

Dissertation

Kerstin Maria Schwind

Realisierung der metrologischen Rückführung auf das internationale Einheitensystem (SI) für bodengestützte radiometrische Messungen im Fernerkundungsnetzwerk AERONET Europe

ISSN 2941-1297
ISBN 978-3-944659-63-3

DOI 10.7795/110.20260506

Genauigkeit | Objektivität | Leidenschaft

www.ptb.de

Kerstin Maria Schwind

Realisierung der metrologischen Rückführung auf das internationale Einheitensystem (SI) für bodengestützte radiometrische Messungen im Fernerkundungsnetzwerk AERONET Europe

Dissertation

PTB-Diss- 31

Braunschweig, 15. Mai 2026

ISSN 2751-6598

ISBN 978-3-944659-63-3

DOI 10.7795/110.20260506

Empfohlene Zitierweise/recommended citation

Schwind, Kerstin Maria, 2026. *Realisierung der metrologischen Rückführung auf das internationale Einheitensystem (SI) für bodengestützte radiometrische Messungen im Fernerkundungsnetzwerk AERONET Europe*, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt. PTB-Bericht Diss-31. ISBN 978-3-944659-63-3. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.7795/110.20260506>

Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
ISNI: 0000 0001 2186 1887

Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Telefon: (05 31) 592-93 21
Telefax: (05 31) 592-92 92
www.ptb.de

Realisierung der metrologischen Rückführung auf das internationale Einheitensystem (SI) für bodengestützte radiometrische Messungen im Fernerkundungsnetzwerk AERONET Europe

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades einer Doktorin
der Naturwissenschaften (Dr.rer.nat.)
genehmigte Dissertation

von Kerstin Maria Schwind
aus Langenfeld (Rhld.)

Eingereicht am: 26.01.2026

Disputation am: 30.04.2026

1.Referent: Prof. Dr. S. Kück

2.Referent: Prof. Dr. A. Hangleiter

Druckjahr: 2026

**Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig, Fakultät für
Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik**

Liste der Publikationen

Teilergebnisse dieser Arbeit wurden in folgenden Beiträgen vorab veröffentlicht:

1. N. Kouremeti, S. Nevas, S. Kazadzis, J. Gröbner, P. Schneider and K.M. Schwind, *SI-traceable solar irradiance measurements for aerosol optical depth retrieval*, *Metrologia* **59**, 2022
2. J. Gröbner, N. Kouremeti, G. Hülsen, R. Zuber, M. Ribnitzky, S. Nevas, P. Sperfeld, K.M. Schwind, P. Schneider, S. Kazadzis, A. Barreto, T. Gardiner, K. Mottungan, D. Medland, and M. Coleman, *Spectral aerosol optical depth from SI-traceable spectral solar irradiance measurements*, *Atmospheric Measurement Techniques* **16**, 2023
3. M. Campanelli, V. Estelles, G. Kumar, T. Nakajima, M. Momoi, J. Gröbner, S. Kazadzis, N.Kouremeti, A. Karanikolas, A. Barreto, S. Nevas, K.M. Schwind, P. Schneider, I. Harju, P. Kärhä, H. Diemoz, R. Kudo, A. Uchiyama, A. Yamazaki, A. M. Iannarelli, G. Mevi, A. Di Bernardino, S. Casadio, *Evaluation of “on site” calibration procedures for sun-sky photometers*, *Atmospheric Measurement Techniques* (Preprint), 2023
4. K.M. Schwind, P. Schneider and S.Nevas *Spectrally-resolved temperature dependencies of an AERONET sun photometer*, Conference: Radiation Processes in the Atmosphere and Ocean **2988**, 2024
5. K.M. Schwind, S. Nevas, S.Pendsa and P. Schneider, *A portable LED-based source for monitoring spectral responsivity changes of the AERONET Europe radiometers*, Conference: Radiation Processes in the Atmosphere and Ocean **2988**, 2024
6. S.Nevas, K.M. Schwind and P.Schneider, *Tuneable laser-based calibration of filter radiometers from surface-based aerosol monitoring networks in Europe*, Conference: Radiation Processes in the Atmosphere and Ocean **2988**, 2024
7. K.M. Schwind, S.Nevas, P.Sperfeld, S.Pape, *Characterisation of an LED-based integrating sphere source for detection of changes of AERONET Europe radiometers*, Proceedings of NEWRAD 2023, 2024

Kurzfassung

Aerosole beeinflussen in ihrer Zusammensetzung und ihren physikalischen Eigenschaften das Verhalten der Atmosphäre und das Klima. Die vorhandenen Aerosole werden auf natürliche Weise in die Erdatmosphäre emittiert oder aus gasförmigen Substanzen gebildet. Aerosolpartikel weisen räumlich und zeitlich große Inhomogenitäten auf und können daher nicht als eine konstante Größe angenommen werden. Somit spielen sie auch für die Klimamodellierung eine entscheidende Rolle, ihre Eigenschaften wurden vom Global Climate Observing System (kurz: *GCOS*) als essentielle Variablen (engl. *Essential Climate Variables*, kurz: *ECV*) festgelegt. Diese bilden die empirische Grundlage die Veränderungen des Klimas zu verstehen und vorherzusagen. Die Aerosole werden in ihrer Größe, ihrer Zusammensetzung und ihrer Konzentration sowohl von natürlichen Faktoren wie geographischer Breite und Meeresentfernung, als auch von anthropogenen, also durch Menschen hervorgerufene Faktoren, wie der Emission von Treibhausgasen, beeinflusst und über die Zeit verändert. Globale Klimabeobachtungen erfordern kontrollierte und standardisierte Datensätze aus globalen Überwachungsnetzwerken der aerosoloptischen Eigenschaften, die zur Vergleichbarkeit auf die SI-Einheiten zurückgeführt werden müssen.

Eines der größten Aerosolüberwachungsnetzwerke ist das *AEROSOL ROBOTIC NETWORK* (kurz: *AERONET*), ein Netzwerk von bodenbasierten schmalbandigen Radiometern zur Messung von atmosphärischen Aerosoleigenschaften. Innerhalb des Netzwerks werden Kalibrierungen an sogenannten „Master-Instrumenten“ durchgeführt, um sie folgend auf die Feld-Instrumente zu übertragen. Diese Art der Kalibrierung ist nicht SI-rückgeführt und liefert somit nur relative Vergleichbarkeit. Eine weitere Herausforderung ist dabei der hohe logistische Aufwand, da die „Master-Radiometer“ in regelmäßigen Abständen an nur wenigen geeigneten Orten in Höhenlagen wie Mauna Loa (Hawaii) und Izaña (Teneriffa) kalibriert werden müssen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, neue Kalibrierverfahren sowie neuartige Strahlernormale für die Kalibrierung der *AERONET*-Radiometer zu entwickeln, um die Rückführung der Messungen der optischen Eigenschaften von Aerosolen auf SI-Einheiten zu ermöglichen. Durch die Rückführung auf SI eröffnet sich zudem die Möglichkeit, verschiedene Aerosolüberwachungsnetzwerke und verschiedene Radiometertypen zu vergleichen. Die spektralen Kanäle der *AERONET*-Radiometer können bzgl. ihrer Empfindlichkeiten entweder im Bestrahlungsstärke- oder Strahldichtemodus, spektral aufgelöst oder mittels breitbandiger Strahlernormale auf die integralen Werte im Labor kalibriert werden.

Weiterführend wurde eine LED-basierte Strahldichtequelle konzipiert und charakterisiert. Diese Quelle wurde abschließend absolut kalibriert und wird in einem der *AERONET*-Kalibrierlabore auf Tauglichkeit getestet.

Abstract

The composition and physical properties of aerosols influence the behavior of the atmosphere and the climate. The aerosols are emitted naturally into the earth's atmosphere or formed from gaseous substances. Aerosol particles exhibit large spatial and temporal inhomogeneities and therefore can not be assumed to be a constant quantity. Therefore, they also play a role in climate modeling, and their properties were determined by the Global Climate Observing System (short: *GCOS*) as essential climate variables (short: *ECV*). The aerosols change in size, composition and concentration over time, but little is known about the exact processes. Therefore the properties of these aerosols and the consequences of their changes need to be investigated in more detail. Global climate observations require controlled and standardized data sets of aerosol optical properties from global monitoring networks, which must be traceable to the SI units. The measurements from the networks can be used to determine the aerosol optical properties.

One of the largest aerosol monitoring networks is the AErosol RObotic NETwork (short: *AERONET*). This is a network of ground-based narrow-band radiometers, also known as „sun photometers“, to measure atmospheric aerosol properties. Within this network several calibration stations carry out the calibration on so-called “master instruments”. This calibration will be transferred to the field instruments. This type of calibration is not SI-traceable and therefore provides only a relative comparability. A further challenge is the high logistical effort involved, as the calibration of the “master-radiometers” is only suitably possible on a few locations at altitudes such as Mauna-Loa (Hawaii) and Izaña (Tenerife).

The aim of this work is to develop new calibration procedures and new radiometer standards for the calibration of the AERONET radiometers, which can be used for the traceability of measurements to the international system of units. Traceability to the international system of units also provides the possibility to compare different aerosol monitoring networks, e. g. SKYNET and Global Atmosphere Watch (short: *GAW*) and different radiometer types. The channels of the AERONET radiometers can be spectrally resolved with regard to their sensitivities either in irradiance or radiance mode, spectrally resolved or calibrated to the integral values in the laboratory using broadband radiometer standards. For spectrally resolved calibration, the spectrally tunable laser-based setup “Tunable Laser in Photometry” (short: *TULIP*) was used. For the integral based calibration conventional lamp-based standards are available for integral calibrations. In addition, an LED-based radiance source was designed and characterized. This source was finally calibrated in absolute terms and will be used in one of the AERONET calibration laboratories.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	6
2. Rückführung in Aerosolüberwachungsnetzwerken und SI-rückgeführte Metrologie	9
3. Metrologische Rückführung auf das internationale Einheitensystem SI	14
3.1. Unsicherheit einer Messgröße	15
3.1.1. Radiometrische Kalibrierungen	16
4. Theoretische Grundlagen	20
4.1. Spektrale Bestrahlungsstärke	20
4.2. Strahldichte	22
4.3. Ulbricht-Kugel	23
4.3.1. Strahldichte eines Kugelstrahlers	24
4.3.2. Strahlungsaustausch innerhalb der Kugel	26
4.3.3. Kugelbeschichtungen	27
4.4. Light-Emitting Diodes (LED)	31
4.4.1. Bändermodell	31
4.4.2. pn-Übergang	32
4.4.3. LED Materialien	33
4.4.4. Abhängigkeit des LED-Spektrums von Strom und Temperatur	34
4.5. Messgeräte für spektral aufgelöste radiometrische Messungen	35
4.5.1. Spektralradiometer	35
4.5.2. Filtrerradiometer	36
4.5.3. Charakterisierung und Kalibrierung von Radiometern	37
4.6. AErosol RObotic NETwork	40
5. Charakterisierung des Cimel CE 318-T	45
5.1. Referenzebenen	45
5.1.1. Bestimmung der Referenzebenen über Variation des absoluten Abstands	46
5.1.2. Bestimmung der Referenzebenen über einen relativen Vergleich zu einem Trap-Detektor	49
5.2. Spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit	55
5.3. Field of View (<i>FOV</i>)	57
5.4. Temperaturkoeffizienten	62
5.5. Linearität	67

6. Laborkalibrierung und Rückführung auf das internationale Einheitensystem SI	70
6.1. Rückführung über Bestrahlungsstärkeempfindlichkeitskalibrierung	72
6.2. Strahldichteempfindlichkeitskalibrierung mit einer kalibrierten Strahldichtequelle	74
6.3. Strahldichteempfindlichkeitskalibrierung über ein Reflexionsnormal und eine Normallampe	77
6.4. Vergleich der Laborkalibrierungen des Cimel-Radiometers	83
7. Entwicklung und Charakterisierung einer LED-basierten Strahldichtequelle	85
7.1. Auswahl der LED	85
7.2. Design der LED-Quelle	89
7.2.1. Entwicklung der Schaltung basierend auf den Eigenschaften der LEDs	89
7.2.2. Temperaturstabilisierung der LED-Platine	89
7.2.3. Einbrennen der LEDs	90
7.2.4. Verschiebung der Centroidwellenlängen der LEDs bei Veränderung der Umgebungstemperatur	92
7.2.5. Einhausung	92
7.2.6. Gesamtspektrum der LED-Quelle	93
7.3. Auswahl der Ulbricht-Kugel	94
7.3.1. Verwendung der LED-Quelle mit einer BaSO ₄ -basierten Ulbricht-Kugel	95
7.3.2. Verwendung der LED-Quelle mit einer PTFE-basierten Kugel	99
7.4. Kompatibilitäts- und Stabilitätstest des LED-basierten Strahldichtenormals mit einem Cimel-Radiometer	102
7.5. Homogenität der der LED-basierten Strahldichtequelle	103
8. Absolutkalibrierung der LED-basierten Strahldichtequelle	108
8.1. Messaufbau für die Absolutkalibrierung	109
8.2. Messung der Strahldichte im Bestrahlungsstärkemode	110
9. Bestimmung der Strahldichteempfindlichkeit mit LED-basierter Strahldichtequelle	112
10. Diskussion der Ergebnisse der Kalibrierungsmethoden	117
11. Zusammenfassung	123
12. Ausblick	125
Anhang	127
A. Spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeiten des Cimel #1270	128
B. Anordnung der LEDs der LED-basierten Strahldichtequelle	132

C. Homogenität der der LED-basierten Strahldichtequelle	133
Literaturverzeichnis	137
Abbildungsverzeichnis	144
Abkürzungsverzeichnis	149
Danksagung	151
Erklärung	151

1. Einleitung

Die Sonnenstrahlung ist die Hauptenergiequelle für das System Erde-Atmosphäre und ist direkt oder indirekt für Phänomene verantwortlich, die sich auf die Meteorologie und Klimatologie dieses Systems auswirken. Die Veränderung einer beliebigen Komponente dieses Systems wirkt sich auf das Strahlungsgleichgewicht aus, was zum Beispiel in Veränderungen der Temperatur des Systems resultiert. Einen entscheidenden Faktor spielen dabei atmosphärische Aerosole.

Atmosphärische Aerosole beeinflussen das Klima durch Wechselwirkungen mit der Sonnenstrahlung und ihre Auswirkung auf die Wolkenbildung. Die Abschwächung der Sonnenstrahlung, die die Aerosolschicht durchdringt, wird durch die Aerosol Optische Dicke (kurz: *AOD*) beschrieben. Die Beobachtung der aerosoloptischen Eigenschaften ist erforderlich, um Veränderungen im Klimasystem der Erde beobachten zu können. Die Aerosole werden in ihrer Größe, ihrer Zusammensetzung und ihrer Konzentration sowohl von natürlichen Faktoren wie geographischer Breite und Meeresentfernung, als auch von anthropogenen, also durch Menschen hervorgerufene Faktoren, wie der Emission von Treibhausgasen, beeinflusst und über die Zeit verändert. Die Eigenschaften dieser Aerosole und die Folgen ihrer Veränderungen werden von weltweit agierenden Aerosolüberwachungsnetzwerken genauer untersucht.

Die *AOD* wird aus atmosphärischen Transmissionsmessungen bestimmt, wobei die Sonne als Strahlungsquelle dient. Die Messungen in globalen bodengestützten Aerosolüberwachungsnetzen sind auf Referenzgeräte (Artefakte) rückgeführt, die in Messgeräteeinheiten kalibriert wurden [1, 2, 3, 4]. Derzeit werden durch Aerosolüberwachungsnetzwerke hunderte Stationen mit komplexen Kalibrierungsstrategien auf der Grundlage von Artefakt-Referenzgeräten betrieben. Das Fehlen einer auf das internationale Einheitensystem SI rückgeführten Kalibrierung macht das Überwachungskonzept sehr kompliziert und zeitaufwendig, zudem sind die Kalibrierungen zwischen den verschiedenen Netzwerken nicht harmonisiert.

Das derzeitige Kalibrierverfahren der Referenzgeräte, auch Master-Instrumente genannt, basiert auf einer Außenmessung, bei der die direkte solare spektrale Bestrahlungsstärke im Tagesverlauf bei verschiedenen Zenitwinkeln gemessen wird, um das Signal des Geräts oberhalb der Atmosphäre zu erhalten. Dafür müssen perfekte Wetterbedingungen, d. h. ein über mehrere Stunden wolkenfreier Himmel, herrschen. Diese Methode benötigt lange Kalibrierzeiten. Die Kalibrierung der Referenzradiometern des *AErosol RObotic NETwork*

(kurz: *AERONET*), wurde weltweit bislang an zwei Stationen durchgeführt, Mauna Loa (Hawaii) und Izaña (Teneriffa). Diese Methode wird in Kapitel 2 erläutert.

Die Übertragung der Kalibrierung der Referenzradiometer auf die Feldradiometer erfolgt in den Kalibrierlaboren des Netzwerks basierend auf direkter Substitution, wobei ein breitbandiger, großflächiger Strahler, realisiert durch eine Ulbricht-Kugel mit Halogenlampen, verwendet wird.

Ulbricht-Kugeln basierte Kalibriernormale bieten ein vergleichsweise einfaches Werkzeug zur rückgeführten Strahldichtekalibrierung an. Ulbricht-Kugeln, ihre Funktionsweise und die Anwendung werden in Abschnitt 4.3 beschrieben und diskutiert. Da die Methodik der Strahldichtemessungen mit Hilfe von Ulbricht-Kugeln bereits im Kalibrierverfahren des *AERONET* etabliert ist und Glühlampen nicht mehr allzu lange erhältlich sind, wird im Zuge dieser Dissertation eine LED-basierte Quelle entwickelt, die im französischen Kalibrierlabor *PHOTONS*, Lille, getestet werden soll. Diese LED-Quelle ist an eine Ulbricht-Kugel anflanschbar, da für die Anwendung eine Strahldichtequelle benötigt wird. Die Entwicklung der Quelle wird in Kapitel 7 beschrieben.

Bezüglich der Ulbricht-Kugeln wird weiterhin auf verschiedene Beschichtungsmaterialien eingegangen, vgl. Kapitel 4.3.3. Die bisher verwendeten Ulbricht-Kugeln der Kalibrierlabore sind meist BaSO_4 -basiert, da diese in Verbindung mit Glühlampen als Strahlungsquelle eine hohe Stabilität gewährleisten und das benötigte Spektrum abdecken. Die zunehmende Umstellung von Glühlampen hin zu Leuchtmitteln, die auf lichtemittierende Dioden basieren, stellt in diesem Zusammenhang eine Herausforderung dar, da zum einen eine geringere Strahldichte zu erwarten ist, andererseits bestehende Messsysteme ein anderes Verhalten bei der Verwendung von LEDs aufzeigen.

Diese Arbeit ist im Rahmen eines Projektes entstanden, dessen Ziel darin bestand, die SI-rückführbaren Messungen der optischen Eigenschaften von Aerosolen zu ermöglichen, die aus der passiven Fernerkundung der Atmosphäre unter Verwendung von Sonnen- und Mondstrahlungsmessungen gewonnen werden können.

Ein erweitertes Ziel der Netzwerke ist der Vergleich der verschiedenen Kalibrierkonzepte in den verschiedenen Netzwerken. Verschiedene Netzwerke haben sich auf verschiedene Gerätetypen innerhalb des Netzwerks festgelegt, die jedes für sich eine Kalibrierstrategie im Sinne der Weltorganisation für Meteorologie (engl. *World Meteorological Organization*, kurz: *WMO*) besitzen muss. Diese Strategien beruhen jedoch zumeist auf der Rückführung eines Referenzgeräts innerhalb eines Netzwerkes, für einen Vergleich zwischen verschiedenen Netzwerken und Geräten ist jedoch eine vom Gerätetyp unabhängige Kalibrierung elementar.

Das Projekt „Metrology for aerosol optical properties“ (kurz: *MAPP*), im Rahmen dessen diese Arbeit entstanden ist, diente in Folge der Validierung und Homogenisierung der

momentanen Ableitungen der optischen Eigenschaften von Aerosolen. Radiometer der Aerosolüberwachungsnetzwerke wurden von Nationalen Metrologieinstituten (*kurz: NMI*) im Labor kalibriert und tragbare Geräte für die Vor-Ort-Kalibrierung entwickelt.

Die Möglichkeit der SI-rückgeführten Ermittlung der optischen Eigenschaften von Aerosolen soll gegeben werden, die Ausfallzeiten der Radiometer des Netzes sollen verringert und ihre konstante Weitergabe einschließlich ihrer Unsicherheit gewährleistet werden. Dazu werden unterschiedliche Möglichkeiten für eine radiometrische Rückführung basierend auf Watt (W) und Meter (m) vorgestellt.

Die Kalibrierung mit der Rückführung auf das internationale Einheitensystem SI erfordert, das verwendete AERONET-Radiometer, das sowohl Strahldichte- als auch Bestrahlungsstärkemessungen durchführen kann, bezüglich aller relevanten Geräteeigenschaften zu charakterisieren und bzgl. radiometrischer Messgrößen zu kalibrieren. Die umfangreiche Charakterisierung erfolgt mit Hilfe unterschiedlicher Messmethoden an etablierten Aufbauten, um alle signifikanten Größen zu bestimmen. Diese Methoden basieren zum Beispiel auf einem durchstimmbaren Lasersystem, Lampen und einer Photometerbank. Ebenso erfolgt eine Charakterisierung bzgl. Temperaturabhängigkeit in einer Klimakammer gemäß AERONET Protokoll [5]. Verwendet werden jedoch auch Aufbauten, die für den Zweck einzelner Charakterisierungen realisiert wurden. Diese Aufbauten zeigen, dass es möglich ist, eine Rückführung auf SI in Aerosolüberwachungsnetzwerken zu etablieren. Die Charakterisierung wird in Kapitel 5 exemplarisch an einem Gerät des AERONET beschrieben und diskutiert. Für die spätere Rückführung und Entwicklung einer LED-basierten Quelle sind dabei die Referenzebenen des Radiometers, die Bandpassempfindlichkeiten, das Sichtfeld, sowie das Verhalten bei Änderungen der Umgebungstemperatur von Bedeutung.

Basierend auf der Charakterisierung des Radiometers werden verschiedene Arten der Rückführung in Kapitel 6 aufgezeigt und diskutiert. Diese Rückführungen führen zum einen über die Bestrahlungsstärke, zum anderen über die Strahldichte. Während sich die Strahldichte über eine optische Abbildung der Projektion eines Strahlerausschnittes auf einen Empfänger definiert, lässt sich die Bestrahlungsstärke auf eine Messung der Bestrahlung einer definierten Fläche zurückführen, vgl. Kapitel 3. Dies setzt jedoch die genaue Kenntnis der spektralen Empfindlichkeit des Empfängers voraus.

Zunächst, in Kapitel 2, soll jedoch auf Grundbegriffe und verwendete Komponenten und Methodiken eingegangen werden, sowie ein Überblick über Rückführung und Methodik in der Metrologie gegeben werden.

