mit 200 ms Integrationszeit, 8 Averages, somit einer Zykluszeit von 1600 ms (wie im Falle der türkisen LED).

3.2.3 LED-405 (UV bis Violett)

Die Abstandsmessung mit der 405 nm LED ergab den besten Fit der Messreihen (siehe auch Tabelle 2), was das wohl genaueste Ergebnis erhoffen lässt. Gemessen wurden die Counts in diesem Fall mit einer Integrationszeit von 400 ms und 4 Averages, um so wieder eine Messzykluszeit von 1600 ms zu haben.

3.2.4 LED-365 (UV)

Beim Betreiben der 365 nm LED, mit dem in dieser Arbeit höchsten verwendeten Leuchtdiodenstrom von 700 mA, war es trotzdem nicht möglich, eine Integrationszeit von unter 1800 ms zu wählen. Um die Messsystematik annähernd gleich zu halten, wurde somit kein Averaging (keine Mittelung) vorgenommen, was eine gesamte Messzykluszeit von 1800 ms ergibt.

3.2.5 effektive Spiegelflächen

Da, wie oben bereits erwähnt, die Spiegelflächen nicht exakt hexagonal verspiegelt sind, werden sogenannte Korrekturflächen F_K abgemessen, welche keine spiegelnde Wirkung besitzen und später von der theoretischen gesamten hexagonalen Spiegelfläche F_S abgezogen werden. Diese Korrekturflächen sind nachfolgend in Tabelle 4 kurz dargestellt und fließen in Abschnitt 4 in die Berechnungen mit ein.

	Sanko 2	Sanko 3	Kraków Diele	Arm 1
Spiegelfläche F_S (mm ²)	1.236.700	1.251.200	1.236.700	933.100
Korrekturfläche F_K (mm ²)	10.500	9.100	6.900	8.800
spiegelnde Fläche $F = F_S - F_K$ (mm ²)	1.226.200	1.242.100	1.229.800	924.300

Tabelle 4: Korrekturflächen F_K sowie spiegelnde Flächen F der jeweiligen Spiegel

4 Auswertung und Interpretation

Zur Ermittlung der fokussierten Reflektivität wird, mit dem Fitparameter A , der tatsächliche Abstand der physikalischen punktförmigen Lichtquelle zur Spiegeloberfläche errechnet (d_{SQ}). Dabei ist der Abstand der festen Messkante (VKOP) zur Spiegeloberfläche d_{SK} .

$$d_{SQ} = d_{SK} + A \quad (6)$$

Damit erhält man den Lichtstrom pro Fläche, welcher auf die Spiegeloberfläche auftrifft:

$$I = \frac{C}{(d_{SQ})^2}. \quad (7)$$

Da nun bekannt ist, wie viel Licht (Lichtstrom in Form von Counts am Spektrometer) an der Spiegeloberfläche pro Quadratmillimeter auftrifft, kann der erwartete Wert der theoretisch reflektierten Counts aus der spiegelnden Fläche F errechnet werden.

$$I_{\text{reflektiert}} = I \cdot F \quad (8)$$

Daraus ergibt sich die Reflektivität R des Spiegels, indem der gemessene Wert der detektierten reflektierten Counts $I_{\text{detektiert}}$, mit den theoretisch reflektierten Counts $I_{\text{reflektiert}}$ in Relation gesetzt wird:

$$R = \frac{I_{\text{detektiert}}}{I_{\text{reflektiert}}}. \quad (9)$$

Der auf R liegende Fehler ΔR ergibt sich mit Gauß'scher Fehlerfortpflanzung zu

$$\Delta R = \frac{(r + A)^2}{F \cdot C} \cdot \left[\Delta I_c + \frac{2 \cdot I_c}{(r + A)} \cdot (\Delta r + \Delta A) + \frac{I_c}{F \cdot C} \cdot (F \cdot \Delta C + C \cdot \Delta F) \right], \quad (10)$$

wobei I_c hier für $I_{\text{detektiert}}$ stehen soll. Die Fehler sind jeweils wie folgt angenommen worden (Tabelle 5). Die Fehlerwerte ΔA (in mm), sowie ΔC , ergeben sich aus den jeweiligen Fits (Tabelle 2).

Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 sowie in Diagramm 18 dargestellt.