2. Rückführung in Aerosolüberwachungsnetzwerken und SI-rückgeführte Metrologie

In diesem Kapitel soll ein Überblick über die Grundbegriffe der Metrologie und den aktuellen Stand der metrologischen Rückführung im AERONET gegeben werden. Dies dient der thematischen Einordnung und zur Erläuterung der Vorgehensweise, welche für die Rückführung des AERONET auf das Internationale Einheitensystem SI geeignet wäre. Zunächst wird in diesem Kapitel auf den jetzigen Stand der metrologischen Kalibrierungen der AERONET-Radiometer eingegangen. Folgend wird in Kapitel 3 die Systematik der SI-rückgeführten Metrologie vorgestellt, relevante radiometrische Einheiten erläutert und die praktische Realisierung vorgestellt, speziell in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (kurz: *PTB*). Abschließend soll eine Verbindung der beiden Rückführungsstrategien hergestellt werden, in dem die Kalibrierung der AERONET-Radiometer an die Realisierung der Einheiten angeknüpft werden kann.

Ein Hauptteil dieser Arbeit wird sich mit der metrologischen Rückführung der Radiometer beschäftigen, die im Aerosolüberwachungsnetzwerk AERONET verwendet werden. Die Kalibrierungen innerhalb dieses Netzwerkes basieren auf relativen Vergleichen und sind zum aktuellen Stand nicht auf das internationale Einheitensystem rückgeführt.

Anforderungen der WMO (Weltorganisation für Meteorologie)

Die WMO hat unter anderem zur Aufgabe, die weltweite Kooperation von Netzwerken für meteorologische Beobachtungen zu unterstützen. Eine Kernaufgabe besteht dabei, die Standardisierung von meteorologischen und verwandten Beobachtungen zu fördern und eine einheitliche Veröffentlichung von Beobachtungen und Statistiken zu sichern. Der Verbesserung und Qualität der räumlichen Abdeckung der Messungen wurde hohe Priorität eingeräumt, die im Rahmen des Aerosolmessprogramms Global Atmospheric Watch (kurz: *GAW*) umgesetzt werden. Dieses umfasst nicht nur klimabezogene, sondern auch Luftqualitätsmessungen. Ziel des Programms ist es langfristige Messungen durchzuführen, um Trends der globalen Verteilung chemischer Bestandteile der Luft und deren Gründe dafür zu ermitteln [6]. Im Bezug auf Aerosole besteht das Ziel darin, die räumliche und zeitliche Verteilung der Aerosoleigenschaften, die mit dem Klimaantrieb und der Luftqualität zusammenhängen, über mehrere Jahrzehnte sowie auf regionalen Skalen zu bestimmen. Dadurch werden die Kenntnisse über die Auswirkungen von Aerosolen auf das Klima sowie die Techniken zur Bestimmung der wesentlichen Aerosolvariablen (englisch: Essential Climate Variables, kurz: *ECV*), die an bodengestützten Standorten zu überwachen sind, erheblich weiterentwickelt.

Für die Mitgliedschaft eines Netzwerkes in der WMO werden Bedingungen gestellt. Die wichtigsten Anforderungen an die verwendeten Instrumente sind unter anderem [7]:

- Angabe von Messunsicherheiten
- Verlässlichkeit und Stabilität
- Transparenz bei Betrieb, Kalibrierung und Wartung

Bezüglich der Kalibrierung der verwendeten Netzwerkgeräte stellt die WMO die Anforderung, dass die Mitgliedsnetzwerke sicherstellen, dass die Messsysteme und -geräte regelmäßig in Übereinstimmung mit angemessenen Verfahren für jeden System- und Instrumententyp kalibriert werden. Im Handbuch über das integrierte globale Beobachtungssystem der WMO werden die Bedingungen für die Verwendung der Netzwerkgeräte beschrieben [8]. Ausführliche Anleitungen zu Kalibrierungsverfahren sind im Leitfaden für meteorologische Instrumente und Beobachtungsmethoden (WMO-Nr. 8) zu finden [9].

Kalibrierung und Prüfung sind fester Bestandteil des Qualitätssicherungsprogramms der WMO. Kalibrierungs- und Prüfprogramme sollen standardisiert werden, unter Berücksichtigung der zu erwartenden Klimaschwankungen, Umwelt- und elektromagnetischen Störungen, unter denen die Systeme und Sensoren arbeiten sollen. Die Mitgliedsorganisation kann Kalibrier- und Prüfdienste von privaten Laboratorien beziehen oder eigene Kalibrierstationen gründen, so wie es im AERONET der Fall ist.

Speziell für die Bestimmung der Aerosole gibt die WMO Empfehlungen für die Messungen in den Netzwerken. Die AOD ist die umfassendste Variable zur Bewertung der gesamten Aerosolbelastung der Atmosphäre, sie ist ein Maß für die Lichtabsorption und -streuung durch Aerosolpartikel in der Atmosphäre. Die AOD ist für das Verständnis des Klimas wichtig, da Aerosole die Energiebalance der Erde beeinflussen. Die bodengestützte Observation der AOD kann aus kleinsten Änderungen der gerichteten Sonnenreflexion vor einem i. d. R. unzureichend definierten Hintergrund (Oberflächenreflexion der Atmosphäre) bestimmt werden.

Die AOD steht in direktem Zusammenhang mit der subspektralen Transmission der Sonne in der Atmosphäre. Das Gerätesignal V bei einer bestimmten Wellenlänge kann ausgedrückt werden als $V = V_0 \exp(-m\delta) = V_0 \exp(-\delta/\cos(\Theta))$, wobei V_0 die extraterrestrische (d. h. die in der obersten Schicht der Atmosphäre vorliegende) spektrale Bestrahlungsstärke der Sonne, die durch Ort und Zeit definiert ist, δ die (vertikal normierte) optische Tiefe und m den optischen Luftmassenfaktor beschreibt. Bei Sonnenhöhen größer als 10° über dem Horizont ist m durch $1/\cos(\Theta)$ definiert, wobei Θ der Zenitwinkel der Sonne ist. Wenn es keine atmosphärische Streuung (Luftmoleküle, Wolken) und/oder Absorption (Spurengase, Wolken) in dem gewählten spektralen Bereich der Sonne gibt, so ist $\delta = AOD$. Somit sind die solaren subspektralen Bereiche für AOD-Messungen bevorzugt, in denen die Wechselwirkungen mit Aerosolstrahlung vernachlässigt werden können oder leicht zu quantifizieren sind (z. B. Streuung an Luftmolekülen, allgemein als Rayleigh-Streuung

bezeichnet) [6]. Die meisten Radiometer für die Bestimmung der AOD werden anhand ihres extraterrestrischen Wertes V_0 kalibriert, d. h. dem Wert, den sie am oberen Ende der Atmosphäre messen würden.

Umsetzung der Kriterien in AERONET

Das AERONET betreibt Referenzinstrumente, sogenannte Master-Instrumente, die auf hochgelegenen Kalibrierstationen gegen die Sonne als Strahlungsquelle mit der Langley-Methode vermessen werden. Gemessen wird die direkte Bestrahlungsstärke der Sonne, somit eine Messung im Bestrahlungsstärkemode. Diese wird folgend mit Hilfe einer Strahldichtequelle als Relativmessung auf die Feld-Instrumente übertragen. Diese Methode wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

Strahldichte und Bestrahlungsstärke sind die beiden grundlegenden Größen bei Fernerkundungsanwendungen. Während der Messungen mit Netzwerkgeräten wird die direkte Sonneneinstrahlung im Bestrahlungsstärkemode gemessen, um beispielsweise auf die AOD schließen zu können. Es wird aber auch die Himmelsstrahlung im Strahldichtemode vermessen. Diese Messungen im Strahldichtemode werden unmittelbar nach einer Direktmessung der Sonne durchgeführt, um die Stabilität der Langley-Methode nach *O'Neill und Miller* zu bewerten [10]. Der Hintergrund für diese beiden Messmodi besteht darin, Aureolen- und Himmelsstrahlungsbeobachtungen über einen großen Bereich von Streuwinkeln von der Sonne durch ein konstantes Aerosolprofil zu erfassen, um die Größenverteilung, die Phasenfunktion und die Aerosol Optische Dicke zu erhalten [5].

In AERONET wird die Langley-Methode auch angewendet, um die Master-Instrumente zu kalibrieren. Die Kalibrierstationen für die Master-Instrumente werden als „primary calibration sites“ bezeichnet, sie befinden sich auf Mauna Loa (Hawaii) und Izaña (Teneriffa).

Langley-Plot-Methode

Die Langley-Methode (oder: Langley-Extrapolation) ist eine Methode zur Messung der Strahlungsintensität der Sonne mit bodengestützten Instrumenten, bei der der Einfluss der Atmosphäre eliminiert wird [11, 12]. Sie basiert auf wiederholten Messungen mit einem Aerosolüberwachungsnetzwerk radiometer, das an einem bestimmten Ort an einem wolkenlosen Morgen oder Nachmittag betrieben wird. Die Methode basiert auf dem Bouguer–Lambert–Beer-Gesetz [13], welches besagt, dass jede Momentanmessung der direkten Sonnenbestrahlungsstärke V mit der solaren extraterrestrischen Bestrahlungsstärke V_0 und der atmosphärischen optischen Tiefe τ verbunden ist durch:

$$\frac{V}{V_0} = e^{-m\tau} \quad (2.1)$$

wobei m die Luftmasse (engl.: *air mass*) ist, auch „Luftmassenfaktor“ genannt. Für eine planparallele Atmosphäre kann der Luftmassenfaktor über den Zenitwinkel Θ der Sonne bestimmt werden mit $m = 1/\cos(\Theta)$, siehe Abbildung 2.1.

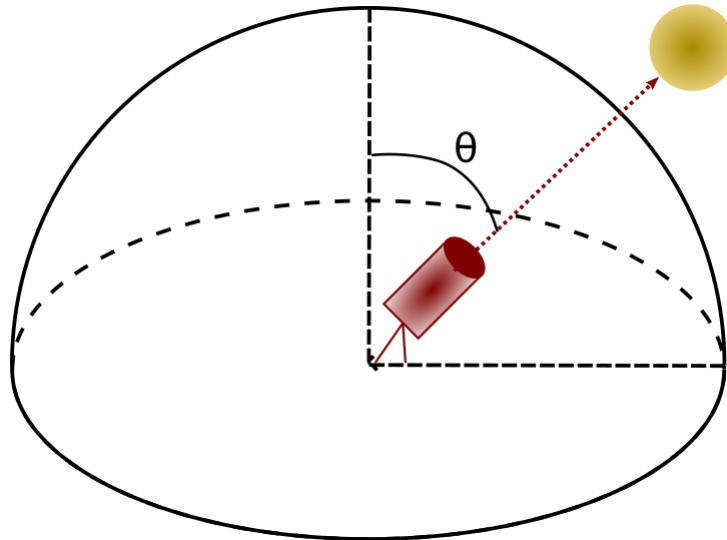


Abbildung 2.1.: Messung in verschiedenen Zenitwinkeln Θ über den Tag verteilt.

Dieser Winkel ändert sich jedoch mit der Zeit und somit auch der Faktor m . Wird der Logarithmus auf Gleichung 2.1 angewendet, folgt:

$$\ln(V) = \ln(V_0) - m\tau \quad (2.2)$$

Es wird davon ausgegangen, dass sich die atmosphärische Störung τ während der Beobachtung nicht ändert, d. h. es wird von stabilen atmosphärischen Bedingungen ausgegangen um die Top-of-Atmosphere-Bestrahlungsstärke (kurz: *ToA*) mit Hilfe dieser Methode zu bestimmen. Aus linearer Extrapolation auf $m = 0$ folgt V_0 , d. h. die Strahlungsintensität der Sonne, die von einem Instrument am oberen Rand der Atmosphäre beobachtet werden würde.

Diese Methode hat jedoch einige Nachteile. Es wird davon ausgegangen, dass stabile Wetterbedingungen herrschen. In der Realität variiert die Atmosphäre während der Kalibrierung zufällig. Unterschieden wird dabei zwischen systematischen Schwankungen, z. B. Ozon oder Absorption oder auch zufälligen Variationen wie Luftströmungen, Windbewegungen oder Wetterphänomenen wie dem Saharawind. Daher wird ein statistischer Ansatz für Korrekturen angewendet, siehe *Toledano et al.* [3].

Systematische atmosphärische Schwankungen, wie z. B. im ultravioletten Bereich aufgrund von ozonbedingten photochemischen Effekten, würden unter der Annahme stabiler Bedingungen unbemerkt bleiben und könnten das Ergebnis verfälschen [14, 15]. Darüber hinaus ist die Veränderung des Instruments während des Kalibrierzeitraums nur schwer zu dokumentieren. Zudem hat sich gezeigt, dass die Null-Massen-Extrapolation bei Spektral-

bereichen mit gesättigten Spurengasabsorptionen, wie z. B. in den Wasserdampfbereichen um 930 nm, unzureichend genau ist [16].

Für die Übertragungen auf die Netzwerkgeräte werden homogene und großflächige Strahler benötigt, was durch auf SI-kalibrierte Ulbricht-Kugeln mit Lampen gewährleistet wird. Die Strategie der Kalibrierung beruht auf relativen Vergleichen der Geräte in counts (cts).

Da Aerosole in der Regel in geringer Höhe konzentrierter sind, wird die Langley-Methode häufig in Hochgebirgsregionen durchgeführt. Die messtechnische Rückführbarkeit der Referenzradiometer der Kalibrierung wird anhand der Redundanz der Geräte und unter Annahmen der Instrumentstabilität gewährleistet.

Die Bestrahlungsstärkemessungen der Radiometer sind nicht auf SI zurückgeführt, somit können die Messungen der solaren Bestrahlungsstärke nicht für Vergleiche zwischen unterschiedlichen Instrumenten der unterschiedlichen Netzwerke verwendet werden. Die Kalibrierung und Messung mit Hilfe der Langley-Methode zur Kalibrierung oder Bestimmung der AOD ist jedoch nicht Teil dieser Arbeit und wird nicht weiter untersucht.

3. Metrologische Rückführung auf das internationale Einheitensystem SI

Metrologie ist die Wissenschaft des Messens. Wie im Internationalen Wörterbuch der Metrologie (kurz: *VIM*, franz.: *Vocabulaire international de métrologie*) beschrieben umfasst die Metrologie alle theoretischen und praktischen Aspekte des Messens, die Bereiche der Anwendung und der Messunsicherheit [17]. Um ein einheitliches Einheitensystem zu schaffen, ist 1960 das internationale Einheitensystem, (kurz: *SI*, franz.: *Système international d'unités*) eingeführt worden [18]. Die Größen des SI werden auf nationaler Ebene realisiert, dargestellt und weitergegeben. Der Wert einer Größe wird im Allgemeinen aus einer Zahl und einer Einheit beschrieben. In Deutschland ist dies die gesetzliche Aufgabe der PTB, gesetzlich geregelt durch das Einheiten- und Zeitgesetz [19]. Durch internationale Vergleichsmessungen wird sichergestellt, dass sich die verschiedenen primären Realisierungen ähnlich genug sind und dass von einem einheitlichen Einheitensystem gesprochen werden kann.

Um beliebige physikalische Eigenschaften von Objekten einheitlich zu beschreiben, bilden sieben Basisgrößen und die dazugehörigen Einheiten die Basis des SI. Diese sind Meter (m), Kilogramm (kg), Sekunde (s), Ampere (A), Kelvin (K), Mol (mol) und Candela (cd). Alle weiteren Größen im SI sind aus den sieben Basisgrößen abgeleitet. Diese lassen sich als Produkt der sieben Basiseinheiten und der dimensional Exponenten α bis μ schreiben:

$$Y = \text{m}^\alpha \text{kg}^\beta \text{s}^\gamma \text{A}^\delta \text{K}^\epsilon \text{mol}^\zeta \text{cd}^\mu \quad (3.1)$$

Über die Definitionen der Basiseinheiten wird den Einheiten ein Referenzwert zugeordnet. Zu den Aufgaben der PTB gehört u. a. [20]:

- Darstellung und Weitergabe der gesetzlichen Einheiten
- Konformitätsbewertungen entsprechend nationalem und europäischem Recht, z. B. von Messgeräten
- Wissenschaftlich-technische Dienstleistungen und Weiterentwicklung von Messtechnik

Die PTB betreibt ein Qualitätsmanagementsystem nach internationalem Standard und sichert so die internationale Anerkennung der von ihr ausgestellten Kalibrierscheine, Konformitätsbewertungen und anderer metrologischer Ergebnisberichte [21].

Mehrere aufeinander aufbauende Kalibrierungen unterschiedlicher Messobjekte oder Messsysteme werden als Kalibrierkette bezeichnet. Diese Schritte müssen eine ununterbrochene Kette von Vergleichsmessungen bilden, um als rückführbar beschrieben zu werden. Dieses

erste Bezugsnormal wird in der Metrologie als Primärnormal bezeichnet. Eine Kalibrierung beabsichtigt die Herstellung eines Zusammenhangs zwischen der Messung der Eigenschaften eines Messobjekts und dessen Messwerten inklusive der Unsicherheiten. Sie kann aus einem Vergleich von zwei Messobjekten bestehen, wobei die relevante Eigenschaft eines der Objekte bekannt sein muss. Solch ein Messobjekt wird in der Metrologie als Normal bezeichnet. Ein anderer Weg der Kalibrierung kann über ein bekanntes Messsystem erfolgen, wodurch dem Messobjekt ein Wert und eine Messunsicherheit zugeordnet werden kann. In dem Fall wird das bekannte Messsystem als Normal bezeichnet. Bei einer Kalibrierung wird jeweils ein Messgerät mit einem Normal verglichen, dessen Charakterisierung durch einen Vergleich mit einem höherrangigen Normal ermittelt wurde. Auf diese Weise entsteht eine Hierarchie der Prüfmittel. Die Messunsicherheiten beschreiben bildlich gesehen, die Entfernung zum Primärnormal, welches ebenso mit einer Unsicherheit behaftet ist. Die Unsicherheiten bilden die Glieder der „Kette“ und stellen so eine Verbindung zu den primären Darstellungen der Si-Einheiten her. Je mehr Normale zwischen dem Primärnormal und dem zu messenden Objekt liegen, umso größer ist die Messunsicherheit.

Für die einheitliche Bestimmung und Angabe einer Unsicherheit wurde vom Internationalen Komitee für Maß und Gewicht (kurz: *CIPM*, franz.: *comité international des poids et mesures*) und das Internationale Büro für Maß und Gewicht (kurz: *BIPM*, franz.: *bureau international des poids et mesures*) ein Leitfadens veröffentlicht. Dieser „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ (kurz: *GUM*) wurde erstmals 1995 veröffentlicht [22]. Die Ziele des GUM sind einheitliche, nachvollziehbare Unsicherheitsangaben, die transparentere Vergleichbarkeit von Messergebnissen und die wissenschaftlich fundierte Unsicherheitsanalyse.

3.1. Unsicherheit einer Messgröße

Gemäß des GUM wird der Einfluss von Messunsicherheiten auf eine Messung von Eingangs- und Messgrößen untersucht, um einen Schätzwert für den Messwert und eine zugehörige Unsicherheit zu berechnen. Für die Berechnung der Unsicherheiten ist das Bilden eines Modells für die Auswertung notwendig:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (3.2)$$

Y ist dabei die gesuchte Ergebnisgröße, X_1 bis X_N die Eingangsgrößen. Für die einzelnen Eingangsgrößen X_i sind im allgemeinen keine genauen Werte x_i bekannt, sondern nur eine Wahrscheinlichkeitsverteilung um den Erwartungswert $x_i = E[X_i]$. Die Unsicherheiten der Schätzwerte der Eingangsgrößen werden in der GUM-Methodik aus der Varianz der Normalverteilung berechnet. Die Standardmessunsicherheit der Eingangsgrößen ergibt sich dabei aus:

$$u(x_i) = \sqrt{\text{Var}(X_i)} \quad (3.3)$$

Die zugehörige Standardmessunsicherheit der Ergebnisgröße $u(y) = \sqrt{\text{Var}(Y)}$ wird nach dem Gesetz der Varianzfortpflanzung bestimmt:

$$u^2(y) = \sum_{i,j=1}^N u_i(y) \cdot r(x_i, x_j) \cdot u_j(y) \quad (3.4)$$

wobei $r(x_i, x_j)$ Korrelationskoeffizienten sind. Die Korrelationskoeffizienten liegen zwischen -1 und 1 . Mit ihnen können Abhängigkeiten zwischen den Eingangsgrößen berücksichtigt werden.

Je nach Vorzeichen dieser Koeffizienten kann die Messunsicherheit des Ergebniswertes größer oder kleiner als ohne Berücksichtigung der Korrelationen sein. Messunsicherheiten können sich verstärken oder verringern, wenn z. B. Instabilitäten einer Strahlungsquelle durch einen Monitorempfänger kompensiert werden.

Die Unsicherheiten werden nach GUM in zwei Arten unterschieden. Unsicherheiten vom Typ A können aus wiederholten Messungen als statistische Unsicherheiten gewonnen werden. Unsicherheiten vom Typ B umfassen alle Effekte außer den statistischen Effekten, die in den Unsicherheiten vom Typ A enthalten sind. Beispiele sind Kalibrierwerte mit zugehöriger Unsicherheit als Eingangsgrößen. Die Verteilungen der einzelnen Größen werden gemäß GUM immer auf Normalverteilungen bezogen. Für abweichende Verteilungen bei Unsicherheiten des Typs B, zum Beispiel Rechteckverteilungen, sind Berechnungen angegeben, um den gegebenen Verteilungen äquivalente Normalverteilungen zuzuweisen. Die Normalverteilung wird angewendet bei beobachteten Größen mit einer großen Anzahl von Wiederholungsmessungen (> 20). Sind diese Bedingungen nicht erfüllt, wird die Student-Verteilung verwendet [23].

In dieser Arbeit wird auf die Monte-Carlo-Simulationsmethode zur Bestimmung von Unsicherheiten zurückgegriffen. Dabei wird eine Messgleichung erstellt, die die Beziehungen zwischen den Messgrößen beschreibt. Die Messgrößen oder Parameter, bei denen Unsicherheiten bestehen, werden als Zufallsvariablen dargestellt. Es werden Zufallszahlen generiert, die den Unsicherheiten der Eingabewerte entsprechen. Diese Zufallszahlen können aus einer bestimmten Wahrscheinlichkeitsverteilung stammen, die die Unsicherheit (z. B. eine Normalverteilung) widerspiegelt. Das Modell wird für jede Kombination der zufällig generierten Eingabewerte ausgeführt, in der Regel mehrere Tausend Mal.

3.1.1. Radiometrische Kalibrierungen

Messgeräte, mit denen die radiometrischen Größen Bestrahlungsstärke oder Strahldichte in SI-Einheiten gemessen werden, müssen auf die entsprechenden Empfindlichkeiten SI-rückgeführt kalibriert und auf nationale Normale zurückgeführt werden, was entweder detektor- oder strahlerbasiert durchgeführt werden kann. Bei einer detektorbasierten Kalibrierung ein bekannter Empfänger, z. B. ein Trap-Detektor, bei einer strahlerbasierten Kalibrierung wird ein bekannter Strahler, z. B. eine Glühlampe eingesetzt.