Wie zu sehen ist, liegen nahezu alle Werte oberhalb der kritischen 85% Marke, welche den Spiegeln als Anforderung gestellt wurde. Eine Ausnahme hierbei macht der armenische Vollglasspiegel, der nur mit einem Wert oberhalb der 85% Marke liegt. Da dieser jedoch kein CTA-Prototyp

ΔF (mm 2)	ΔI_c (Counts)	Δr (mm)
100	150	5

Tabelle 5: Werte der angenommenen Fehler

	Sanko 2	Sanko 3	Kraków Diele	Arm 1
Reflektivität R bei 368 nm (%)	$95,6 \pm 2,0$	$93,3 \pm 2,0$	$87,0 \pm 1,9$	$86,0 \pm 2,1$
Reflektivität R bei 410 nm (%)	$89,1 \pm 1,3$	$88,4 \pm 1,3$	$85,4 \pm 1,2$	$81,6 \pm 1,4$
Reflektivität R bei 474 nm (%)	$85,9 \pm 1,5$	$85,6 \pm 1,5$	$89,1 \pm 1,5$	$77,1 \pm 1,6$
Reflektivität R bei 510 nm (%)	$88,2 \pm 1,9$	$86,4 \pm 1,9$	$90,2 \pm 1,9$	$84,3 \pm 2,2$

Tabelle 6: Reflektivitätswerte der Spiegel

ist, wurde dieses Kriterium nicht vorgegeben. Weiterhin erkennbar ist die Ähnlichkeit der beiden Sanko Spiegel, welche sich in ihrer Reflektivität um höchstens 2,5% unterscheiden. Beide weisen zudem einen Anstieg ab geschätzten 440 nm auf, was dem Beobachten des Cherenkov-Lichts zugute kommt. Unterschiedlich ist die Charakteristik des Bauches (leichter Einbruch der Reflektivität) bei den Verbundspiegeln und dem dielektrisch beschichteten Spiegel aus Kraków. Erkennbar ist, dass der Bauch von Kraków weiter links als bei Sanko 2 und 3 liegt.

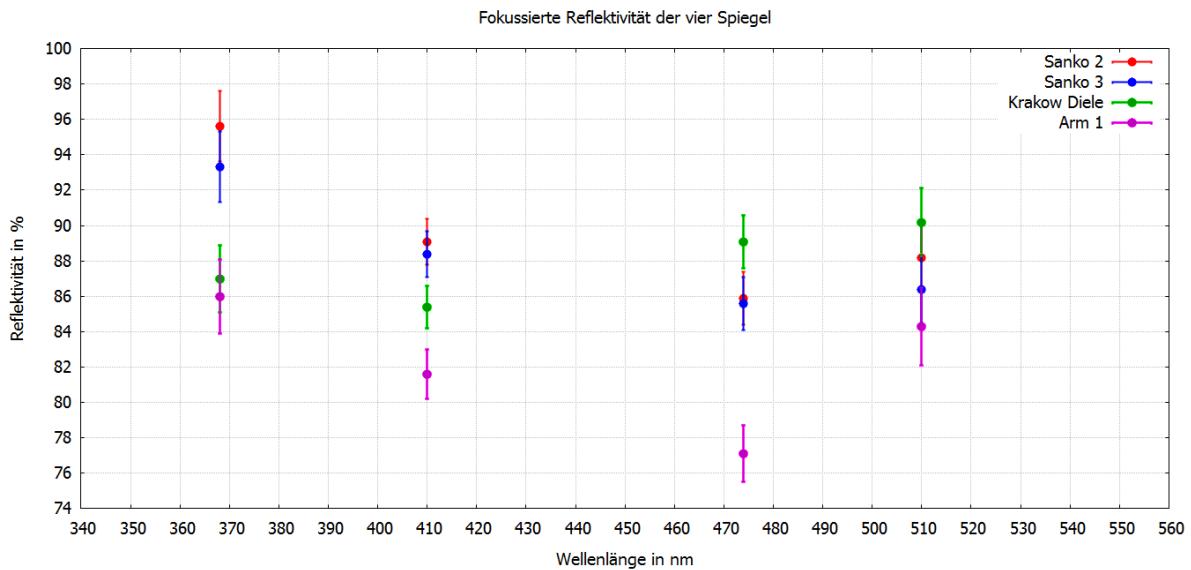


Abbildung 18: fokussierte Reflektivitäten der Spiegelfacetten

Nachfolgend sind Vergleichsdiagramme (Abbildungen 19 bis 21) dargestellt, welche für jeden Spiegel sowohl die hier ermittelten Reflektivitätswerte, sowie die lokalen Reflektivitätsspektren darstellen. Die lokalen Reflektivitätsspektren wurden, um den vorangegangenen Messbedingungen angepasst zu sein, mit einer Integrationszeit von 100 ms, 16 Averages und somit 1600 ms Messzykluszeit aufgenommen. Sie werden direkt an der Spiegeloberfläche mit dem Spektrometer und einer speziellen Sonde vermessen. Der Aufbau dieser Sonde ist aufgrund von Mikrorissen in der Sensor- und Lichtleitfaser relativ empfindlich, was zu einer Messtoleranz von ca. 1-2% führt. Die Charakteristik der Kurve, also der Verlauf und eventuelle Einbrüche, ist jedoch als richtig zu betrachten.

Da es in dieser Arbeit vorrangig um das Erstellen der Methodik als um das Bewerten der Spiegelfacetten gehen soll, werden die Vergleichsdiagramme nur kurz kommentiert.

Da bekannt ist, dass Sanko 2 und Sanko 3 (beides Verbundspiegel) den gleichen Herstellungs-

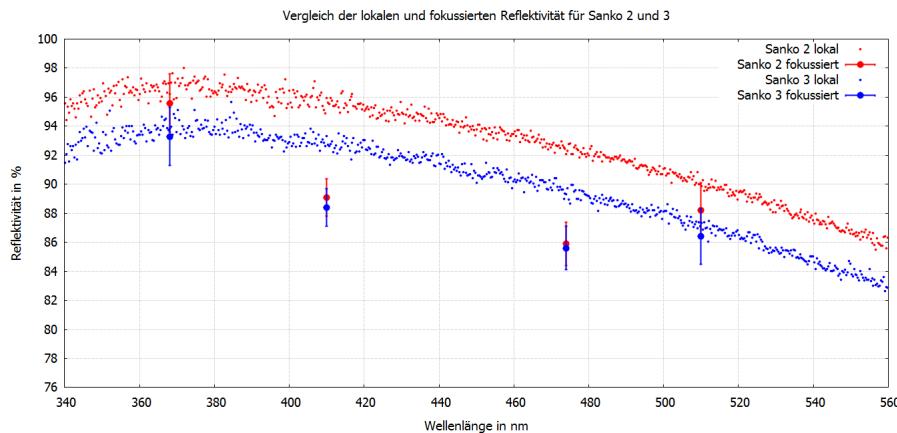


Abbildung 19: lokale und fokussierte Reflektivität von Sanko 2 und 3

prozess durchlaufen und sogar direkt nacheinander gefertigt wurden, ist hier erkennbar (Abb. 19), wie groß die systematischen Einflüsse der Messung zur lokalen Reflektivität sind, welche für diese Arbeit nur an jeweils einer Stelle des Spiegels durchgeführt wurde. Für eine qualitative Auswertung genügt dies zwar, jedoch ist die lokale Reflektivität des Spiegels nicht an allen Stellen gleich. Daher müssten mehrere Spektren, diagonal (von Eck zu Eck) über den Spiegel verteilt, für eine präzise Auswertung durchgeführt werden, wobei Schwankungen von rund einem Prozent zwischen den Einzelspektren sichtbar werden können. Ferner ist jedoch auch abwägbar, wie groß die Fertigungstoleranz, also die Produktionsstreuung, bei diesen Spiegeln ist.

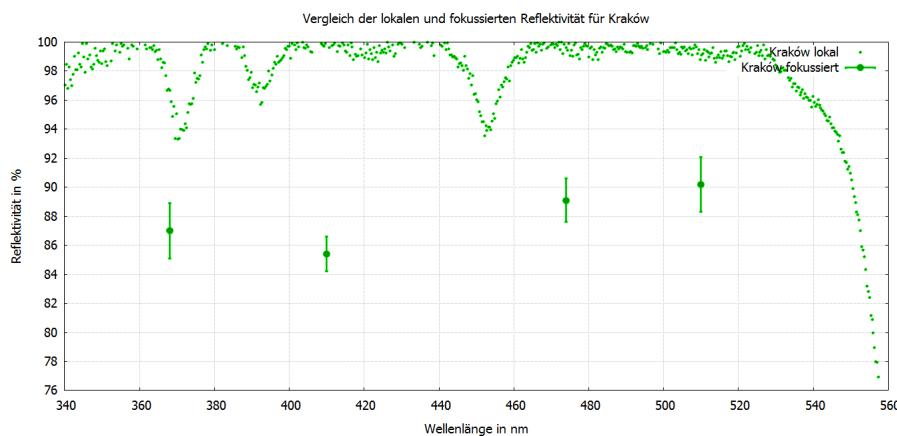


Abbildung 20: lokale und fokussierte Reflektivität von Kraków-Diele

Der dielektrisch beschichtete Spiegel aus Kraków erfüllt die Erwartungen, welche aus der lokalen Messung gezogen werden können (mit Ausnahme des 410 nm Messpunktes) gut.