Ein Beispiel hierfür ist der Schwarze Strahler, dessen Temperatur bekannt sein muss. Die Temperatur des Schwarzen Strahlers wird mit Hilfe von Breitband-Filterdetektoren bestimmt, die eigens hierfür in der PTB entwickelt wurden [24]. Dabei handelt es sich um Silizium-Photodioden (Si-Photodioden), die in einem thermostatisierbaren Gehäuse mit mehreren Vollfarbfiltren und einer definierten Blende eingebaut sind. Die auf diese Weise auf einen schmalen Spektralbereich begrenzte spektrale Empfindlichkeit der Detektoren wird durch eine Kalibrierung rückgeführt auf ein Kryoradiometer, das nationale Primärnormal der PTB für empfangergestützte Radiometrie [25], oder den Schwarze Strahler [26]. Durch die damit berechenbare Strahlungsfunktion kann die Skala der spektralen Bestrahlungsstärke dargestellt werden. Die so erhaltene Skala wird mittels eines Spektralradiometers auf Arbeitsnormale zur weiteren Verwendung in der Kalibrierkette oder auf Transfornormale zur Abgabe nach außen hin übertragen.

Die PTB betreibt Sekundärnormale, um die Einheit spektrale Bestrahlungsstärke zu bewahren und auf Transfornormale zu übertragen. Diese sind meist Strahler mit dem Normal im betrachteten Spektralbereich ähnlicher Charakteristik. Es werden hochstabile Glühlampen für den ultravioletten Bereich oder Gasentladungslampen für den ultravioletten bis sichtbaren Bereich (UV- bis VIS-Bereich) verwendet.

Abbildung 3.1 schematisiert die Rückführung der spektralen Bestrahlungsstärke und der Strahldichte.

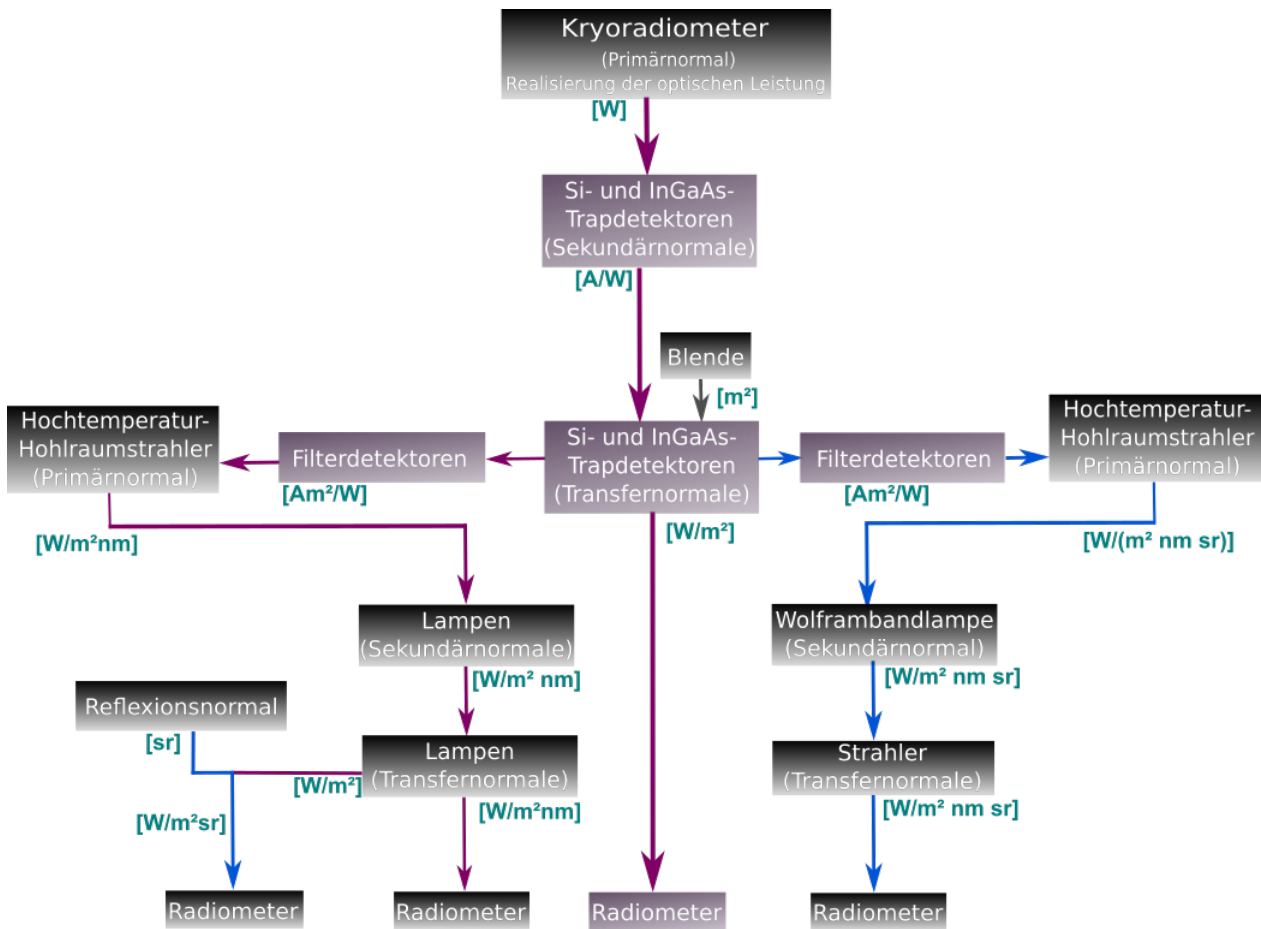


Abbildung 3.1.: Kalibrierkette für die Rückführung eines Radiometers auf das internationale Einheitensystem SI über die spektrale Bestrahlungsstärke (violett) und die Strahldichte (blau).

Zum einen ist in Abbildung 3.1 die Rückführung der Bestrahlungsstärke in violett gekennzeichnet, zum anderen aber auch die in blau gezeigte Rückführung der Strahldichte. Zusätzlich kann zwischen einer strahlerbasierten Messung und einer detektorbasierten Messung bei der Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit unterschieden werden. Auch hier werden Sekundärnormale verwendet, um die spektrale Bestrahlungsstärke auf Transfernormale zu übertragen. Während die Strahldichte über eine optische Abbildung oder Projektion eines Strahlerechnittes auf einen Empfänger bestimmt wird, lässt sich die Bestrahlungsstärke auf eine Bestrahlung auf eine definierte Fläche zurückführen, vgl. Abbildung 3.1. Für diese Größen ist eine Rückführung der optischen Leistung in Watt und eine definierte Fläche, also die Definition des Meters elementar.

Sowohl die strahlerbasierte als auch die detektorbasierte Rückführung werden in dieser Arbeit zum Zweck der metrologischen Rückführung für radiometrische Messungen in Fernerkundungsnetzwerken verwendet. In der Spektroradiometrie ist es üblich, eine kalibrierte Lampe als bekannte Strahlquelle zu verwenden, eine andere Möglichkeit wäre der Ver-

gleich mit einem Trap-Detektor an einem durchstimmbaren Lasersystem. Beide Methoden basieren auf dem Prinzip der Bestrahlungsstärkemessung.

Die Kalibrierungen im Aerosolüberwachungsnetzwerk AERONET basieren bisher auf der Verwendung eines Artefakts als auf einer rückgeführten Kalibrierkette. Für die sinnvolle Vergleichbarkeit von Messergebnissen ist es jedoch unumgänglich, diese Messungen auf SI zurückzuführen. Zusätzlich ist es wünschenswert, die Kalibrierkette möglichst kurz und von äußeren Einflüssen wie Wetter unabhängig zu halten, um Ausfallzeiten zu reduzieren. Möglichkeiten der Kalibrierung ergeben sich sowohl aus der Bestrahlungsstärkemessung über Lampen oder das durchstimmbare Lasersystem TULIP an der PTB, aber auch über eine kalibrierte Ulbricht-Kugel in Form einer Strahldichtemessung. Ein weiterer Weg führt über eine kalibrierte Lampe in Kombination mit einem Strahldichtenormal. Diese Methoden werden im Rahmen dieser Arbeit untersucht.

4. Theoretische Grundlagen

Bei den Kalibrierungen, so wie sie bisher im AERONET stattfinden, wird keine Bestrahlungsstärke im radiometrischen Sinn durchgeführt. Vielmehr ist die Messung der direkten Bestrahlungsstärke, wie sie für die Kalibrierungen mit der Sonne als Strahlungsquelle durchgeführt wird, eine Messung im Bestrahlungsstärkemode, da sie in Geräteeinheiten erfolgt. Bestimmt wird also ein Signal pro Kanal, keine spektral aufgelöste Bestrahlungsstärke in W/m^2 . Es gilt, diese Verbindung zwischen den Messungen im Bestrahlungsstärkemode und Messungen, wie sie in der Spektroradiometrie durchgeführt werden, herzustellen.

Die wichtigen Größen der Spektroradiometrie sind die Strahldichte, vgl. Kapitel 4.2, und die Bestrahlungsstärke, definiert als der Strahlungsfluss pro Wellenlängeneinheit, der auf eine Oberfläche pro Flächeneinheit auftrifft.

4.1. Spektrale Bestrahlungsstärke

Wenn der Strahlungsfluss Φ auf eine Fläche A innerhalb eines Wellenlängenintervalls $\Delta\lambda$ trifft, dann ist die mittlere spektrale Bestrahlungsstärke E_λ für diese Wellenlänge gegeben durch [27]:

$$\overline{E_\lambda} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\lambda \Delta A} \quad (4.1)$$

Für infinitesimale $\Delta\lambda$ und ΔA um eine Wellenlänge λ an einem Punkt P auf der Oberfläche A nähert sich die Bestrahlungsstärke E_λ zu:

$$E_\lambda(\lambda) = \frac{d^2\Phi}{d\lambda dA} \quad (4.2)$$

Die SI-Einheit für die spektrale Bestrahlungsstärke ist $\text{W}/\text{m}^2\text{nm}$. Bei einer Quelle, deren Ausmaße sehr klein gegenüber dem Abstand zwischen ihr und dem Empfänger ist, spricht man von einer Punktquelle. Strahler können als punktförmig angenommen werden, wenn das Verhältnis aus räumlicher Ausdehnung des Strahlers zum Abstand zwischen Strahler und Empfänger kleiner als 1/10 ist [27, 28].

Die spektrale Bestrahlungsstärke einer Punktquelle ist proportional zu $\cos(\theta)$, wobei θ der Winkel zwischen der Flächennormalen und der Richtung der Punktquelle ist, vgl. Abbildung 4.1 a). Im Idealfall beträgt der Einfallswinkel 90° . Der Strahlungsfluss in einem kleinen Raumwinkel bestrahlt eine Fläche ΔA , wenn die Oberfläche um den Winkel θ geneigt ist. Wie in Abbildung 4.1a) zu sehen, wird die Fläche um näherungsweise den Faktor $1/\cos(\theta)$ vergrößert, weswegen die Bestrahlungsstärke um den Faktor $\cos(\theta)$ verringert wird.

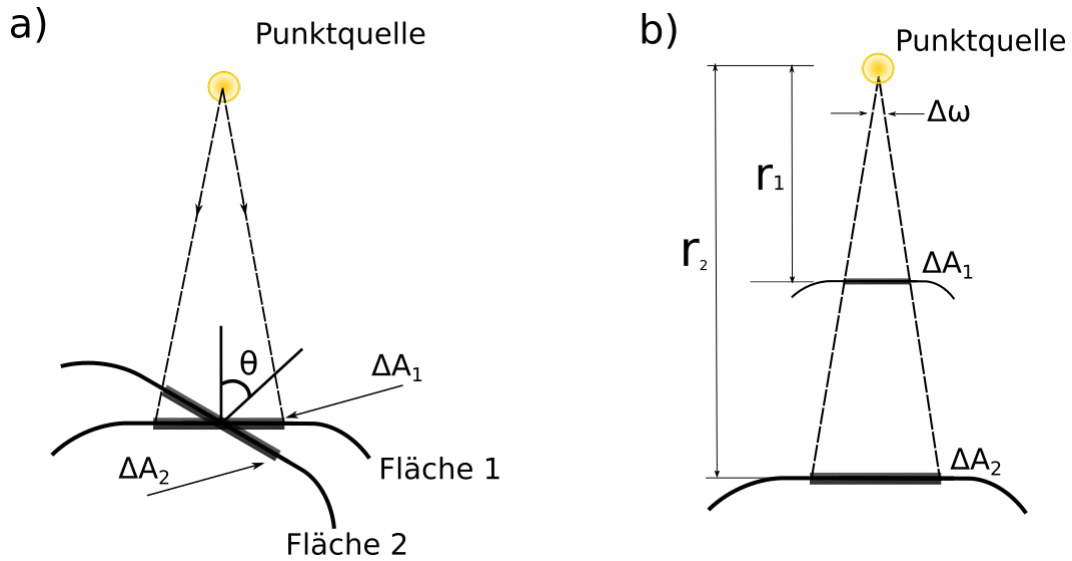


Abbildung 4.1.: a) Cosinusabhängigkeit der Bestrahlungsstärke b) Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke vom Abstandsquadrat nach [27].

Zu sehen ist, dass $\Delta A_2 = \Delta A_1 / \cos(\theta)$ und damit

$$\begin{aligned} \overline{E}_\lambda(\text{Fläche 2}) &= \frac{\Delta\Phi}{(\Delta\lambda \Delta A_2)} \\ &= \frac{\Delta\Phi \cos(\theta)}{(\Delta\lambda \Delta A_1)} \\ &= \overline{E}_\lambda(\text{Fläche 1}) \cdot \cos(\theta) \end{aligned} \quad (4.3)$$

Eine andere wichtige Eigenschaft der Bestrahlungsstärke ist, dass sie invers proportional zum Abstandsquadrat variiert [27]. Die in den kleinen Raumwinkel $\Delta\omega$ eingestrahelte Bestrahlung auf eine Fläche ist dann proportional zu $1/r^2$. Aus der Abbildung 4.1 ergibt sich, dass $\Delta A_1 = r_1^2 \Delta\omega$ und $\Delta A_2 = r_2^2 \Delta\omega$. Eingesetzt in Gleichung 4.1 wird daraus:

$$\overline{E}_\lambda(1) = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\lambda \Delta A_1} = \frac{\Delta\Phi}{r_1^2 \Delta\lambda \omega} \quad (4.4)$$

und

$$\overline{E}_\lambda(2) = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\lambda \Delta A_2} = \frac{\Delta\Phi}{r_2^2 \Delta\lambda \omega} \quad (4.5)$$

Die Bestrahlungsstärke eines punktförmigen Strahlers ist demnach umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes r .

Diese Gesetzmäßigkeiten erlauben die Bestimmung von Referenzebenen in Spektralradiometern, dies wurde sich für die Bestimmung der Referenzebenen des AERONET-Radiometers zu Nutze gemacht. Das Prinzip der Bestrahlungsstärkemessungen wird im Zuge der Ka-

librierungen der AERONET-Radiometer mit Strahldichtemessungen vergleichen. In den Kalibrierlaboren des AERONET ist es üblich, dies über eine Ulbricht-Kugel zu realisieren.

4.2. Strahldichte

Strahlung, die auf eine diffuse Oberfläche auftrifft, erzeugt durch Reflexion eine virtuelle Strahlungsquelle. Die von der Oberfläche ausgehende Strahlung wird durch ihre Strahldichte, der Bestrahlungsstärke pro Raumwinkel, beschrieben. Diese liefert detaillierte Informationen über die Orts- und Richtungsabhängigkeit der abgegebenen Strahlung. In der DIN 5031 wird sie beschrieben als [29]:

Die Strahldichte L ist der Quotient aus der durch eine Fläche A in einer Richtung ϵ durchtretenden (auftreffenden) Strahlungsleistung Φ und dem Produkt aus dem durchstrahlten Raumwinkel Ω und der Projektion der Fläche $dA \cos(\epsilon)$ auf eine Ebene senkrecht zur betrachteten Richtung.

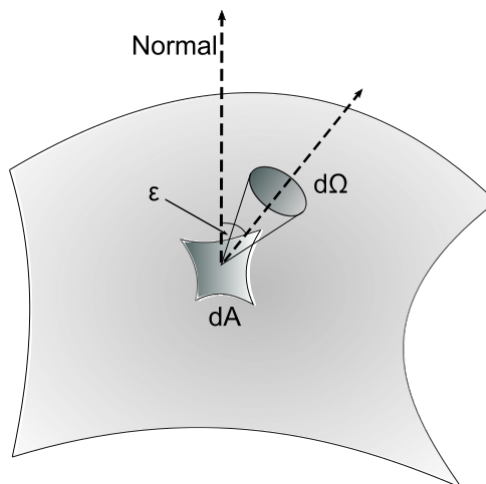


Abbildung 4.2.: Darstellung der Strahldichte.

Abbildung 4.2 zeigt die Definition in graphischer Form. Mathematisch ist die Strahldichte definiert als [28]:

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dA \cos(\epsilon)} \quad (4.6)$$

Die für diese Arbeit relevanten radiometrischen Größen sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst [29, 28, 30]:

Größe	Formelzeichen	Beziehung	Einheit
Strahlungsenergie	Q	$Q = \int Q_\lambda d\lambda$	Ws
Strahlungsleistung	Φ	$\Phi = \frac{dQ}{dt}$	W
Bestrahlungsstärke	E	$E = \frac{d\Phi}{dA}$	Wm^{-2}
Strahldichte	L	$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dA \cos(\epsilon)}$	$\text{W m}^{-2}\text{sr}^{-1}$
Strahlstärke	I	$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$	Wsr^{-1}

Tabelle 4.1.: Für diese Arbeit relevante strahlungsphysikalischen Größen und ihre Abhängigkeiten voneinander [28, 29].

Zur Definition der radiometrischen Größen werden zudem die geometrischen Größen der Fläche A , des Raumwinkels Ω , des Winkels ϵ zur Flächennormalen und der Abstand R zwischen Strahler und Empfänger benötigt.

Die aufgeführten radiometrischen Größen beinhalten die SI-Einheiten Watt und Meter. Für die Realisierung der Einheiten der Bestrahlungsstärke und der Strahldichte sind demnach diese beiden Einheiten elementar.

Die Bestrahlungsstärke ist ein Maß für auf eine Fläche eines Empfängers auftreffende Leistung eines Strahlers, die Strahldichte gibt an, welche Strahlungsleistung von einem gegebenen Punkt der Strahlungsquelle in die durch den Polarwinkel und den Azimithwinkel gegebene Richtung pro projiziertem Flächenelement und pro Raumwinkelelement ausgegeben wird. Diese beiden Größen gelten in dieser Form als integrale Größen über den gesamten Bereich des optischen Spektralbereichs. Es ist jedoch üblich auch die spektrale Abhängigkeit einer strahlungsphysikalischen Messgröße anzugeben. Die spektrale Dichte einer Größe ist dabei als der Differentialquotient aus der Messgröße X und der Wellenlänge λ definiert [29]

$$X_\lambda = \frac{dX}{d\lambda} \tag{4.7}$$

Eine Möglichkeit eine Strahldichtequelle zu realisieren ist die Verbindung eines Strahlers, wie z.B. einer Glühlampe oder einer LED-Quelle, mit einer Ulbricht-Kugel. Das Konzept und die Funktionsweise der Ulbricht-Kugel soll im nächsten Abschnitt erläutert werden.

4.3. Ulbricht-Kugel

In der Radiometrie und der Photometrie werden Arbeits- und Transfornormale für Strahldichte bzw. Leuchtdichte auf der Basis von Ulbricht-Kugeln realisiert. Dafür werden meist Lampen mit Ulbricht-Kugeln gekoppelt. Ulbricht-Kugeln verteilen einfallende Strahlung durch diffuse Reflexion gleichmäßig über die innere Kugeloberfläche. Sie werden in ver-

schiedenen messtechnischen Anwendungen zur Integration von Licht und Strahlung und als Quelle gleichmäßiger diffuser Strahlung eingesetzt. Eine „perfekte“ Kugel reflektiert demnach möglichst viel der eintreffenden Strahlung und erzeugt durch Mehrfachreflexionen ein homogenes Strahlungsfeld. Dies ist vor allem von der Innenbeschichtung der Kugel abhängig, worauf später in diesem Abschnitt eingegangen wird. Zunächst soll auf die allgemeine Funktionsweise und die Bestimmung der Strahldichte einer Ulbricht-Kugel eingegangen werden.

4.3.1. Strahldichte eines Kugelstrahlers

Um die Strahldichte einer ausgeleuchteten Ulbricht-Kugel bestimmen zu können, wird von der Strahldichte einer diffus reflektierenden Oberfläche ausgegangen. Die Durchmesser der Öffnungen, die zum Beispiel zur Anbringung von Lichtquellen oder Messgeräten dienen, sind deutlich kleiner als der Innendurchmesser der Kugel, so dass nur Strahlung durch die Austrittsöffnung gelangt, die vorher vielfache Reflexion durchlaufen hat. Die Summe der Öffnungen sollte 5 % der Gesamtfläche der Kugel nicht überschreiten [31].

Ein Grundgedanke der Ulbricht-Kugel ist die konstante Richtungsverteilung der Strahldichte, die von einem bestimmten Bereich ausgeht, der gegen direkte Bestrahlung abgeschirmt sein muss. Die Ausgangsöffnung der Kugel kann so als ideale Lambertsche Quelle angesehen werden, da die austretende Strahlung eine homogene Ausstrahlverteilung ausweist [32]. Um die Funktionsweise von Ulbricht-Kugeln zu verstehen werden im folgenden diffus reflektierende Oberflächen betrachtet, woraus dann die Strahldichte der inneren Oberfläche der Kugel abgeleitet wird.

Mit der eintretenden Strahlung Φ , dem Reflexionsgrad ρ und der Innenoberfläche der Ulbricht-Kugel A lässt sich diese bestimmen durch:

$$L_s = \frac{\Phi \rho}{\Theta A} \quad (4.8)$$

wobei Θ der projizierte Raumwinkel der Oberfläche ist [31]. Um die Strahldichte zu bestimmen, müssen sowohl Oberflächenreflexionen als auch die Verluste durch die Ports betrachtet werden.

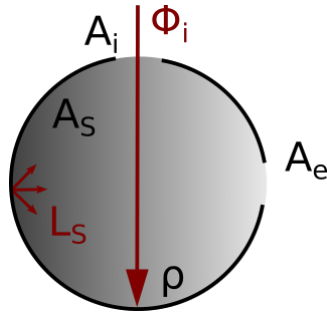


Abbildung 4.3.: Ulbricht-Kugel mit Einlassport A_i und Ausgangsport A_e .