Der armenische Vollglasspiegel zeigt hierbei die unerwartetsten Ergebnisse, da es physikalisch sehr unwahrscheinlich ist, dass die fokussierte Reflektivität des Spiegels größer ist als dessen lokale Reflektivität. Dieser Fehler lässt sich jedoch mit der oben erwähnten Toleranz von $\pm 1\text{-}2\%$, sowie einem eventuell vorhandenen Schmutzfilm auf der Spiegeloberfläche, erklären. Korrigiert man die lokale Reflektivitätskurve etwa 5% nach oben, so liegen alle fokussierten Reflektivitätswerte unterhalb lokalen Reflektivitätskurve, was den Erwartungen entspricht.

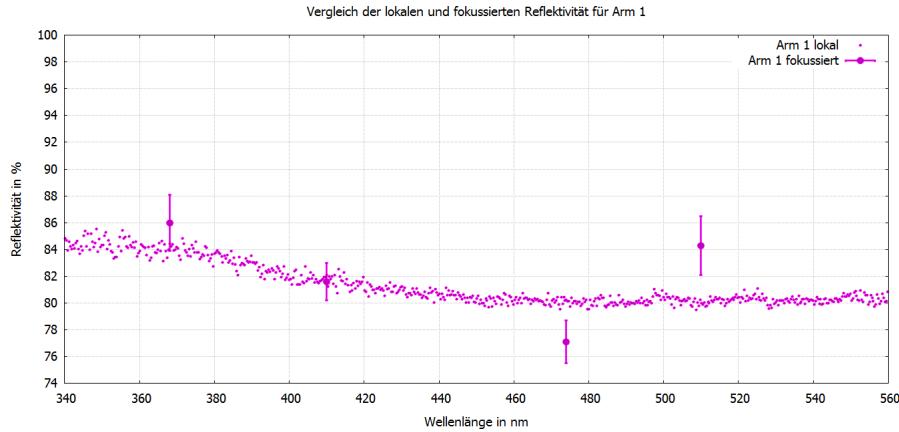


Abbildung 21: lokale und fokussierte Reflektivität von Arm 1

5 Diskussion und Ausblick

Die hier vorgestellte Methode zur 2f-Näherung ist die Erste, welche hier am ECAP in Erlangen auf diese Weise durchgeführt wurde. Die erzielten Ergebnisse liegen in einem sinnvollen Bereich, was das Funktionieren der Methode unterstreicht. Da jedoch keine Vergleichswerte oder Referenzwerte der fokussierten Reflektivität zu den hier verwendeten Spiegeln vorliegen, kann bislang noch keine Aussage über den Fehler der Methode gemacht werden. Für die Zukunft ist die Vermessung weiterer Prototyp-Spiegel für das CTA geplant, welche jedoch aufgrund von Liefererschwierigkeiten der Hersteller erst in einigen Wochen eintreffen werden. Diese Spiegel werden dann sowohl am ECAP, sowie auch an anderen Instituten vermessen, wodurch der Zugriff auf Vergleichswerte ermöglicht wird. So wird die Fehlerhaftigkeit dieser Methode noch quantifiziert werden. Andere kollaborierende Institute verwenden zur Messung der fokussierten Reflektivität verschiedene Methoden, was die Einbindung deren Ergebnisse noch interessanter macht.

Um eine Fehlerabschätzung der Messungen bzw. der Methode zu machen, sowie die Anwenderfreundlichkeit zu verbessern, sind außerdem noch einige weitere Messungen angedacht, welche nach Abschluss dieser Arbeit durchgeführt werden. Diese Messungen beinhalten zum Beispiel die Auswirkungen auf die gemessenen reflektierten Counts, bei Bewegen der LED um wenige Millimeter (in ihrer Aufnahme), also ein bewusstes Verringern der aufgebauten Homogenität des Spots. So wird gezeigt werden, wie sehr die Reflektion von einem homogenen Lichtspot abhängig ist. Dies würde die entstehenden Folgearbeiten beim Wechseln der LEDs verringern, da einfache Markierungen an den Kühlkörpern, sowie dem ersten Element des Optikaufbaus, genügen würden, um eine ausreichend gute Positionierung und somit Homogenität wiederherzustellen.