Figur 4.3 zeigt eine Ulbricht-Kugel mit der Eintrittsfläche A_i und der Austrittsfläche A_e , A_S ist die Kugelinnenoberfläche. Der einfallende Strahlungsfluss Φ_i wird durch die erste Reflexion gestreut. Die auf die gesamte Kugeloberfläche auftreffende Strahldichte beträgt [33]:

$$L_s = \Phi_i \rho \left(\frac{A_S - A_i - A_e}{A_S} \right) \quad (4.9)$$

Der in Klammern gestellte Term beschreibt die von der Kugeloberfläche aufgenommene Strahlung, die nicht durch die Öffnungen verloren geht. Dieser Term lässt sich auch beschreiben durch $(1-f)$, wobei $f = (A_i + A_e/A_S)$ der Öffnungsanteil ist. Für eine Ulbricht-Kugel mit mehr als zwei Öffnungen berechnet sich f als die Summe aller Portöffnungen. Die nach der zweiten Reflexion auftretende Strahldichte auf der Kugeloberfläche ist somit gegeben durch:

$$L = \Phi_i \rho^2 (1 - f)^2 \quad (4.10)$$

Nach drei Reflexionen ergibt sich $L = \Phi_i \rho^3 (1 - f)^3$, so dass nach n Reflexionen über die gesamte Kugeloberfläche geschrieben werden kann:

$$L = \Phi_i \rho (1 - f) [1 + \rho(1 - f) + \dots + \rho^{n-1} (1 - f)^{n-1}] \quad (4.11)$$

Dies lässt sich mit $(1 - f) < 1$ schreiben als:

$$L = \frac{\Phi_i \rho (1 - f)}{1 - \rho(1 - f)} \quad (4.12)$$

Die Gleichung impliziert, dass die auf die Kugeloberfläche auftreffende Strahldichte höher ist als der Eingangsfluss, begründet durch Mehrfachreflexionen im Inneren der Kugel. Daraus folgt, dass die Strahldichte der Kugeloberfläche gegeben ist durch [31]:

$$L_S = \frac{\Phi_i}{\pi A_S} \cdot \frac{\rho}{1 - \rho(1 - f)} \quad (4.13)$$

Die Gleichung beschreibt die Strahldichte für einen vorgegeben Eingangsfluss als Funktion des Kugeldurchmessers, des Reflexionsgrades der Beschichtung und dem Anteil der Öffnun-

gen an der Gesamtoberfläche. Der erste Term ist ähnlich dem einer diffusen Oberfläche, vgl. Gleichung 4.8. Der zweite Term ist eine einheitenlose Größe, die als Kugelmultiplikator M bezeichnet wird. Dieser berücksichtigt das Verhalten der Strahlungsdichte aufgrund von Mehrfachreflexionen. Die Gleichung gilt für den Fall, dass der einfallende Strahlungsfluss perfekt auf die Kugelwand auftrifft, der Reflexionsgrad der Kugel gleichmäßig ist und dass der Reflexionsgrad der Portöffnungen null ist. Der generelle Ausdruck ist gegeben durch [31]:

$$M = \frac{\rho_0}{1 - \rho_W \left(1 - \sum_{j=0}^n f_j \right) - \sum_{i=0}^n \rho_i f_i} \quad (4.14)$$

mit ρ_0 als Reflexionsgrad bei der ersten Reflexion, ρ_W als Reflexionsgrad der Kugelwand, ρ_i als Reflexionsgrad der Portöffnung i und f als Anteil der Portöffnungsfläche an der Gesamtoberfläche.

Der Term $\rho_W \left(1 - \sum_{j=0}^n f_j \right) - \sum_{i=0}^n \rho_i f_i$ kann als $\bar{\rho}$ zusammengefasst werden, was dem durchschnittlichen Reflexionsgrad der Ulbricht-Kugel entspricht. Der Kugelmultiplikator kann umgeschrieben werden als:

$$M = \frac{\rho_0}{1 - \bar{\rho}} \quad (4.15)$$

Für die Laborkalibrierung der Cimel-Radiometer wird gemäß dem AERONET- Kalibrierungsprotokoll weitestgehend auf Ulbricht-Kugeln zurückgegriffen [5]. Mit Ulbricht-Kugeln können Strahlquellen realisiert werden, die eine gleichmäßige Helligkeit über ihre gesamte Ausstrahlungsfläche aufweisen und in alle Richtungen nahezu perfekt lambertsch und gleichmäßig emittieren. Diese Innenoberfläche ist mit einer diffus reflektierenden Beschichtung beschichtet. Diese Eigenschaft ermöglicht es der Kugel, Strahlung in allen Richtungen gleichmäßig zu verteilen und Richtungseffekte zu eliminieren. Häufig werden Ulbricht-Kugeln mit Halogenlampen betrieben. Halogenlampen haben ein kontinuierliches Spektrum im sichtbaren Bereich und bieten daher besonders für Anwendungen in der Radiometrie und Photometrie Vorteile. LEDs werden immer mehr für Strahldichtenormale eingesetzt. LEDs bieten mehrere Vorteile, beispielsweise eine lange Lebensdauer, Energieeffizienz und die Möglichkeit, spezifische Wellenlängen auszuwählen.

Die Verwendung von integrierenden Kugeln findet Anwendung bei der Messung von z.B. Lichtstrom, der Farbtemperatur und anderen Parameter der Lichtquelle. Es ist ein unverzichtbares Instrument bei der Erzeugung der Strahldichte und wird als solches auch im Rahmen dieser Arbeit verwendet.

4.3.2. Strahlungsaustausch innerhalb der Kugel

Betrachtet wird der Strahlungsaustausch zwischen zwei differentiellen Elementen von diffusen Oberflächen [31], wie in Abbildung 4.4 gezeigt.

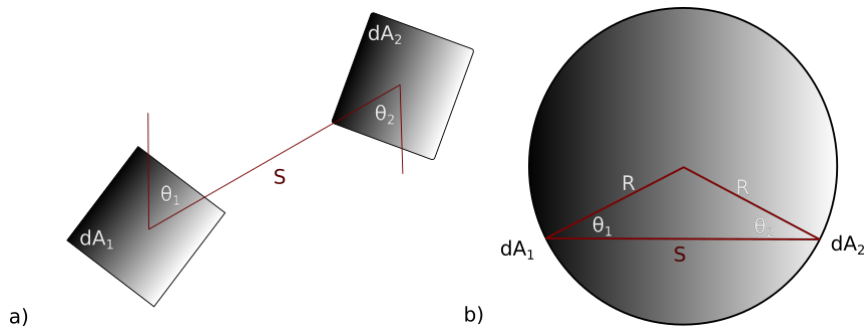


Abbildung 4.4.: Strahlungsaustausch zwischen a) zwei diffusen Oberflächen und b) innerhalb einer Kugel mit diffuser Innenoberfläche.

Der Anteil der Strahlung, der das Flächenelement A_1 unter dem Winkel Θ_1 verlässt und auf das Flächenelement A_2 im Abstand S unter dem Winkel Θ_2 auftritt, wird als Austauschfaktor $dF_{d_1-d_2}$ bezeichnet. Dieser ist gegeben durch:

$$dF_{d_1-d_2} = \frac{\cos(\Theta_1) \cos(\Theta_2)}{\pi S^2} dA_2 \quad (4.16)$$

wobei Θ_1 und Θ_2 gegen die Flächennormale angegeben werden [31]. Betrachtet man nun zwei differentielle Flächenelemente dA_1 und dA_2 innerhalb einer diffusen Kugeloberfläche mit dem Radius R , vgl. Abbildung 4.4, ergibt sich mit $S = 2 R \cos(\Theta_1) = 2 R \cos(\Theta_2)$:

$$dF_{d_1-d_2} = \frac{dA_2}{4 \pi R^2} \quad (4.17)$$

Gleichung 4.17 zeigt, dass der Anteil des Strahlungsfluss auf das Flächenelement dA_2 für jeden Punkt auf der Kugeloberfläche gleich ist, da sie unabhängig vom Winkel und vom Abstand zwischen den Flächen ist. Wird die endliche Fläche A_2 hingegen von einer infinitesimalen Fläche dA_1 bestrahlt, kann Gleichung 4.17 geschrieben werden als:

$$dF_{d_1-d_2} = \frac{1}{4 \pi R^2} \int_{A_2} dA_2 = \frac{A_2}{4 \pi R^2} \quad (4.18)$$

welches unabhängig von dA_1 ist. Es folgt daraus:

$$F_{1-2} = \frac{A_2}{4 \pi R^2} = \frac{A_2}{A_S} \quad (4.19)$$

wobei A_S die Oberfläche der gesamten Kugel ist. Die auf A_2 auftreffende Strahlung ist demnach abhängig von der Oberfläche der Kugel.

4.3.3. Kugelbeschichtungen

Die Innenseite der Kugel ist mit einem reflektierenden Material beschichtet, je nach Verwendungszweck und Wellenlänge der Strahlung. Zu den am meisten verwendeten Materialien gehören Bariumsulfat (BaSO_4), Gold und Polytetrafluorethylen (PTFE). Goldbeschichtungen zeichnen sich dadurch aus, dass sie hochgradig reflektierend im Infrarot- und

Nah-Infrarotbereich sind. Die Beschichtung bleibt auch bei Temperaturen bis ca. 100 °C stabil, welche bei Bariumsulfat zur Verringerung des Reflexionsvermögens führen kann. Goldbeschichtungen eignen sich für Anwendungen im Bereich zwischen 700 nm und 2000 nm [34]. Da für die Entwicklung einer LED-basierten Strahldichtequelle für AERONET-Radiometer der Spektralbereich von 340 nm bis 1640 nm abgedeckt sein muss und eine Goldbeschichtung diesen Bereich nicht abdeckt, wird diese in dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

Bariumsulfat eignet sich hingegen für eine Vielzahl von Anwendungen. Der Wirkungsbereich liegt zwischen 300 nm und 2400 nm [34], wobei je nach Hersteller ein Bereich von 320 nm bis 2500 nm [35] oder zwischen 350 nm und 1300 nm angegeben werden [33]. Bariumsulfat ist wasserlöslich und hygroskop, weist jedoch im Infrarotbereich einen kleineren Reflexionsgrad auf als eine Goldbeschichtung.

Für die Anbringung der Innenbeschichtung der Kugel wird eine handelsübliche Grundierung verwendet, die gut auf dem Kugelkörper haftet [36]. Über die wird in mehreren Schichten ein Deckanstrich, z.B. basierend auf BaSO₄, gebracht, der die erforderlichen optischen Eigenschaften aufweist. Durch die Schichten wird die „kritische Schichtdicke“ überschritten, die so groß gewählt werden muss, dass der Untergrund im Rahmen der Messungenauigkeiten keinen Einfluss hat. Um die Anzahl der Schichten gering zu halten, wird meist eine Grundierung gewählt, die bereits selbst einen großen Reflexionsgrad aufweist. Die Beschichtung wird meist aus destilliertem Wasser, einem weißen Pigment wie BaSO₄, ZnO oder TiO₂ und einem farblosen Bindemittel hergestellt. Je mehr Bindemittel die Beschichtung enthält, desto größer ist die Haltbarkeit. Bindemittel vergilbt im Laufe der Zeit, weswegen eine Beschichtung mit möglichst wenig Bindemittel zu bevorzugen ist. Wasserlösliche Beschichtungen werden mit der Spritzpistole aufgetragen, was auch dazu führt, dass die gewünschte Feinstruktur in der Oberfläche erreicht werden kann. Bei starker Verdünnung wird die Oberfläche sehr grobkörnig, ebenso treten wie beim Auftragen zu dicker Schichten leicht Trockenrisse auf. Auf diese Weise hergestellte Beschichtungen haben den entscheidenden Nachteil, dass sie mechanisch sehr empfindlich sind und daher auch keine Möglichkeit zur Reinigung von Staub oder ähnlichem besteht. Abbildung 4.5 zeigt den 8/H Reflexionsfaktor einer BaSO₄-Beschichtung über die Wellenlänge. 8/H-Reflexionsfaktoren beziehen sich auf den spektralen Reflexionsfaktor, der unter Verwendung einer 8°-Richtungsbeleuchtung und einer halbkugelförmigen Sammelgeometrie gemessen wird.

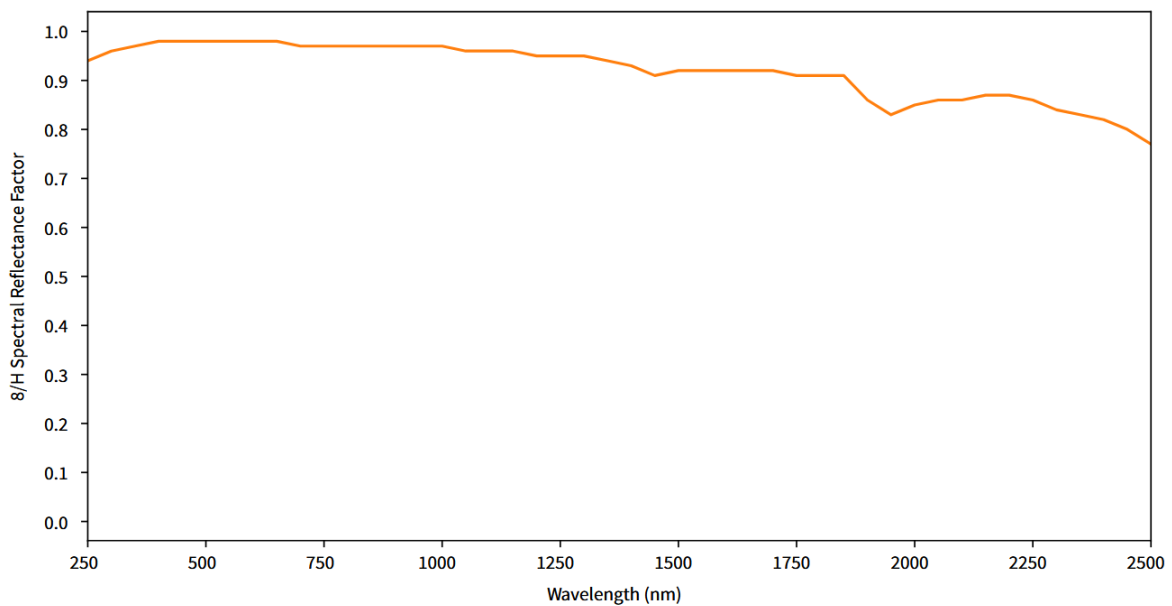


Abbildung 4.5.: 8/H-Reflexionsfaktor einer BaSO₄-Beschichtung über die Wellenlänge [37].

Alternativ werden immer mehr Ulbricht-Kugeln mit PTFE beschichtet. PTFE ist ein teilkristallines Polymer, das sich aus kristallinen und amorphen Bereichen zusammensetzt. Die kristalline Region hat zwei Phasenübergänge, bei 19 °C und bei 30 °C [38]. Bei steigender Temperatur unter Normaldruck bildet die kristalline Phase einen triklinen Kristall, der bei der kritischen Temperatur von 19 °C in einen teilgeordneten hexagonalen Kristall übergeht, ab einer Temperatur von 30 °C werden die Molekülketten zu seinem pseudo-hexagonalen Kristall [39]. Die Verwendung von PTFE muss also unter Beachtung der Umgebungstemperatur erfolgen, da diese auch Auswirkungen auf die optischen Eigenschaften hat. Die optische Durchlässigkeit ändert sich bei PTFE als optischer Diffusor um bis zu 3 % zwischen den Temperaturen von 13 °C und 22 °C, zusätzlich führen die Übergänge bei 19 °C und 30 °C zu einer reversiblen Volumenänderung, wobei der größere Teil dieser Volumenänderung aus dem Übergang bei 19 °C resultiert [40]. Da der Reflexionsgrad von gepresstem PTFE von der Dichte abhängt, ist die Temperatur ein besonders wichtiger Faktor bei der Verwendung. Abbildung 4.6 zeigt die Reflexionseigenschaften in Abhängigkeit der Wellenlänge.

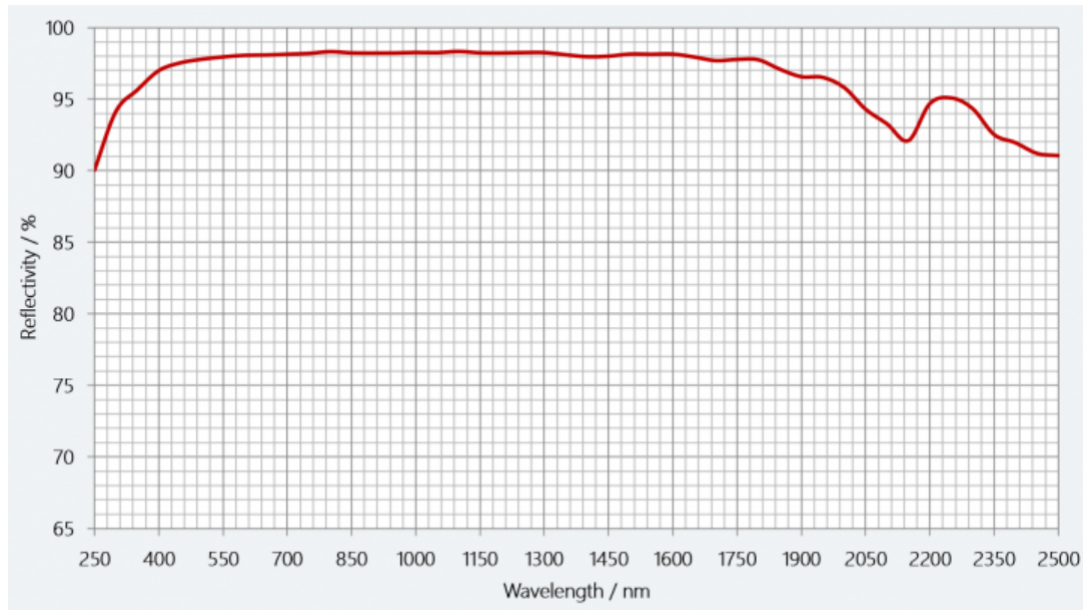


Abbildung 4.6.: Reflexionsgrad einer PTFE-Beschichtung über die Wellenlänge [41].

Besonders für den UV-Bereich werden Ulbricht-Kugeln mit PTFE-Beschichtung eingesetzt, da sie hervorragende Reflexions- und Streueigenschaften besitzen, vgl. Abbildung 4.6. PTFE hat einen hohen diffusen Reflexionsgrad im Bereich von 250 – 2500 nm, der Reflexionsgrad liegt bei über 99 % im Bereich von 400 nm bis 1500 nm [35]. Durch die hohe Reflexion der Beschichtung ist PTFE für Anwendungen mit schwacher Strahlung geeignet. Darüber hinaus ist PTFE hydrophob, es ist bis zu einer Temperatur von 350° C chemisch stabil und kann gereinigt werden, ohne dass die Integrität beeinträchtigt wird. In der radiometrischen Anwendung gibt es jedoch auch einen Schwachpunkt bei der Verwendung mit UV-Strahlung, der Durchsatz der Kugel verschlechtert sich sichtbar. Zudem kann Fluoreszenz auftreten, die nachweislich durch Kontamination der PTFE-basierten Materialien ausgelöst wird [42, 43]. In dieser Arbeit soll neben der Rückführung für bodengestützte radiometrische Messungen im AERONET auch eine LED-basierte Quelle entwickelt und gebaut werden, die an eine Ulbricht-Kugel angeflanscht werden kann. Gemäß der Definition der Strahldichte wäre es denkbar, ein diffuses Reflektionsnormal wie eine Tablette oder einen Diffusor zu verwenden, um eine Strahldichtequelle zu bauen. Diese Ansätze gewährleisten jedoch nicht die optimale Durchmischung von Spektren verschiedener LEDs. Anders als Glühlampen weisen LEDs schmalbandige Spektren auf, daher muss auf die Durchmischung der Spektren besonderer Wert gelegt werden. Für die Auswahl von LEDs für eine stabile und reproduzierbare Quelle ist es wichtig, grundlegend die Funktionsweise von LEDs, sowie den Einfluss von Betriebsstrom, Bauweise und Temperatur zu kennen.

4.4. Light-Emitting Diodes (LED)

Da Glühlampen bald nicht mehr kommerziell erhältlich sein werden, muss auch im Bereich der Radiometrie über Alternativen nachgedacht werden [44]. Ein vielversprechender Ansatz dabei ist die Verwendung von LEDs, die bereits in der Photometrie erfolgreich als Strahler für den sichtbaren Wellenlängenbereich verwendet werden [45]. Im Rahmen des MAPP-Projekts wurde eine LED-basierte Quelle entwickelt. Da LEDs in dieser Arbeit als Strahlungsquellen verwendet werden und nur eingeschränkt Gegenstand der Untersuchung sind, werden die physikalischen Grundlagen nur kurz beschrieben.

Für die Entwicklung der LED-basierten Quelle im Rahmen dieser Arbeit sind im Wesentlichen zwei Abhängigkeiten zu betrachten. Zum einen die Abhängigkeit der abgestrahlten Leistung von der Temperatur, zum anderen die Abhängigkeit vom Strom.

Die Eigenschaften der für diese Quelle verwendeten LEDs hängen vom physikalischen Modell, dem Bändermodell, ab.

4.4.1. Bändermodell

Das Bändermodell ist ein physikalisches Modell zur Beschreibung des Energiezustands von Elektronen in Festkörpern, insbesondere in Halbleitern, Metallen und Isolatoren. Das Modell besteht im Wesentlichen aus zwei Energiebändern, dem sog. Valenzband sowie Leitungsband und der Bandlücke zwischen den beiden Energiebändern, deren Breite u. a. die Leitfähigkeit beeinflusst. Eine vereinfachte Beschreibung des Bändermodells wird durch das Bohr'sche Atommodell ermöglicht.

In einem Festkörper gibt es:

- Valenzband: Das höchste vollständig oder teilweise mit Elektronen besetzte Band bei 0 K. Die Elektronen innerhalb des Bandes sind gebunden, können aber bei Energiezufuhr angeregt werden.
- Leitungsband: Dieses liegt energetisch über dem Valenzband. Die Elektronen in diesem Band sind frei beweglich
- Bandlücke (engl.: Bandgap): Entspricht dem Energieabstand zwischen Valenzband und Leitungsband. In diesem Bereich existieren keine erlaubten Energiezustände für Elektronen. Die Größe der Bandlücke bestimmt die elektrischen Eigenschaften des Materials.

Eine LED ist ein Halbleiterbauelement, bei dem Elektronen und Löcher im pn-Übergang rekombinieren und dabei Strahlung emittieren. Das Bändermodell erklärt dies über den Energieübergang zwischen Leitungsband und Valenzband. Die Rekombination von Elektronen und Löchern im pn-Übergang führt zur Photonenemission.

4.4.2. pn-Übergang

Als pn-Übergang wird ein Materialübergang in Halbleiterkristallen zwischen Bereichen mit unterschiedlicher Dotierung bezeichnet. Dotieren bedeutet das Einbringen von Fremdatomen in einen Halbleiterkristall zur gezielten Veränderung der Leitfähigkeit. Bei der n-Dotierung werden fünfwertige Elemente (wie z. B. Phosphor (P) oder Arsen (As)), die Donatoren, in beispielsweise den vierwertigen Halbleiter Silizium eingebracht [46]. Ein fünfwertiges Element hat fünf Außenelektronen für kovalente Bindungen zur Verfügung, so dass beim Austausch eines Siliziumatoms durch ein Fremdatom im Kristall ein Außenelektron des Donators frei beweglich zur Verfügung steht, vgl. Abbildung 4.7. Das Elektron kann sich beim Anlegen einer Spannung bewegen, es entsteht ein Strom. An der Stelle des Donator-Atoms entsteht eine ortsfeste positive Ladung, der eine negative Ladung des frei beweglichen Elektrons gegenübersteht. Bei der p-Dotierung werden dreiwertige Elemente, die Akzeptoren, in z. B. Silizium eingebracht [46]. Ein dreiwertiges Element hat drei Außenelektronen für kovalente Bindungen zur Verfügung, es besteht also ein Mangel an Außenelektronen, was als Loch oder Fehlstelle bezeichnet wird. Beim Anlegen einer Spannung verhält sich dieses Loch wie ein frei beweglicher positiver Ladungsträger, es bildet sich ein Strom aus. Durch das äußere Feld springt ein Elektron aus einer kovalenten Bindung heraus, füllt ein Loch und hinterlässt ein neues Loch. An der Stelle des Akzeptor-Atoms entsteht eine ortsfeste negative Ladung.