Ferner wird überlegt, ob nach bereits erfolgter, erfolgreicher Bestätigung der $1/r^2$ -Gesetzmäßigkeit, die erneute Messung beim wieder in Betrieb nehmen der LEDs nötig ist, oder ob ein einzelner Messpunkt genügen könnte, um mit diesem den Parameter C zu gewichten. Dies würde (sofern die LEDs aufgrund von Defekten nicht erneuert werden müssen) die zeitintensive Abstandsmessung deutlich abkürzen und somit vereinfachen. Bei Erneuerung von LEDs würde sich dieser Aufwand wiederum auf zumindest die einmalige Durchführung der kompletten Abstandsmessung beschränken.

Eine weitere mögliche Vereinfachung und Erweiterung der Methode wäre die Verwendung einer kontinuierlichen Lichtquelle. Hierfür steht bereits eine Lichtquelle mit einem Spektrum zwischen 450 nm und 800 nm zur Verfügung, welche jedoch stark inhomogen ist. Mit dieser Lichtquelle wird versucht, den optischen Aufbau zu betreiben, bzw. diesen so umzubauen, dass auch hiermit ein homogener Lichtspot erzeugt wird. Nachdem dies umgesetzt worden ist, wird über die Neuanschaffung einer speziellen Xenon-Lichtquelle für wissenschaftliche Zwecke, welche ein kontinuierliches Spektrum zwischen 250 nm und 1100 nm aufweist, nachgedacht.

Literatur

- [1] *NICHIA Corporation, Specifications for Blue LED NCSB119T.*
- [2] *NICHIA Corporation, Specifications for Bluish-Green LED NCSE119AT.*
- [3] *NICHIA Corporation, Specifications for UV LED NCSU275.*
- [4] *OSRAM Opto Semiconductors GmbH & Co. OHG, Spezifikationen zur Silizium-PIN-Fotodiode mit erhöhter Blauempfindlichkeit BPW34BS, 24.01.2002.*
- [5] *Seoul Semiconductors, Specifications for UV LED P8D236.*
- [6] *sglux GmbH, Spezifikationen für SG01S-18 UV Photodiode.*
- [7] Cherenkov Telescope Array. Web, www.cta-observatory.org, abgerufen am 15. Juli 2014.
- [8] Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden. Web, www.htw-mechlab.de, abgerufen am 02. August 2014.
- [9] LOT-QuantumDesign GmbH. *Integrating Spheres - Introduction.* Web, abgerufen am 18. Juli 2014.
- [10] Ocean Optics. *JAZ Installation and Operation Manual, Document Number: 013-RD000-000-02-201009, Seite 43-45.* Manual, 2010.
- [11] Lumitronix High Performance LED-Technologies & Solutions. Web, www.leds.de, abgerufen am 17. Juli 2014.
- [12] A. Wörlein. *Methods to measure optical properties of mirror facets for CTA.* Diplomarbeit, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, 2010.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Personen, die zum erfolgreichen Zustandekommen dieser Arbeit beigetragen haben, herzlich danken.

Besonderer Dank gilt hierbei Herrn Prof. Dr. Christopher van Eldik für die Bereitstellung des Arbeitsthemas und stets vorhandenem Optimismus, die zeitlichen Fristen dennoch einhalten zu können.

Vielen Dank auch an meine beiden Betreuer Friedrich Stinzing und André Wörlein, für viele unterstützende Diskussionsrunden und eine helfende Hand, wo immer diese benötigt wurde.

Besonderer Dank gilt auch allen Korrekturlesern dieser Arbeit, die mit zahlreichen Kommentaren und Vorschlägen zur Optimierung beigetragen haben.

Herzlicher Dank auch an alle Bürokollegen, die mit vielerlei schnell zugänglichem Wissen und Erfahrungswerten einen ebenso wichtigen Beitrag geleistet haben.

Danke auch an meine Freundin, die nicht nachlässig wurde mich stets zu motivieren und das Unterfangen voranzutreiben.

Persönliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die Arbeit selbstständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

Erlangen, 05.08.2014

Mattias Tschiesche