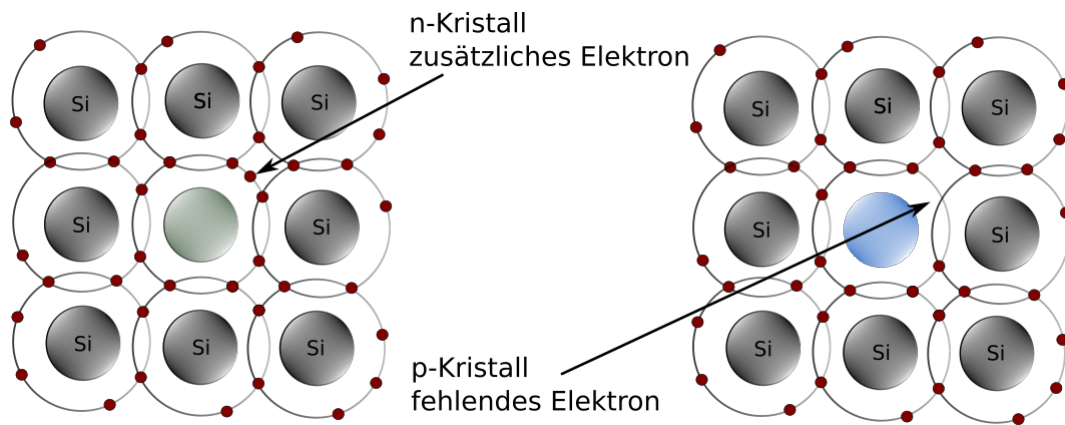


Abbildung 4.7.: p-dotierte Kristalle und n-dotierte Kristalle am Beispiel von Silizium nach [47].

Werden p-leitendes Material und n-leitendes Material zusammengebracht, so entsteht ein Grenzbereich zwischen den Materialien, es kommt zur Ausbildung einer Raumladungszone im Bereich des Überganges. Wird eine Spannung angelegt, so kommt zu einer Veränderung der Raumladungszone. Bei einer Spannung in Sperrrichtung verbreitert sich die Raumladungszone, es fließt kein Strom. In Flussrichtung sorgt die Spannung dafür, dass sich die Raumladungszone verkleinert. Ab einer sogenannten Durchbruchspannung kommt es dann aber zu einem ansteigenden Stromfluss durch das Injizieren von Elektronen in die

p-dotierte Zone und das Injizieren von Defektelektronen in die n-dotierte Zone. Dabei wird die Raumladungszone im Prinzip „geflutet“, es fließt ein Strom.

Gelangen Elektronen in die p-dotierte Zone mit Elektronenmangel rekombinieren diese. Ebenso verhält es sich in der n-dotierten Zone positiven Ladungsträger nehmen die überschüssigen freien Elektronen auf.

Bei der Rekombination kommt es zur Freisetzung von Energie, die hauptsächlich in Form von Strahlungsenergie auftritt. Die Menge der erzeugten Strahlungsenergie ist abhängig vom Bandabstand und somit vom verwendeten Material.

4.4.3. LED Materialien

Die Größe der Bandlücke bestimmt die Energie, das heißt die Frequenz bzw. Wellenlänge der ausgesandten Strahlung, was sich über die chemische Zusammensetzung des Halbleiters beeinflussen lässt. Auf diese Weise verändert der Austausch von Atomen im Kristallgitter den kristallinen Aufbau des Materials, seine Gitterparameter oder seine Gitterstruktur. Während LEDs auf der Basis von Indiumgalliumnitrid (InGaN) Licht im sichtbaren Bereich aussenden [48], strahlen LEDs auf der Basis von Aluminium ultraviolette Strahlung ab [49]. Mit steigendem Aluminiumanteil in der Legierung wird es jedoch immer schwieriger, das Material zu „dotieren“, weil Aluminium strukturell, chemisch und elektrisch inert gegenüber vielen Dotierstoffen ist. Es fehlen sowohl geeignete Gitterplätze als auch wirksame Mechanismen, um Dotierstoffe einzubringen und kontrolliert wirksam zu machen [50]. Zudem diffundieren Fremdatome ohne „Hilfsmittel“ (Defekte, Leerstellen etc.) nur schwer durch das Aluminiumgitter [51]. Die Dotierung ist notwendig, um die elektronischen Eigenschaften von Halbleitermaterialien zu verbessern, und funktioniert durch die Erhöhung der Anzahl der Ladungsträger im Material. Im Infrarotbereich wird zumeist auf Indiumgalliumarsenidphosphid (InGaAsP) Verbindungen zurückgegriffen [52]. Die wichtigsten Halbleiter für LED-Anwendungen und die Bandbreite ihres Spektrums sind in Tabelle 4.2 dargestellt.

Wellenlängenbereich [nm]	Farbe	Halbleitermaterial
< 400	Ultraviolett	Aluminiumnitrid (AlN) Aluminiumgalliumnitrid (AlGaIn)
400 - 450	Violett	Indiumgalliumnitrid (InGaIn)
450 - 500	Blau	Indiumgalliumnitrid (InGaIn) Siliciumcarbid (SiC)
500 - 570	Grün	Galliumphosphid (GaP) Aluminiumgalliumindiumphosphid (AlGaInP)
570 - 590	Gelb	Galliumarsenidphosphid (GaAsP) Galliumphosphid (GaP)
590 - 610	Orange	Galliumarsenidphosphid (GaAsP) Aluminiumgalliumindiumphosphid (AlGaInP)
610 - 760	Rot	Galliumarsenidphosphid (AlGaAs)
> 760	Infrarot	Galliumarsenid (GaAs) Galliumarsenidphosphid (AlGaAs)

Tabelle 4.2.: Häufig verwendete Materialien für LEDs mit Wellenlängenbereich und Farben nach [53].

Wie in Tabelle 4.2 gezeigt, deckt die Verwendung von GaAsP einen weiten Bereich ab, von der Mitte des sichtbaren Bereichs bis hin zum Infrarotbereich. Für die Wellenlängen-erzeugung im Bereich der indirekten Bandlücke ist der Wirkungsgrad sehr gering. Die Wahrscheinlichkeit von Strahlungsübergängen ist sehr gering, da Gitterwechselwirkungen oder andere Streuprozesse für die Impulserhaltung an dem Prozess beteiligt sind. Bei Halbleitern mit indirekter Bandlücke werden daher oft sogenannte Rekombinationszentren eingebaut, z. B. Stickstoff, um die Strahlungsprozesse zu verbessern [54].

4.4.4. Abhängigkeit des LED-Spektrums von Strom und Temperatur

Eine Erhöhung der Temperatur in einer LED verursacht grundlegende Effekte für ihr emittiertes Spektrum. Die Bandlücke wird aufgrund von zwei Effekten kleiner, wenn sich die Temperatur des Halbleiters erhöht.

Einerseits dehnt sich der Kristall aus, wodurch sich der Abstand der Gitteratome vergrößert. Die Ausdehnung ist proportional zur Temperatur und verursacht eine Bandverschiebung. Die Energie der emittierten Photonen ist somit geringer, so dass sich auch die Peakwellenlänge der LED zu größeren Wellenlängen hin verschiebt. Die Varshni-Formel stellt die Bandlückenenergie in Abhängigkeit der Temperatur dar [55]:

$$E_g = E_0 - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (4.20)$$

Die Debye-Temperatur β und ein materialabhängiger Koeffizient α bestimmen dabei die Stärke der Bandlückenreduzierung ausgehend von einem maximalen Wert E_0 bei $T = 0$.

Die weitere Folge der Temperaturerhöhung ist eine reduzierte optische Effizienz des Halbleiters. Eine Ursache ist die strahlungslose Emission an Fehlstellen. Die strahlungslose Emission an Störstellen in LEDs entsteht durch nicht-strahlende Rekombinationsprozesse, bei denen Elektronen und Löcher miteinander rekombinieren, ohne dass ein Photon ausgesendet wird. Stattdessen wird die Energie in Wärme umgewandelt. Die abgestrahlte Leistung sinkt daher [47]. Eine Änderung des Stroms führt meist zu einer Änderung der Temperatur in der LED und somit zu einer Veränderung der optischen Leistung. Die Erhöhung des Stroms erhöht die Anzahl der Rekombinationen von Elektronen und Löchern und somit auch zu einem Anstieg der emittierten Photonen, was eine Erhöhung des gesamten Spektrums nach sich zieht [47].

4.5. Messgeräte für spektral aufgelöste radiometrische Messungen

Ein Hauptteil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Rückführung der Messungen mit Hilfe der AERONET-Radiometer Cimel CE318-T. Bevor speziell auf diese Radiometer, deren Aufbau und Messmethodik eingegangen wird, soll der allgemeine Aufbau eines Spektralradiometers erläutert werden. Diese werden teilweise für Messungen zum Zweck der Rückführung verwendet, unterscheiden sich aber auch wesentlich von den Radiometern, die zur bodenbasierten Bestimmung von atmosphärischen Aerosoleigenschaften verwendet werden.

4.5.1. Spektralradiometer

Das Instrument zur Messung des Spektralflusses wird als Spektralradiometer oder Spektorradiometer bezeichnet. Dieses Gerät misst die durchschnittliche spektrale Bestrahlungsstärke durch seine Eintrittsöffnung. Es wandelt eine Bestrahlungsstärke in ein Ausgangssignal $S(\lambda)$ um, wobei λ die Wellenlängeneinstellung des Geräts ist [27]. Der Fluss ist $\Delta\Phi = \bar{E}_\lambda \cdot \Delta A \cdot \Delta\lambda$, wobei ΔA die Fläche der Eintrittsapertur ist und $\Delta\lambda$ das Wellenlängenintervall, das vom Monochromator durchlaufen wird. Das Ausgangssignal $S(\lambda)$ wird durch eine Messung oder Kalibrierung mit einer Standardlampe in die spektrale Bestrahlungsstärke umgewandelt. Ein Spektralradiometer besteht im wesentlichen aus drei Hauptkomponenten: Eintrittsspalt, Gitter und Detektor. Die verschiedenen Komponenten des Spektralradiometers sind in Abb. 4.8 dargestellt:

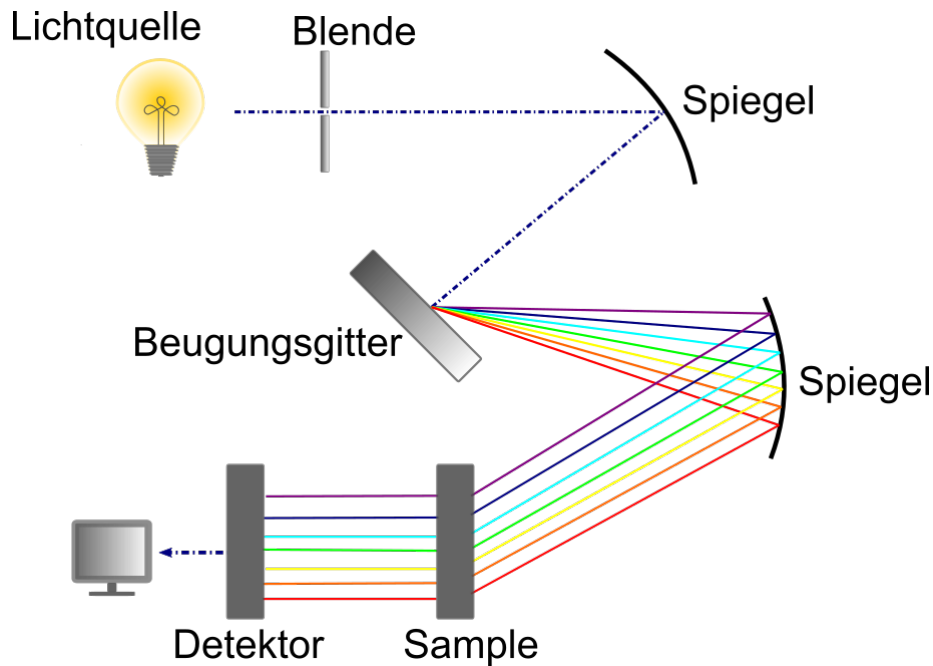


Abbildung 4.8.: Funktionsprinzip eines Spektralradiometers.

Die von der Quelle ausgehende Strahlung tritt durch eine Blende ein. Die Strahlungsmenge wird durch die Größe der Öffnung begrenzt. Je kleiner die Blende ist, desto größer ist die Auflösung des Spektralradiometers [32]. Mit Hilfe eines Spiegels wird der Strahl kollimiert, die gebündelten Strahlen werden folgend auf ein Beugungsgitter gelenkt und in einzelne Wellenlängen aufgespalten. Im Monochromator findet optische Dispersion statt, ähnlich wie in einem Prisma oder der Beugung an Beugungsgittern, um eine bestimmte Lichtwellenlänge auszuwählen zu können. In manchen Spektralradiometern finden sich anstelle von Gittern oder Monochromatoren auch Prismen für die Aufspalten in Wellenlängen. Im Spektralradiometer wird der Strahl nach dem Auftreffen auf das Gitter wieder divergent und wird durch einen zweiten Spiegel fokussiert und auf den Detektor gerichtet. Dieser misst die Strahlungsintensität in Abhängigkeit der Wellenlänge.

Es existieren mehrere mögliche Realisierungen von Spektralradiometern. Die drei am Häufigsten verwendeten basieren auf einem Czerny-Turner-Aufbau (*Czerny, Turner 1930*), einem gekreuzten Czerny-Turner Aufbau oder einer Direktabbildung mit gekrümmten Gittern [32].

4.5.2. Filtrerradiometer

Alternativ zur Verwendung eines Spektralradiometers können Messungen der radiometrischen Größen in engen spektralen Intervallen mit Hilfe von Filtrerradiometern durchgeführt werden. Bei dieser Art von Radiometern werden spektral schmalbandige Filter anstelle eines Monochromators verwendet.

Die im AERONET verwendeten Cimel-Radiometer messen nicht spektral aufgelöst, sondern integral in Bändern. Die verschiedenen Bänder werden dadurch realisiert, dass zwei Detektoren und neun Filter verwendet werden können, vgl. Abschnitt 4.6.

Historisch sind gitterbasierte Systeme, die diese Voraussetzungen erfüllen, eher unhandlich und nicht wetterbeständig, zusätzlich sehr teuer. Da die Systeme von CIMEL diese Beschränkungen überwinden, wurde im AERONET entschieden, diese Systeme für das Netzwerk festzulegen, da sie die Ableitungen der Aerosoleigenschaften aus den Messungen der direkten Sonnenmessungen ermöglichen [5]. Für die routinemäßige Überwachung der aerosoloptischen Eigenschaften ist es zudem zielführend, ein automatisiertes Instrument als Standard festzulegen. Zum Zeitpunkt der Festlegung auf das Cimel-Radiometer 1992 war diese Art von Radiometer die bestmögliche Lösung [5]. Mittlerweile werden auch gitterbasierte Spektralradiometer entwickelt, die den Ansprüchen der bodengestützten Aerosolüberwachung genügen, diese sind jedoch bisher nicht im AERONET implementiert. Im Kapitel 4.6 wird eine Übersicht über das verwendete Cimel-Radiometer und das AERONET gegeben, in dem auch auf die Funktionsweise des Geräts eingegangen wird.

4.5.3. Charakterisierung und Kalibrierung von Radiometern

Zur Charakterisierung von Radiometern gehört die Bestimmung ihrer optoelektronischen, mechanischen und umgebungsbedingten Eigenschaften. Die zu charakterisierenden Eigenschaften sind u. a. [56, 57]:

- Spektrale Empfindlichkeit
- Integrale Empfindlichkeit
- Referenzebenen
- Field of View
- Thermische Empfindlichkeit
- Polarisationsempfindlichkeit
- Linearität

Spektrale Empfindlichkeit

Die spektrale Empfindlichkeit beschreibt, wie stark ein optisches System, wie z. B. ein Radiometer, auf Strahlung unterschiedlicher Wellenlängen reagiert. Die spektrale Charakterisierung eines Filtrerradiometers bezweckt die spektralen Antwortfunktionen der einzelnen Bänder und den Out-of-Band-Response (engl. *Out-of-Band*, kurz: *OoB*), also dem Wellenlängen oder Frequenzen, die nicht im gewünschten Durchlassbereich liegen, von Filtrerradiometern oder Streulicht in spektralen Radiometern zu ermitteln. Diese Charakterisierungen setzen voraus, dass die Sensorapertur von einer monochromatischen Quelle

ausgefüllt wird. Bei Strahlungssensoren kann ein vor dem optischen Fenster angebrachter Diffusor verwendet werden, um das Field of View des Instruments gleichmäßig zu füllen. Dazu werden speziell für Filtradiometer, so wie sie im AERONET verwendet werden, die spektrale Bandpassfunktion sowie OoB-Charakterisierungen durchgeführt. Bei der Verwendung des immer gleichen Strahlers werden die spektralen Empfindlichkeiten benötigt. Bei verschiedenen Strahlern genügen jedoch die normierten Bandpassempfindlichkeiten, da eine Messung eine Faltung aus dem Bandpass und des gemessenen Spektrums darstellt. OoB-Strahlung kann jedoch sowohl bei der Kalibrierung als auch beim Betrieb der Radiometer im Feld einen erheblichen Einfluss haben. Da die Kalibrierquellen in der Regel viel mehr Fluss im roten als im blauen Bereich aufweisen, besteht das Problem bei der Kalibrierung darin, dass langwelliges Licht aus dem Band gestreut oder in die Kanäle mit kürzerer Wellenlänge übertragen wird [56]. Auch die durch Filter oder andere optische Komponenten nicht blockierte Fluoreszenz muss als zusätzliche mögliche Lichtquelle in Betracht gezogen werden.

Gleichbedeutend mit der OoB-Response bei multispektralen Radiometern ist Streulicht ein großes Problem bei Radiometern, die mit Quellen kalibriert werden, die eine andere Spektralverteilung als das natürliche Licht aufweisen. Die Charakterisierung des Streulichts erfordert die Bestimmung der spektralen Verteilungsfunktion der Streulichtantwort über den gesamten Spektralbereich der Spektralradiometer.

Integrale Empfindlichkeit

Die integrale Empfindlichkeit eines Spektralradiometers bezieht sich auf die Fähigkeit des Geräts, die Gesamtheit der Strahlungsintensität über einen bestimmten Spektralbereich zu messen, anstatt einzelne Wellenlängenpunkte zu analysieren. Diese Radiometer werden oft für spezifische Anwendungen optimiert, indem Filter und Detektoren mit selektiver spektraler Empfindlichkeit eingesetzt werden. Bei einer integralen Messung ist die spektrale Empfindlichkeit des Detektors oft so angepasst, dass sie über einen breiten Bereich annähernd gleichmäßig ist. Integrale Messungen sind oft einfacher und schneller als spektrale Messungen. Verwendet werden dafür meist breitbandige und räumlich ausgedehnte Strahlungsquellen, wie z.B. Lampen. Im Gegensatz zu Messungen der spektralen Empfindlichkeit können jedoch keine Informationen über die einzelnen Bestandteile des gemessenen Bereichs gewonnen werden, wie z. B. Verschiebungen des Bandpasses.

Referenzebenen

In vielen Anwendungen gilt bei der Messung der spektralen Bestrahlungsstärke das Gesetz des umgekehrten Abstandsquadrats, vgl. Abschnitt 4.1. Für deren Messung muss der Strahler in einem bestimmten Abstand aufgestellt werden. Dieser entspricht jedoch unter Umständen nicht dem tatsächlichen Abstand zwischen dem Ursprung der zu messenden Strahlung und dem Teil des Radiometers, der die Fläche für einfallende Strahlung räumlich begrenzt.

Eine Referenzebene ist die effektive Strahlungseintrittsfläche des Radiometers. Diese entsteht beispielsweise durch eine im Radiometer verbaute Blende. Die Kenntnis der Referenzebene dient somit als Grundlage für die Kalibrierung und die Messung der spektralen Bestrahlungsstärke.

Field of View

Mit Ausnahme von Sensoren mit einem sehr kleinen Sichtfeld (englisch: *field of view*, kurz *FOV*), d. h. typischerweise kleiner als 1° , wird die Bestimmung des FOV durchgeführt, indem das Instrument auf einem Drehtisch betrieben wird, wobei die Eingangsöffnung des Radiometers mit der Drehachse ausgerichtet ist. Eine Lichtquelle, meist einer Lampe, wird in einigen Metern Entfernung vor dem Instrument platziert. Der Abstand hängt vom Sichtfeld des Radiometers und der Größe des Glühfadens ab, muss aber so groß sein, dass die scheinbare Größe des Glühfadens nur einen kleinen Teil des Sichtfelds des Radiometers ausmacht. Die mechanische Ausrichtung auf die Achse kann mit der Oberfläche des optischen Fensters als Referenz erfolgen, indem ein Justierlaser verwendet und auf den Rückreflex ausgerichtet wird. Die Daten sollten idealerweise in Schritten von etwa $1/20$ des geschätzten FOV über zwei Ebenen mit einer Positionierungsunsicherheit von weniger als $1/10$ des Schrittabstands erfasst werden [56].

Thermische Empfindlichkeit

Die verschiedenen Komponenten eines Radiometers können temperaturabhängig sein. Beispielsweise weisen Siliziumdetektoren, die auch bei den AERONET-Radiometern eingesetzt werden, eine Temperaturabhängigkeit im nahen Infrarotspektrum auf. Ohne Temperaturstabilisierung kann es daher zu Veränderungen des Dunkelsignals und der Empfindlichkeit des Radiometers kommen. Aus diesem Grund müssen Radiometer einer umfassenden Temperaturcharakterisierung unterzogen werden. Mögliche Änderungen der Empfindlichkeit in Abhängigkeit von der Temperatur müssen individuell für das gesamte Spektrum bestimmt werden. In der Regel findet die Temperaturcharakterisierung in einer temperaturkontrollierten Kammer statt, das Radiometer wird mit Blick auf eine stabile Quelle positioniert [5]. Diese Messungen entsprechen im Fall der AERONET-Radiometer einer integralen Bestimmung von Temperaturkoeffizienten, die später für die Korrektur der Messwerte verwendet werden. Sowohl die Kammer- als auch die Innentemperatur des Geräts sollten gemessen werden, um thermische Gleichgewichtsbedingungen im Gerät zu ermitteln, die Messungen unter stabilen Bedingungen ermöglichen. Dieses Verfahren sollte die Durchführung von Messungen ermöglichen, wenn sich alle Komponenten des Radiometers thermisch stabilisiert haben.

Polarisationsempfindlichkeit

Das Ausgangssignal eines Radiometers kann von den Polarisationsbedingungen der gemessenen Strahlung abhängen. In diesem Fall ändert sich das Ausgangssignal, wenn die linear polarisierte parallel einfallende Strahlung um die Einfallrichtung gedreht wird.

Für die Messung der Polarisationsabhängigkeit wird eine Punktquelle benötigt, vor die ein Polarisator positioniert wird. Dieser kann um die Einfallrichtung gedreht werden um die Lage der Polarisationsebene zu verändern. Während der Polarisator gedreht wird, werden die maximalen Ausgangssignale Y_{max} und minimalen Ausgangssignale Y_{min} gemessen. Diese Messungen müssen bei mindestens zwei Azimutwinkeln Φ , die sich um 90° unterscheiden gemessen werden. Die Charakteristik wird beschrieben durch einen Index f , der den Einfluss polarisierter Strahlung auf die Empfindlichkeit des Radiometers beschreibt und ist gegeben durch [57]:

$$f = \frac{Y_{max}(\epsilon\Phi) - Y_{min}(\epsilon\Phi)}{Y_{max}(\epsilon\Phi) + Y_{min}(\epsilon\Phi)} \quad (4.21)$$

ϵ ist dabei der Eintrittswinkel von der optischen Achse aus gemessen.

Nichtlinearität

Nichtlinearität beschreibt das Verhältnis zwischen dem Messwert und der Eingangsgröße in Abhängigkeit von der Eingangsgröße. Nichtlinearität beschreibt ein System oder eine Funktion, bei der Ausgang und Eingang nicht direkt proportional sind, als die Beziehung nicht durch eine einfache Gerade $f(x) = ax + b$ dargestellt werden kann, sondern durch $f(x) = a(x)x + b$. Linearität beschreibt das Verhältnis zwischen dem Messwert und der Eingangsgröße. Linearität bei Radiometern bedeutet, dass das Ausgangssignal proportional zur einfallenden Strahlungsleistung ist [57]. Die Standardmethode zur Charakterisierung der Linearität von Radiometern wird mit einer Punktquelle und der Anwendung des Gesetzes des Abstandsquadratgesetzes durchgeführt, indem der Abstand zwischen Quelle und Detektor verändert wird. Durch eine solche Messung kann auch die Referenzebene des Radiometers bestimmt werden, die zwingend für die Linearitätscharakterisierung, aber auch für Bestrahlungsstärkemessungen notwendig ist. Zur Bestimmung der Linearität wird das Signal Y_i einer bekannten Strahlquelle mit X_{λ_i} gemessen [58]. Verschiedene Faktoren können dadurch erreicht werden, dass der Eingangswert X_i bei gleicher Integrationszeit immer weiter reduziert wird oder der Eingangswert X_i konstant bleibt und die Integrationszeit des Radiometers variiert wird.

4.6. AErosol RObotic NETwork

Das AErosol RObotic NETwork (kurz: *AERONET*) ist ein Netz von bodenbasierten Radiometern zur Messung von atmosphärischen Aerosoleigenschaften, das von der National Aeronautics and Space Administration (kurz: *NASA*) und PHOTONS (PHOtométrie pour

le Traitement Opérationnel de Normalisation Satellitaire, Univ. of Lille, CNES, und CNRS-INSU) ins Leben gerufen wurden [59]. Ergänzt wird AERONET durch kleinere Netze wie zum Beispiel RIMA, AeroSpan, AEROCAN, NEON und CARSNET, Universitäten und einzelnen Wissenschaftlern und Partnern. Das Netzwerk liefert eine langfristige, kontinuierliche und öffentlich zugängliche Datenbank zu Strahlungseigenschaften von Aerosolen für die Aerosolforschung und Charakterisierung von Aerosolen. PHOTONS ist die französische Komponente des AERONET, das weltweit verteilte Nahezu-Echtzeit-Beobachtungen der spektralen optischen Tiefe von Aerosolen und der Strahldichte des Himmels sowie abgeleitete Parameter wie Partikelgrößenverteilungen, einfach streuende Albedo und komplexen Brechungsindex liefert.

Die Zuverlässigkeit der Messungen hängt in erster Linie von der Genauigkeit der Kalibrierung ab. Die Kalibriervorgaben werden von *Holben* beschrieben [5], sowie für PHOTONS von *Goloub* [60]. Innerhalb des Netzwerks werden die Kalibrierungswerte für die direkte Sonne zur Bestimmung der optischen Dichte (engl.: *Aerosol Optical Depth*, kurz:AOD) und die Strahldichte an verteilten Kalibrierstandorten gemessen. Die historisch erste Kalibrierstation ist das Goddard Space Flight Center der NASA (kurz: *GSFC*), die direkte Sonnenkalibrierungen und Kalibrierungen von Ulbricht-Kugeln verwaltet. Darüber hinaus unterhält die NASA sogenannte „Master-Instrumente“ und bestimmt die extraterrestrischen Konstanten auf am Mauna Loa Observatorium auf Hawaii.

AERONET-Radiometer Cimel CE318-T

Das im AERONET verwendete Radiometer Cimel CE318-T, im Netzwerk als „Sonnenphotometer“ bezeichnet, ist so konzipiert, dass sowohl am Tag als auch in der Nacht radiometrische Messungen durchgeführt werden können [5]. Die Geräte wurden 1992 von der französischen Firma Cimel Electronique [61] für die NASA entwickelt und stets weiter verbessert, um den wachsenden Anforderungen des AERONET gerecht zu werden. Es wurde nach einer Validierung im Jahr 2015 beschlossen, nur noch Messgeräte vom Typ CE318-T für die Neuaufnahme in das AERONET zu akzeptieren [62], sowohl die Master-Instrumente auch als die Feld-Instrumente sind von diesem Typ. Es ist mit diesem Gerät möglich, die wesentlichen optischen Eigenschaften wie die AOD, die Volumengrößenverteilung, den komplexen Brechungsindex, den Formfaktor und den Wasserdampfgehalt zu ermitteln [63]. Durch die Verwendung zweier Detektoren in einem Gerät ist es möglich, einen spektralen Bereich zwischen 340 nm und 1640 nm zu vermessen. Diese finden bei einem nominellen FOV von $1,29^\circ$ bei 10 Nennwellenlängen von 1020 nm, 937 nm, 870 nm, 675 nm, 500 nm, 440 nm, 380 nm und 340 nm unter Verwendung einer Silizium-Photodiode (Si), sowie zusätzliche Messungen bei 1020 nm und 1640 nm mit einem Indium-Gallium-Arsenid-Detektor (InGaAS), um aerosoloptische, atmosphärische und Oberflächeneigenschaften optimal bestimmen zu können.

Die Nennwellenlängen wurden für die Erfassung von Aerosolgrößenverteilungen, der Ab-

schätzung von Wasserdampf und der Minimierung der Gasabsorption abgestimmt. Die Kanäle 340 nm und 380 nm sind empfindlich auf kleine Partikel (z. B. städtische Verschmutzung) sowie Ozonabsorption. Längere Wellenlängen (870 nm-1640 nm) reagieren stärker auf größere Partikel (z. B. Wüstenstaub, Seesalz). Die Messung bei mehreren Wellenlängen ermöglicht die Berechnung des Ångström-Exponenten, einem Maß für die Partikelgröße [64]. 937 nm liegt im Absorptionsband von Wasserdampf, so wird die Bestimmung der Wasserdampf-Säulenmenge ermöglicht. Um diese richtig zu quantifizieren, braucht man benachbarte „nicht-absorbierende“ Wellenlängen 870 nm und 1020 nm als Referenz. Die Kanäle liegen in Bereichen mit minimaler Absorption durch Gase (wie O_2 , O_3 , H_2O). Auf diese Weise wird die Streuung an Aerosolen und nicht an Gasen gemessen [65, 66], was nicht Teil dieser Arbeit ist.

Das Cimel CE318-T nutzt Interferenzfilter mit 10 nm Halbwertsbreite, wobei der Kanal bei 340 nm eine Breite von 2 nm hat und der Kanal bei 380 nm eine Breite von 4 nm. Der Aufbau des Sensorkopfes ist in Abbildung 4.9 gezeigt.

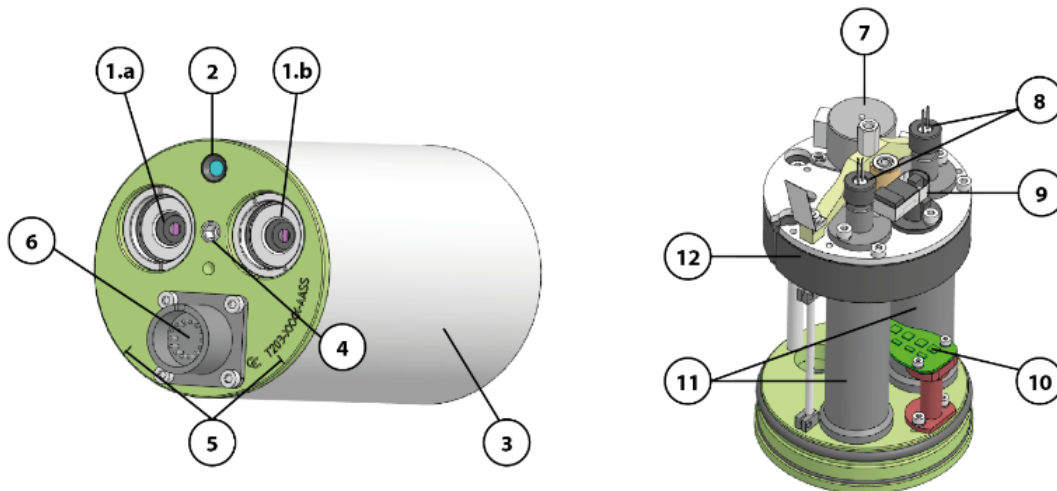


Abbildung 4.9.: Aufbau des Cimel 318-7T Sensorkopfes (links) sowie des inneren Aufbaus (rechts).

1a, b: Frontplattenlinsen und optische Kammern, 2: Vier-Quadranten Detektorlinse, 3: Außenabdeckung, 4: Gewindebohrung für Streulichttubus, 5: Positionskerben, 6: Kabelanschluss für Kopfsensor, 7: Schrittschaltmotor, 8: Detektoren, 9: Filterrad detektor, 10: Vier-Quadrant-Sensor, 11: Optische Kammern, 12: Filterradhalterung [67].

Das Cimel-Radiometer arbeitet mit zwei verschiedenen Photodioden, was sich in der Empfindlichkeit in Abhängigkeit von der Wellenlänge begründen lässt. Verbaut sind Si-Photodioden vom Typ S1336 und InGaAs-Photodioden vom Typ G17192 [68].

Um einen Überlapp des Messbereichs der beiden Dioden zu erhalten sowie um Abweichungen und mögliche Unstimmigkeiten erkennen zu können, arbeitet das Cimel-Radiometer im 1020 nm-Kanal mit beiden Dioden. Zu erwarten ist eine bessere Stabilität bei Messungen

mit der InGaAs-Photodiode in diesem Bereich. Dies wird sich auch in der Charakterisierung bei Temperaturvariationen zeigen, da das Gerät nicht temperaturstabilisiert ist und dahingehend Korrekturen angewendet werden müssen, vgl. Abschnitt 5.4.

Die Auswirkung der Temperatur auf die Messungen von Radiometern ist ein wohlbekanntes Problem. Entscheidend dabei ist das Verhalten von Dioden, Filtern und der verbauten Elektronik des Radiometers. Einige Modelle lösen dieses Problem, indem sie die Temperatur im Inneren des Geräts stabilisieren. Die Geräte, die eine konstante Temperatur gewährleisten, weisen jedoch einen hohen Stromverbrauch auf, während das Cimel-Radiometer sich durch seine Autonomie auszeichnet. Diese Eigenschaft wurde erfolgreich genutzt, da mehrere dieser Sonnenphotometer an abgelegenen Orten installiert wurden und ordnungsgemäß funktionieren. Das Cimel ist mit einem internen Temperatursensor ausgestattet, um die Messungen später zu korrigieren, und enthält keine Thermostate.

Für das Cimel-Radiometer ist demnach eine Korrektur für den 1020 nm-Kanal zu erwarten, da die Empfindlichkeit des verwendeten Diodentyps in diesem Wellenlängenbereich deutlich abnimmt [69]. Die Korrekturen werden in Kapitel 5.4 in einem Temperaturbereich von -35°C bis 50°C bestimmt.

Die Temperaturkorrektur im AERONET wurde lange Zeit mit denselben Standardkoeffizienten für alle Radiometer des Netzes durchgeführt [5]. Diese Tatsache stellt eine Einschränkung dar, wenn es darum geht, die Qualität der AOD-Daten im AERONET zu verbessern. Um eine bessere Datenqualität zu erhalten, haben das Goddard Space Flight Center (kurz: *GSFC*) und PHOTONS damit begonnen, die Temperaturabhängigkeit jedes einzelnen Radiometers durch Labormessungen in einer temperaturkontrollierten Kammer systematisch zu charakterisieren [70]. Durch gezielte Variation der Temperatur können mit diesen Messungen Temperaturkoeffizienten integral bestimmt werden.

Das Cimel-Radiometer ist speziell darauf ausgelegt, präzise photometrische Messungen von Sonnen- und Himmelsstrahlung durchzuführen, um z. B. Aerosol-Optische Dicke (AOD) zu bestimmen. Das optische Design des Cimel besteht im Wesentlichen aus einem vereinfachten Köhler-Design [71]. Abbildung 4.10 zeigt den schematischen Aufbau des Cimel CE 318-T.

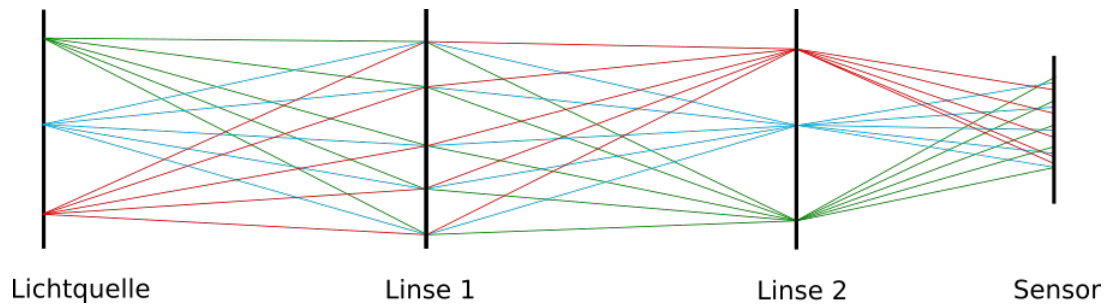


Abbildung 4.10.: Optisches Design der Cimel-Radiometer. Das System ist eine vereinfachte Form des Köhler-Designs [68]. Die Farben repräsentieren dabei unterschiedliche Ausgangspunkte der Strahlungsquelle.

Die Vorteile dieser Anordnung bestehen darin, dass es ein sehr einfaches und robustes Design ist. Es ergibt sich dadurch eine gute Achromatizität und eine homogene Verteilung auf dem verwendeten Sensor. Für die metrologische SI-Rückführung der Netzwerkradiometer ist auch eine genaue Kenntnis der Eigenschaften der im AERONET verwendeten Radiometer elementar. Für den späteren Vergleich verschiedener Kalibriermethoden ist es unerlässlich, das Gerät bezüglich seiner Temperaturstabilität, der Referenzebenen, Bandpassfunktionen und des Sichtfeldes zu untersuchen, vgl. *Taylor, Greenwell and Woolliams* [72].

5. Charakterisierung des Cimel CE 318-T

Im Rahmen des EMPIR-Projektes „Metrology for aerosol optical properties“ (kurz: *MAPP*) wurden drei Radiometer des Typs Cimel CE318-T charakterisiert, welche im AERONET Europe verwendet werden, vgl. Abschnitt 4.6. Diese Charakterisierung gibt unter anderem Aufschluss über die Anforderungen, die eine LED-basierte Quelle als Referenz- bzw. Kalibrierquelle für diesen Radiometertyp erfüllen muss. Die Charakterisierung umfasste die Kalibrierung bezüglich spektraler Bestrahlungsstärke und Abstandsvariation zur Bestimmung der Referenzebenen, was am TULIP-Setup durchgeführt wurde. Am Beispiel des Cimels #1270 wurde zur Verifizierung zusätzlich eine Abstandsvariation an der Photometerbank durchgeführt. Während im Außeneinsatz die automatischen Messmodi des Geräts, vgl. Abschnitt 4.6, verwendet werden, werden für die Laborkalibrierungen Einzelmessungen durchgeführt.

Das Cimel-Radiometer ist mit neun Filtern ausgestattet, wodurch die Messungen in neun verschiedenen Kanälen ermöglicht werden. Die Bandpassfunktionen dieser Filter sind für die Bestimmung der Empfindlichkeit, aber auch für die Auswahl von LEDs für eine neue Quelle von großer Bedeutung.

Eine weitere Eigenschaft, die für die spätere Rückführung auf das internationale Einheitensystem SI und den Vergleich der verschiedenen Kalibriermethoden benötigt wird, ist das Sichtfeld des Geräts. Zwar wurde innerhalb des EMPIR-Projekts am Physikalisch-Meteorologischen Observatorium Davos/ World Radiation Center (kurz: *PMOD/WRC*) eine Bestimmung des FOV durchgeführt, jedoch wurde ein Messplatz aufgebaut, um weitere Unsicherheitsquellen dieser Messungen zu verifizieren.

Elementar für die Bestimmung der spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit ist die Kenntnis der Referenzebenen.

5.1. Referenzebenen

Die Position der Referenzebene, also der effektiven Strahlungseintrittsfläche des Radiometers, bestimmt die Position der Bestrahlungsstärkemessung. Unvollständige Kenntnis der tatsächlichen Lage der Referenzebene kann zu erheblichen Messfehlern führen, wenn Kalibrierung und Messung des Radiometers in unterschiedlichen Entfernungen von der Strahlungsquelle erfolgen. Bei praktischen Messungen wird häufig ein Abstand zwischen ausgewählten Hilfsebenen einer Lampenfassung, z. B. einem Jig, und der Frontfläche des Detektors bestimmt. Aus der Variation dieses Abstands kann mit Hilfe des Abstandsquadratgesetzes bei bekanntem Bestrahlungssignal der Offset und damit der tatsächliche Abstand zwischen Strahler und begrenzender Eingangsapertur des Radiometers bestimmt

werden.

Für einen punktförmigen Strahler gilt:

$$E \propto \frac{1}{r^2}. \quad (5.1)$$

Darüber hinaus gilt der Zusammenhang näherungsweise auch, wenn die Ausdehnung der Quelle klein im Vergleich zum Abstand ist [73].

Die Referenzebenenbestimmung kann vereinfacht werden, wenn die Messung relativ gegen einen Detektor erfolgt. Dabei werden die Verhältnisse der gemessenen Signale des bekannten Detektors und des Empfängers verglichen, dessen Referenzebenen bestimmt werden sollen, vgl. Abschnitt 5.1.2.

Die Bestimmung der Referenzebenen des Cimel-Radiometers wurde zunächst über die Anwendung des Photometrischen Entfernungsgesetzes durchgeführt, welche im nächsten Abschnitt beschrieben wird.

5.1.1. Bestimmung der Referenzebenen über Variation des absoluten Abstands

Der Zusammenhang und die Symmetrie zwischen Strahler und Empfänger drücken sich im photometrischen Grundgesetz aus [29]:

$$d\Phi = L \frac{\cos(\epsilon_1)\cos(\epsilon_2)}{r^2} dA_1 dA_2 d\Omega. \quad (5.2)$$

Im photometrischen Grundgesetz wird berücksichtigt, dass die Strahldichte L auf der strahlenden Fläche A_2 mit dem Neigungswinkel ϵ_1 variieren kann, und dass sich die Flächenelemente in Abstand und Neigungswinkel ändern können.

Für die Bestimmung der Referenzebenen über das Abstandsquadratgesetz wird ein Aufbau mit punktförmiger Strahlungsquelle benötigt, auf dem geometrische Abstände eingestellt und verändert werden können [30]. Bei Annahme eines punktförmigen Strahlers und dass die Strahlung senkrecht auf die Eingangsoptik des Radiometers treffen, also $\Theta = 0^\circ$ gilt, lässt sich das photometrische Gesetz vereinfachen zu

$$E = \frac{I \cdot \cos(\Theta)}{r^2} \quad (5.3)$$

mit der Bestrahlungsstärke E , der Strahlstärke I und dem Abstand r zum quadratischen Abstandsgesetz vereinfachen [29]. Die Bestrahlungsstärke E eines punktförmigen Strahlers ist umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes r . Mit der Definition der Bestrahlungsstärke, s. Tabelle 4.1, lässt sich dies vereinfachen zu Gleichung 5.1. Dies ermöglicht eine näherungsweise Bestimmung der Referenzebenen.

Für die Bestimmung der Referenzebenen an der Photometerbank wurde eine Strahlquelle verwendet, die eine genau definierte Austrittsfläche besitzt, was durch eine Ulbricht-Kugel mit einer Blende am Auslassport und eine Lampe als Strahler gewährleistet wird, s. Abbildung 5.1.

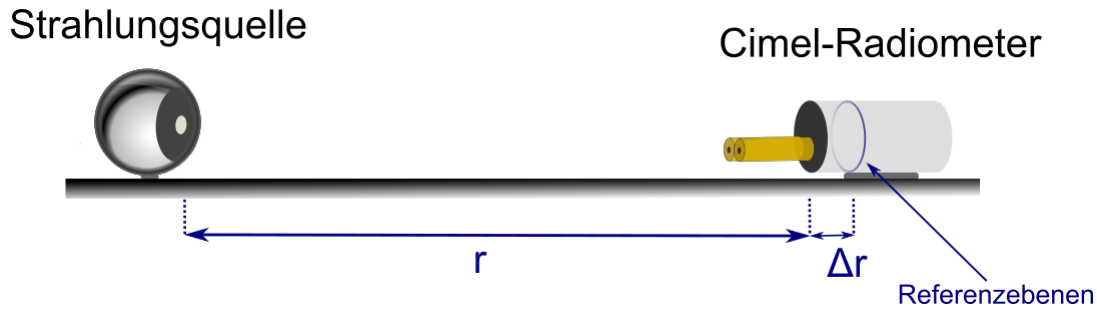


Abbildung 5.1.: Schematischer Aufbau zur Bestimmung der Referenzebenen an der Photometerbank. Der Abstand r zwischen der Strahlungsquelle und dem Cimel Radiometer wird dabei variiert.

Der Abstand zwischen Strahler und Radiometer wurde variiert. Dabei ist zu beachten, dass die Abstände zwischen der Stirnseite des Radiometers und der Blende des verwendeten Kugelstrahlers. Da die Lage der begrenzenden Blenden hinter der Stirnseite des Radiometers im Gerät liegt, muss von einer Verschiebung Δr ausgegangen werden. Für die Auswertung ergibt sich [26]:

$$I(r) - D(r) = K \frac{L(r)}{(r + \Delta r)^2}, \quad (5.4)$$

mit dem Umrechnungsfaktor K , den Messsignalen $I(r)$ und den Dunkelsignalen $D(r)$. Diese Gleichung lässt sich linearisieren, so dass die Parameter K und Δr durch lineare Regression bestimmen. Wird die Linearität des Empfängers vorausgesetzt, was in Kapitel 5.5 für das AERONET-Radiometer untersucht wird, gilt $L(r) = 0$. Diese Gleichung lässt sich linearisieren, um die Parameter K und Δr durch lineare Regression zu bestimmen:

$$r = \sqrt{K} \frac{1}{\sqrt{I(r) - D(r)}} - \Delta r \quad (5.5)$$

Graphisch aufzutragen sind gemessenen Abstände r über die gemessenen Signale $1/(I(r) - D(r))$, wodurch sich die Steigung K und der Nulldurchgang Δr bestimmen lassen.

Abbildung 5.2 zeigt am Beispiel des 440 nm-Kanals die Abhängigkeit des Signals vom Abstand. Die Auftragung des Abstands gegen die Wurzel des Signals, aus dessen Offset dann die Position der Referenzebene bestimmt wird, wird in Abbildung 5.3 dargestellt.

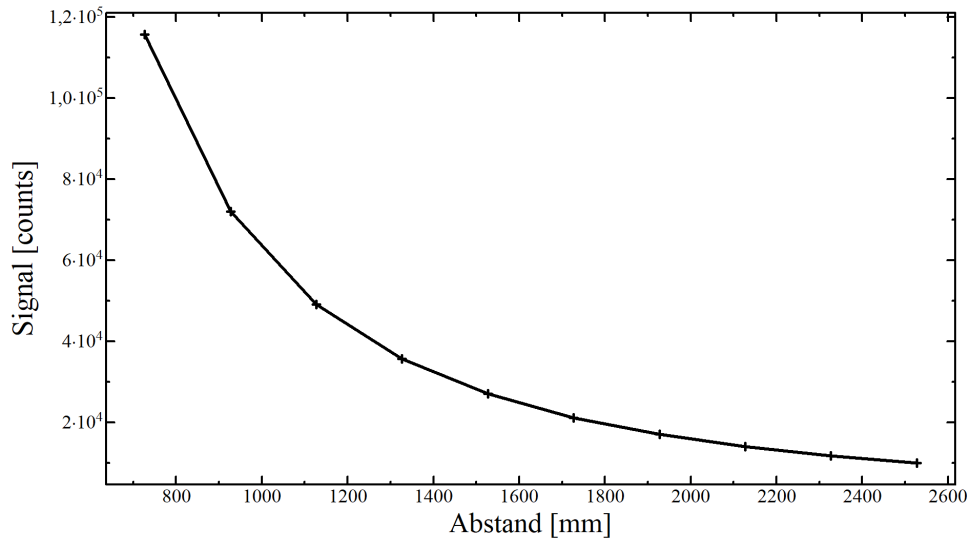


Abbildung 5.2.: Gemessene Signalwerte in Abhängigkeit des Abstands am Beispiel des 440 nm-Kanals.

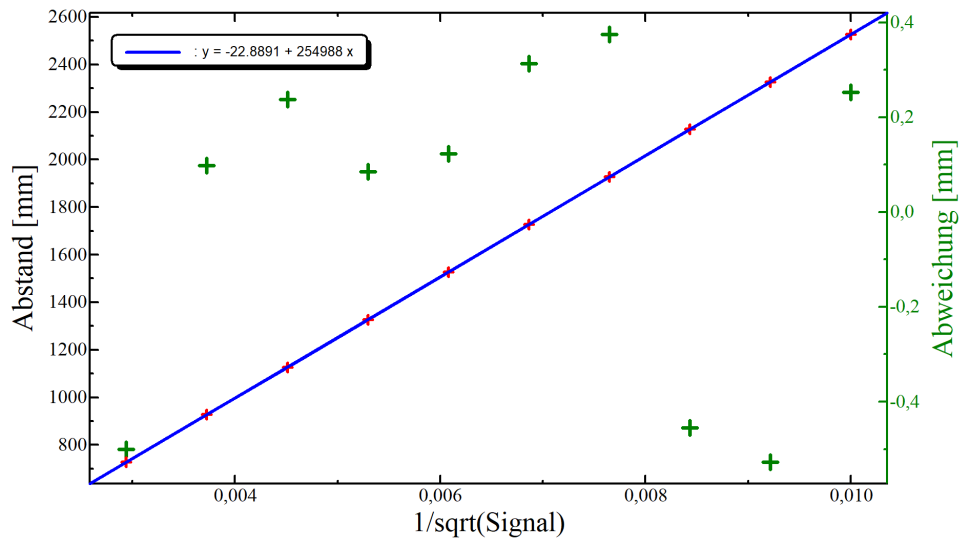


Abbildung 5.3.: Auftragung des Abstands in Abhängigkeit der Quadratwurzel des gemessenen Signals am Beispiel des 440 nm-Kanals zur Bestimmung der Referenzebene. Der y-Achsenabschnitt des Geradenfits gibt die Position der Referenzebene bzgl. der Stirnseite des Radiometers wieder. In grün ist die Abweichung des Geradenfits von der Signalfunktion gezeigt.

Auf den Wert für den y-Achsenabschnitt des Geradenfits werden noch Korrekturen für die Homogenität des Strahlungsfeldes angewandt. Gleichung 5.4 wird damit zu:

$$r = \left(\sqrt{K} \frac{1}{\sqrt{I(r) - D(r)}} - \Delta r \right) \cdot f_{hom} \quad (5.6)$$

f_{hom} berücksichtigt die Veränderung der Homogenität des Strahlungsfeldes bei unterschiedlichen Abständen. Mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulationsmethode, die auf die Messgleichung angewandt wird, werden die Unsicherheiten bestimmt. Es ergibt sich:

Cimel Channel [nm]	Referenzebene [mm]	$u_{\text{Referenzebene}}$ [mm]
Si 340	-26,1	1,7
Si 380	-26,6	1,7
Si 440	-23,9	1,6
Si 500	-21,7	1,7
Si 675	-21,1	1,7
Si 870	-20,6	1,6
Si 937	-16,4	2,1
Si 1020	-19,9	1,7
InGaAs 1020	-21,1	1,7
InGaAs 1640	-18,5	1,7

Tabelle 5.1.: Gemessene Werte und zugehörige Standardunsicherheiten für die Lage der Referenzebene in mm hinter der Stirnseite des Cimel-Radiometers.

Auffällig ist die höhere Entfernung der Referenzebene des 340 nm und des 380 nm-Kanals, sowie eine Abnahme des Wertes für die höheren Kanäle außer Si 1020. Für die beiden Kanäle bei 340 nm und 380 nm wurde wenig Signal gemessen, was auf das Spektrum des Strahlers zurückzuführen ist. Die Photosensitivität von Siliziumdioden nimmt im Bereich oberhalb von 900 nm ab [69], so dass auch dort wenig Signal gemessen werden konnte. Eine unterschiedliche Lage der Referenzebenen für die einzelnen Kanäle kann durch unterschiedliche Dicken der verwendeten Filter hervorgerufen werden. Der größte Unsicherheitsbeitrag wird durch die Standardabweichung der Messwerte des Cimel-Radiometers hervorgerufen. Während der Lampendrift mit einer relativen Änderung von $1 \cdot 10^{-3}$ pro Stunde und die Stabilität des Lampenstroms mit $1 \cdot 10^{-4}$ vergleichsweise kleine Beiträge liefern, so geht eine Abweichung im Abstand quadratisch ein. Für jeden Abstand wurden mehrere Messungen durchgeführt, so dass zum einen Reproduzierbarkeit überprüft werden konnte, zum anderen aber auch die Standardabweichung der Messwerte berechnet werden kann, die ebenso in der Messunsicherheit für das Bestimmen der Referenzebenen berücksichtigt wurde.

5.1.2. Bestimmung der Referenzebenen über einen relativen Vergleich zu einem Trap-Detektor

Die Referenzebene des Cimel-Radiometers kann alternativ durch relative Messungen gegen einen Trap-Detektor mit mechanischer Blende über das Verhältnis der Signale der beiden Empfänger durch Abstandsvariation bestimmt werden. Eine relative Bestimmung wurde

am TULIP Setup realisiert, s. Abbildung 5.4. Bei diesem Aufbau kann durch das in der Strahlaufbereitung verwendete Mikrolinsenarray nicht von einer Punktquelle ausgegangen werden, vgl. Abbildung 5.7, so dass der exakte Abstand zwischen Strahlungsquelle und Empfänger nicht bekannt ist.

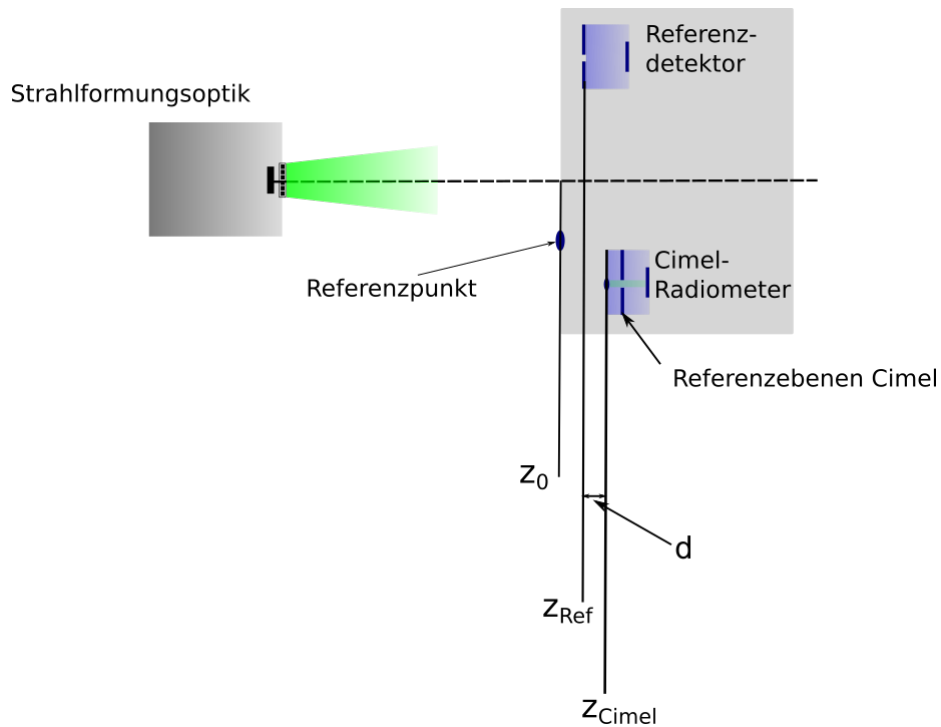


Abbildung 5.4.: Schematischer Aufbau zur Bestimmung der Referenzebenen am TULIP-Setup mit bekannten relativen Koordinaten für den Referenzpunkt z_0 , die Eintrittsebene des Trap-Detektors z_{Ref} und die Vorderseite des Cimel-Radiometers z_{Cimel} .

Am TULIP-Setup werden Empfänger relativ zu einem Referenzpunkt einjustiert, vgl. Abbildung 5.4. Die relative Position der Vorderseiten der Empfänger zum Referenzpunkt in mm sind somit bekannt.

Für die Bestimmung der Referenzebene wird zunächst der Offset zwischen der Vorderseite des Cimel-Radiometers und der Eintrittsebene des Trap-Detektors bestimmt. Zu Nutzen gemacht wird sich dabei das linearisierte photometrische Abstandsgesetz, vgl. Gleichung 5.5.

Abbildung 5.6 zeigt den Geradenfit für das Cimel-Radiometers, Abbildung 5.5 den Geradenfit für das Cimel-Radiometer am Beispiel des 675 nm-Kanals:

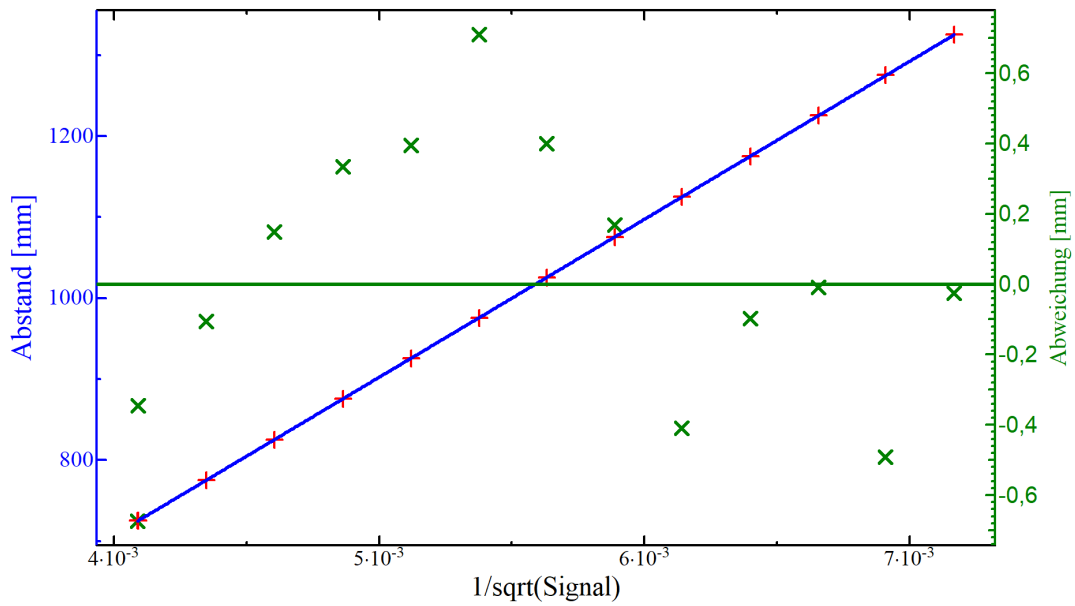


Abbildung 5.5.: Auftragung des Abstands in Abhängigkeit der Quadratwurzel des gemessenen Signals am Beispiel des 675 nm-Kanals. In grün ist die Abweichung des Geradenfits von der Signalfunktion gezeigt.

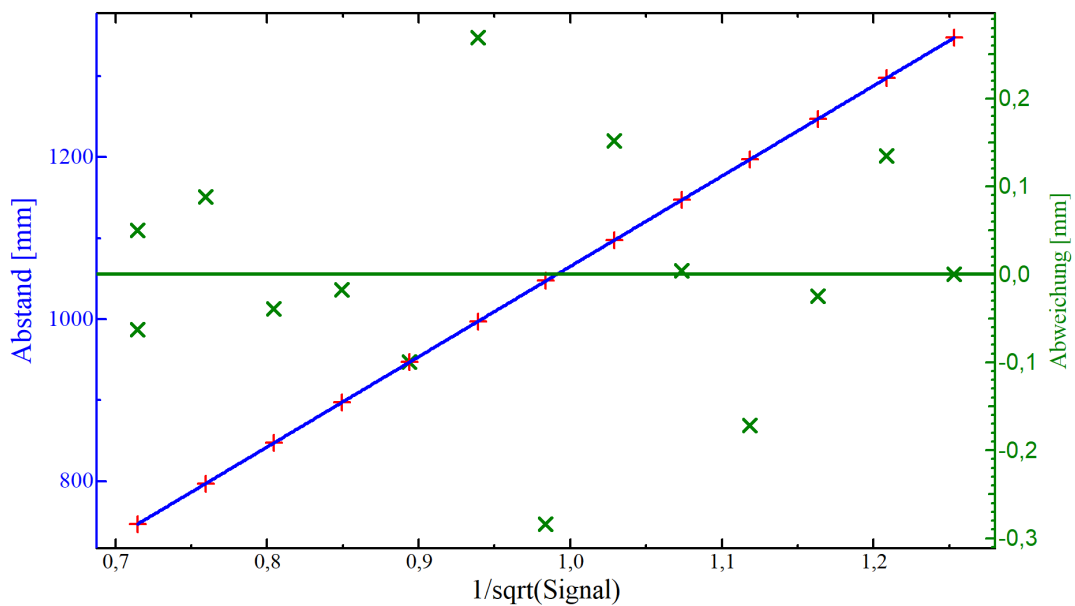


Abbildung 5.6.: Auftragung des Abstands in Abhängigkeit der Quadratwurzel des gemessenen Signals des Trap-Detektors. In grün ist die Abweichung des Geradenfits von der Signalfunktion gezeigt.

Die Differenz der y-Achsenabschnitte d gibt dabei den Abstand zwischen Vorderseite des Cimel-Radiometers und der Eintrittsebene des Trap-Detektors wieder. Damit lässt sich

der Abstand zwischen dem Cimel-Radiometer an der Vorderseite und dem Trap-Detektor bestimmen. Es gilt $d_{Cimel-Ref} = d + z_{Ref}$, vgl. Abbildung 5.4. Die Referenzebenen Δr ergeben sich aus:

$$\Delta r = (d_{Cimel-Ref} - z_{Cimel} + z_0) \quad (5.7)$$

Auf diese Weise wurden die in Tabelle 5.2 gezeigten Werte, mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulationsmethode die Unsicherheiten bestimmt.

Cimel Channel [nm]	Referenzebene [mm]	$u_{Referenzebene}$ [mm]
Si 340	-22,6	0,55
Si 380	-20,36	0,45
Si 440	-18,58	0,40
Si 500	-19,29	0,47
Si 675	-18,27	0,36
Si 870	-17,12	0,32
Si 937	-14,54	0,43
Si 1020	-18,86	0,42
InGaAs 1020	-20,58	0,52
InGaAs 1640	-18,68	0,55

Tabelle 5.2.: Gemessene Werte für die Lage und zugehörige Standardunsicherheiten der Referenzebene hinter der Stirnseite des Cimel-Radiometers am TULIP-Setup.

Vergleicht man die in Tabelle 5.2 dargestellten Werte mit denen, die an der Photometerbank bestimmt wurden, aufgeführt in Tabelle 5.1, fällt auf, dass die Werte für die kurzwelligen Si-Kanäle 340 nm bis 870 nm im Rahmen der Messunsicherheiten nicht übereinstimmen, wohingegen die Werte für die InGaAs-Kanäle im Rahmen der Unsicherheiten stimmig sind. Für die Werte um 340 nm könnte das geringe Messsignal eine Erklärung für die Abweichungen sein. Übereinstimmend ist die Abnahme der Werte für die Referenzebenen von 340 nm bis 937 nm und einem Wiederanstieg des Wertes für den Si 1020 nm-Kanal. Im Bereich des 937 nm-Kanals sind die bestimmten Werte innerhalb der Unsicherheiten passend, jedoch fällt auf, dass die am TULIP-Setup bestimmten Referenzebenen unterhalb derer liegen, die an der Photometerbank bestimmt wurden. Die Unsicherheiten setzen sich auf ähnliche Weise zusammen wie bei der Bestimmung der Referenzebenen an der Photometerbank, sind jedoch deutlich kleiner. Bei der Bestimmung der Referenzebenen am TULIP Setup kann von einer kleineren Unsicherheit für den Abstand ausgegangen werden.

Für beide Messmethoden ist zu beobachten, dass der Referenzebenenoffset keinem systematischen Muster folgt. Lediglich ein insgesamt kleinerer Referenzebenenoffset ist für den 937 nm-Kanal bei beiden Methoden zu beobachten. Für diesen Kanal liegen die bestimmten

Referenzebenen über die beiden Methoden innerhalb der Unsicherheiten.

Der Aufbau des Radiometers ist nicht im Detail bekannt, jedoch wäre aufgrund der eingebauten Linsen ein wellenlängenabhängiger Verlauf der Werte für den Referenzebenenoffset zu erwarten. Die optische Dicke einer Linse variiert in Abhängigkeit von der Wellenlänge, da der Brechungsindex wellenlängenabhängig ist. Dies führt zu verschiedenen Brennweiten für unterschiedliche Wellenlängen, was zu chromatischen Aberrationen führt. Durch die Verwendung von Filtern, vgl. Abschnitt 4.6, ist auch von Reflexionen innerhalb des Geräts auszugehen. Über die genaue Beschaffenheit der Filter, ob z. B. Keilfilter verwendet wurden, ist nichts bekannt.

Mögliche Effekte innerhalb des Radiometers erschweren die genaue Bestimmung der Referenzebenen. Diese wird jedoch in den Messungen bzgl. der spektralen Bestrahlungsstärke benötigt.

Für weitere Messungen, die auf dem Prinzip einer Bestrahlungsstärkemessung beruhen, wird von den Referenzebenen ausgegangen, die am TULIP Setup bestimmt wurden. Lediglich für Messungen des FOV wird vereinfacht angenommen, dass sich die Referenzebene für alle Kanäle 18 mm hinter der Stirnseite des Cimels befindet, da dies einen ungefähren Wert für alle Kanäle darstellt. Die Messungen an der optischen Bank weisen höhere Werte auf, jedoch decken sich die auf beide Arten bestimmten Werte innerhalb der Unsicherheiten.

Die Bestimmung der Referenzebenen über einen relativen Vergleich zu einem Trap-Detektor wurden am TULIP-Setup durchgeführt, einem durchstimmbaren Lasersystem welches im nächsten Abschnitt beschrieben wird. Durch kalibrierte Detektoren ist es an diesem Messplatz möglich, bei bekannten Referenzebenen die spektrale Empfindlichkeit und die Bandpassempfindlichkeiten eines Prüfdetektors zu bestimmen.

TUneable Lasers In Photometry (TULIP)

Die Kalibrierungen bezüglich der spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit fanden am TULIP-Setup statt, einem auf einem optischen parametrischen Oszillators (OPO) basierendem Lasersystem, der im gepulsten Modus mit einer Pulslänge von 2,5 ps und einer Wiederholrate von 80 MHz in einem Wellenlängenbereich von 230 nm – 2300 nm arbeitet [74]. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 5.7 dargestellt.

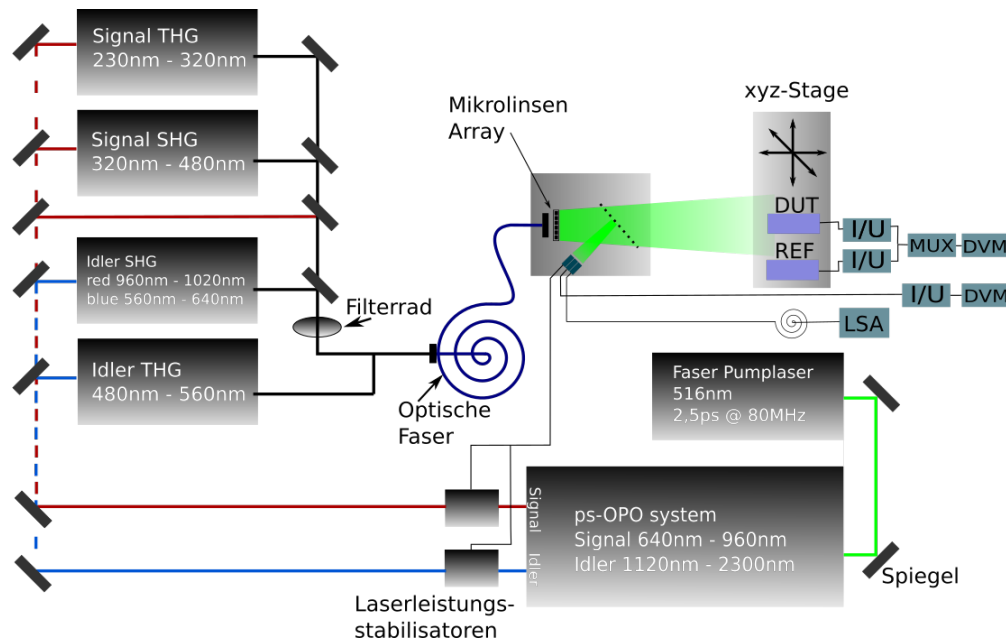


Abbildung 5.7.: Schematische Darstellung des TULIP-Aufbaus mit optischem parametrischem Oszillator (OPO) System, SHG- und THG Komponenten, variablem Neutral-Dichte-Filter auf Filterrad, Referenz (REF) und zu testendem Detektor (DUT), Strom-Spannungswandler (I/U), Multiplexer (MUX), digitalem Spannungsmessgerät (DVM) und Laser-Spektrum-Analysator (LSA).

Die Wellenlänge des Lasers ist automatisch über den gesamten Spektralbereich von 230 nm bis 2300 nm abstimmbare. Ein hochpräziser Laser-Spektrum-Analysator (LSA) überwacht die Laserwellenlänge, die während einer Messsequenz innerhalb von 10 pm stabil ist. Die spektrale Bandbreite der Laserstrahlung ist wellenlängenabhängig und schwankt zwischen 0,2 nm und 0,7 nm im sichtbaren Spektralbereich, sowie bis zu 2 nm für 1700 nm im Infrarotbereich. Ein räumlich homogenes unpolarisiertes Feld mit zeitlich stabilisierten Bestrahlungsstärkewerten wird durch eine auf einem Mikrolinsenarray basierende Strahlformungsoptik erzeugt. Die Homogenität des erzeugten Feldes liegt im Bereich von einigen Teilen in 10^{-3} , während die Amplitudenstabilität auf einem Niveau von 10^{-4} aufweist. Die Kalibrierung der spektralen Bestrahlungsstärke erfolgt durch den Vergleich des Signals eines zu prüfenden Geräts (*Englisch: Device under test, kurz: DUT*) mit dem eines Referenzdetektors (kurz: *REF*), die nacheinander an der gleichen Position bezüglich der Messebene positioniert werden. Die spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit der aus Si- und InGaAs-Photodioden bestehenden Referenzdetektoren wird für den sichtbaren bzw. nahen Infrarotbereich durch eine Kette von Kalibrierungen von einem primären kryogenen elektrischen Substitutionsradiometer und den mit den Referenzdetektoren verwendeten radiometrischen Präzisionsblenden bestimmt, vgl. Abbildung 3.1.

5.2. Spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit

Die spektrale Bandpassempfindlichkeit eines Spektralradiometers beschreibt, wie empfindlich das Gerät für Strahlung in einem bestimmten Wellenlängenbereich ist. Aus ihnen lassen sich weitere Eigenschaften ableiten, z. B. werden für die spätere Berechnung der Strahldichteempfindlichkeit aus Messungen der Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit die relativen spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeiten für die einzelnen Kanäle benötigt, vgl. Kapitel 6.1. Die relativen spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeiten der einzelnen Kanäle werden durch eine Normierung der spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeiten auf das Integral über den Messbereich erreicht.

Die spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit ist zum einen für die Kalibrierung des Geräts essentiell, wird aber zusätzlich auch für die Entwicklung und Charakterisierung der LED-basierten Strahldichtequelle verwendet, vgl. Kapitel 7. Im Falle der LED-Quelle werden die LED-Spektren mit spektralen Empfindlichkeiten verglichen, um eine optimale Ausfüllung der Kanäle zu erreichen.

Das Cimel-Radiometer ist mit neun Filtern ausgestattet, die je nach Messung vor den Detektor gefahren werden können. Für die einzelnen Kanäle gilt es, die relativen spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeiten zu bestimmen. Diese werden für einen späteren Vergleich von integraler und spektraler Bestrahlungsstärkeempfindlichkeitskalibrierung benötigt, aber auch zum Vergleich mit den LEDs, die für eine LED-basierte Strahldichtequelle gewählt werden, s. Kapitel 7.1. Die Bestimmung der spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeiten wurden am TULIP-Setup durchgeführt.

Die spektrale Bestrahlungsempfindlichkeit s_E ergibt sich aus der Messgleichung:

$$s_E(\lambda) = \frac{(U_{DUT}(\lambda) - U_{DUT,dark}(\lambda)) \cdot (U_{Mon,REF}(\lambda) - U_{Mon,REF,dark}(\lambda))}{(U_{REF}(\lambda) - U_{REF,dark}(\lambda)) \cdot (U_{Mon,DUT}(\lambda) - U_{Mon,DUT,dark}(\lambda))} \cdot \frac{R_{REF}}{R_{DUT}} \cdot s_{\Phi,REF}(\lambda) \cdot A_{REF} \cdot f_{dist} \cdot f_{WL} \cdot f_{BW} \cdot f_{unif} \cdot f_{Temp}. \quad (5.8)$$

In der Gleichung bezeichnen $U_{DUT}(\lambda)$, $U_{REF}(\lambda)$ und $U_{MON}(\lambda)$ die gemessenen Spannungssignale der DUT-, REF, bzw. Monitordetektoren.

Die Größe R bezeichnet die jeweiligen Rückkopplungswiderstände der Transimpedanzverstärker. Transimpedanzverstärker werden entweder für die Messung sowohl des Prüflings als auch des REF oder nur für das Signal des REF-Detektors verwendet, wenn der Prüfling über eine eigene Signalverarbeitungselektronik mit einem digitalen Ausgangssignal verfügt. $s_{\Phi,REF}(\lambda)$ steht für die spektrale Leistungsempfindlichkeit des Referenzdetektors für die Fläche der mit dem Referenzdetektor verwendeten Apertur A_{REF} . f sind Korrekturfaktoren, f_{dist} für die Ausrichtung von Prüfling und REF-Detektoren in der Messebene und die Kenntnis des Abstands auf der optischen Achse zueinander, f_{WL} für die Wellenlängenstabilität und deren Unsicherheit, f_{BW} für den spektralen Bandpass des Radiometers und des Laserstrahls, f_{unif} für die räumliche Homogenität des Feldes und der Detektoren, sowie f_{Temp} für die Temperatureffekte auf die Empfindlichkeit der Detektoren. Da bei

Messungen mit dem Cimel-Radiometer keine Photostrommessung, sondern eine Messung in Geräteeinheiten (counts, kurz: *cts*) durchgeführt wird, vereinfacht sich die Messgleichung zu:

$$s_E(\lambda) = \frac{(Signal(cts) - Signal_{dark}(cts)) \cdot (U_{Mon,REF}(\lambda) - U_{Mon,REF,dark}(\lambda))}{(U_{REF}(\lambda) - U_{REF,dark}(\lambda))} \cdot R_{REF} \cdot s_{\Phi,REF}(\lambda) \cdot A_{REF} \cdot f_{dist} \cdot f_{WL} \cdot f_{BW} \cdot f_{unif} \cdot f_{Temp} \quad (5.9)$$

Die relative spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit $s(\lambda)$ kann aus der absoluten spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit $s_E(\lambda)$ bestimmt werden:

$$s(\lambda) = \frac{s_E(\lambda)}{\int s_E(\lambda) d\lambda} \quad (5.10)$$

Mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulationsmethode, die auf die Messgleichung 5.9 angewandt wird, werden die Unsicherheiten der spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeiten bestimmt.

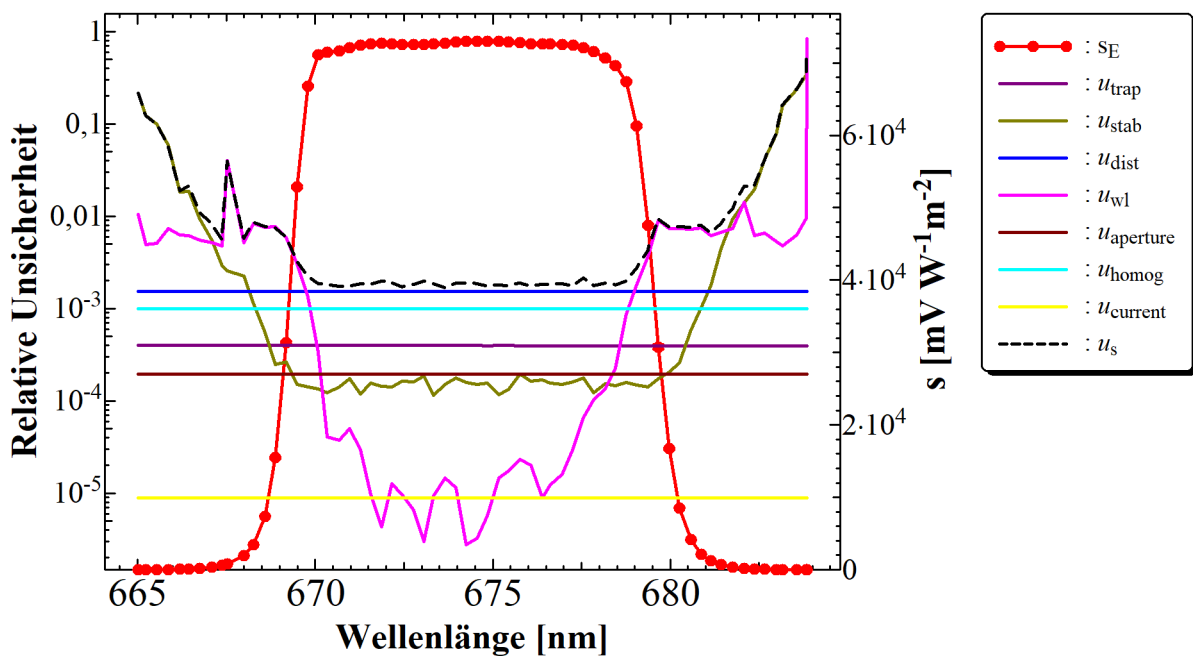


Abbildung 5.8.: Spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit s_E des 675 nm-Kanals in Abhängigkeit der Wellenlänge im in-band-Bereich mit relativen Unsicherheiten.

Abbildung 5.8 zeigt exemplarisch die Bandpassemmpfindlichkeit für den Kanal um 675 nm im in-band-Bereich, als den Wellenlängenbereich, in dem der Filter einen signifikanten Anteil der Strahlung durchlässt. Die Bandpassemmpfindlichkeiten für die weiteren Kanäle sind im

Anhang A dargestellt. Die Graph repräsentiert dabei die relativen Unsicherheiten durch den Referenzdetektor u_{trap} , der Blendengröße $u_{aperture}$ der zeitlichen Stabilität u_{stab} , der Position u_{dist} , der Wellenlänge u_{wl} , der Homogenität des Strahlungsfeldes u_{homog} , der Messung der Photostroms $u_{current}$ und der daraus resultierenden Standardmessunsicherheit u_s .

Die Unsicherheiten für die Wellenlänge, den verwendeten Referenzdetektor und die Standardabweichung aus Wiederholungsmessungen für die resultierende Gesamtunsicherheit u_s , siehe Abschnitt 5.8, miteinbezogen [75]. Diese Unsicherheitsbeiträge variieren je nach Messung und werden für jeden Kanal einzeln berechnet. Die Messunsicherheiten befinden sich in den Diagrammen im Anhang und werden beispielsweise bei *Nevas et al.* diskutiert [74]. Der größte Unsicherheitsbeitrag geht dabei von der Unkenntnis der Referenzebenen aus, dem Beitrag u_{dist} , womit der Offset zwischen dem Referenzdetektor und dem zu vermessenden Radiometers gemeint ist.

5.3. Field of View (FOV)

Der Raumwinkel, aus dem das Radiometer Strahlung empfängt, den das Field of View (kurz: *FOV*) beschreibt, wird für die Kalibrierungen benötigt, um von der Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit s_E auf die Strahldichteempfindlichkeit s_L eines Kanals umzurechnen. Dabei gilt: $s_L = s_E \cdot \Omega_{sr}$. Durch diese Umrechnung können die verschiedenen Messmethoden zur Rückführung auf das internationale Einheitensystem verglichen werden.

Der Raumwinkel des Radiometers ergibt sich aus der Integration:

$$\Omega = \iint \text{Signal}(\Theta, \Phi) d\Theta d\Phi. \quad (5.11)$$

Im Rahmen des Projektes wurde das FOV vom PMOD bestimmt. Der am PMOD verwendete Aufbau besteht aus einer Xenon-Lampe und einem Zweiachsengoniometersystem mit einer Auflösung von 0,2 mdeg, siehe Abbildung 5.9.



Abbildung 5.9.: Schematischer Aufbau für die Messung des FOV am PMOD.

Die Strahlung der Lampe trifft auf eine Diffusorplatte, die eine lambertsche Strahlungsverteilung erzeugt. Vor der Reflexionsplatte befindet sich eine Apertur, das Cimel-Radiometer ist auf einem Goniometersystem platziert. Die Bestimmung des FOV erfolgt dadurch, dass der Radiometerkopf in beide Achsen um $\pm 1^\circ$ in $0,04^\circ$ Schritten bewegt wird.

Das FOV wurde in Grad gemessen, die gemessenen Signalwerte wurden normiert und die Halbwertsbreite bestimmt. Für die Bestimmung der FOV-Werte in Steradian wurden die Winkel mit $\theta\pi/180$ in Radian umgerechnet und das Integral

$$\Omega_{sr} = \pi \int d\theta_{rad} \sin(\theta_{rad}) \cdot \text{norm}(\text{Signal}). \quad (5.12)$$

bestimmt. Dabei wurde davon ausgegangen, dass das FOV rotationssymmetrisch ist, siehe Abbildung 5.10.

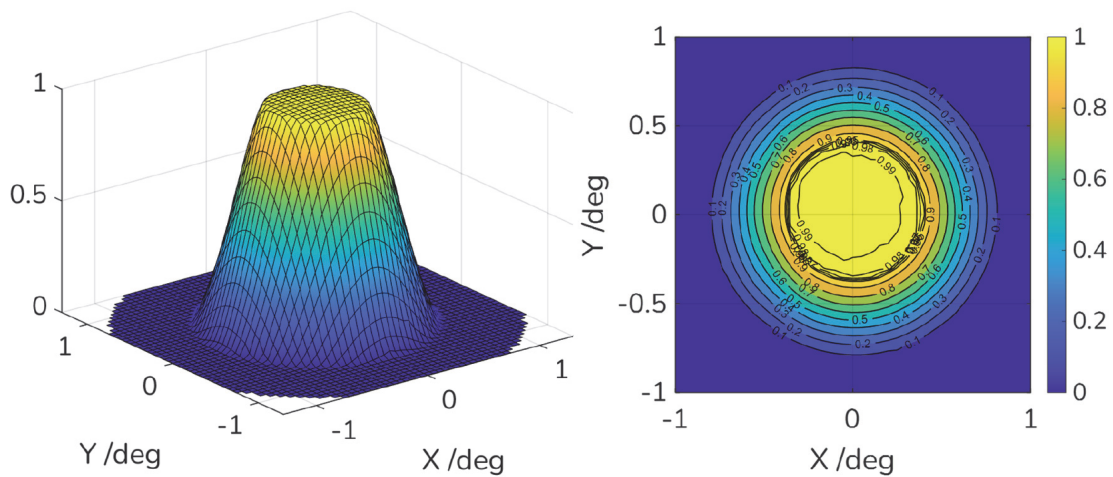


Abbildung 5.10.: 3D- und Contour-Plot des FOV für den 500 nm-Kanal [76].

Für die einzelnen Kanäle ergeben sich folgende Werte:

Cimel Channel [nm]	FOV [msr]	u_{FOV} [msr]
Si 340	0,3718	0,0033
Si 380	0,3712	0,0030
Si 440	0,3747	0,0015
Si 500	0,3768	0,0019
Si 675	0,3763	0,0015
Si 870	0,3759	0,0023
Si 937	0,3760	0,0023
Si 1020	0,3761	0,0023
InGaAs 1020	0,3697	0,0033
InGaAs 1640	0,3744	0,0033

Tabelle 5.3.: Gemessene Werte eines Cimel-Radiometers für das FOV durch das PMOD/WRC im Rahmen des MAPP Projektes [76].

Um weitere Beiträge zur Messunsicherheiten festzustellen und Konsistenz zu prüfen soll eine weitere Messung erfolgen, die jedoch nur in einer Ebene durchgeführt wird. Angenommen wird dabei, dass das FOV symmetrisch ist, also in x- und y-Richtung die gleiche Geometrie aufweist.

Benötigt wird dafür eine Punktquelle, hierfür durch eine Ulbricht-Kugel mit Lampe und begrenzender Blende realisiert, sowie einer rotierenden Stage, so dass Signale winkelabhängig aufgenommen werden können. Die optische Achse verläuft durch den Mittelpunkt des Auslassports der Kugel und der Mitte des Eingangs des zu vermessenden Cimel-Kanals, vgl. Abbildung 5.11.

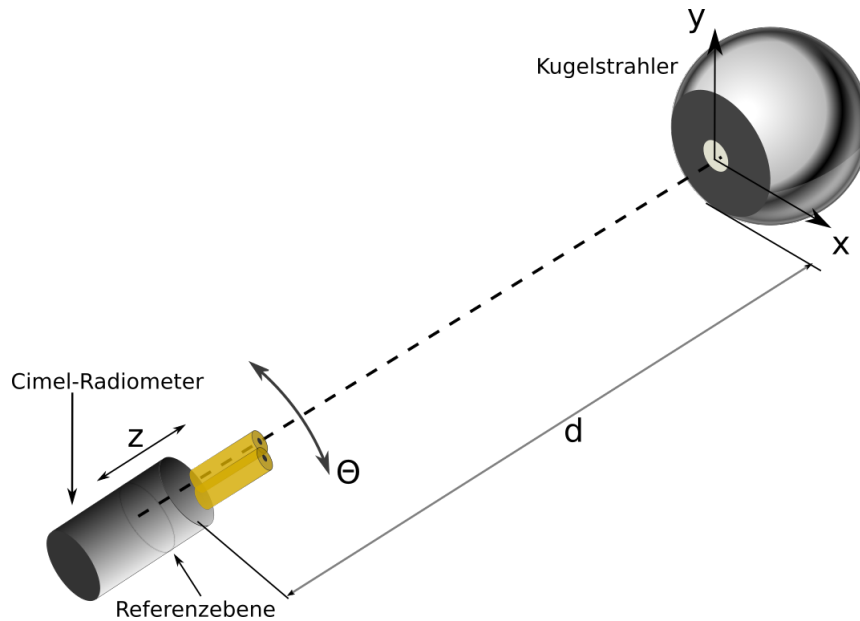


Abbildung 5.11.: Messaufbau zur Bestimmung des FOV des Cimel-Radiometers. Das Cimel-Radiometer befindet sich im Abstand d auf einer rotierenden Stage, so dass um den Winkel Θ in x- und y-Richtung gedreht werden kann.

Die Messungen wurden auf verschiedenen Drehachsen durchgeführt: auf der Stirnseite des Geräts, 18 mm hinter der Stirnseite, wo sich ungefähr die Referenzebenen der Kanäle befinden, und weitere 18 mm dahinter. Durch diese Verschiebungen, in Abbildung 5.11 mit z bezeichnet, kann eine Abschätzung darüber gemacht werden, inwiefern sich eine Verschiebung der Justierung auf die Winkelverschiebung auswirkt und welche Messunsicherheit in der Bestimmung des FOV angenommen werden muss.

Das Radiometer wurde für die Messung im festen Abstand d vor der Kugel positioniert. Zur Messung des FOV in der anderen Ebene wurde das Cimel-Radiometer um 90° in seiner Halterung gedreht.

Zunächst wurde Schritten von $0,05^\circ$ um die optische Achse gemessen. Um die Abhängigkeit von der Position des Drehpunktes zu bestimmen wurde das Radiometer um 18 mm nach vorne versetzt, so dass die Drehachse sich auf der Stirnseite des Geräts befindet und um 18 mm hinter die Referenzebenen.

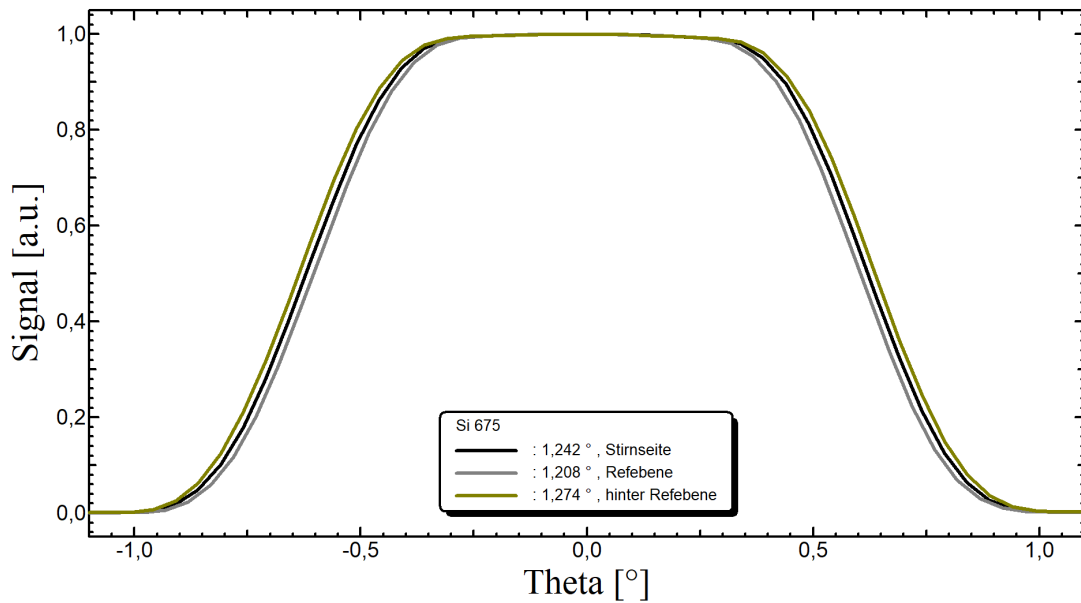


Abbildung 5.12.: Auswirkungen der Verschiebung der Drehachse bei der Bestimmung des FOV am Beispiel des 675 nm-Kanals. Angegeben ist das FOV in Grad.

Abbildung 5.12 zeigt die Auswirkungen der Verschiebung der Drehachsen nach vorne bzw. hinten. Bei einer Verschiebung um 18 mm kommt es zu Abweichungen von $0,03^\circ$ bzgl. der mittleren Position, was im berechneten integralen Wert des Raumwinkels 2,5 % entspricht. Dies hätte einen entsprechenden Einfluss zur Unsicherheit der Kalibrierung, wo die Strahldichteempfindlichkeit auf die Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit umgerechnet wird.

Daraus ist zu erkennen, dass eine Korrektur für das Verschieben der Drehachse nötig wird. Für die Messungen wurde die Drehachse des Cimels auf Höhe der Stirnseite positioniert, die Referenzebenen und somit der korrekte Drehpunkt liegen jedoch ca. 18 mm dahinter. Durch das Verschieben gibt es Abweichungen im Drehwinkel, wie in Abbildung 5.13 dargestellt.

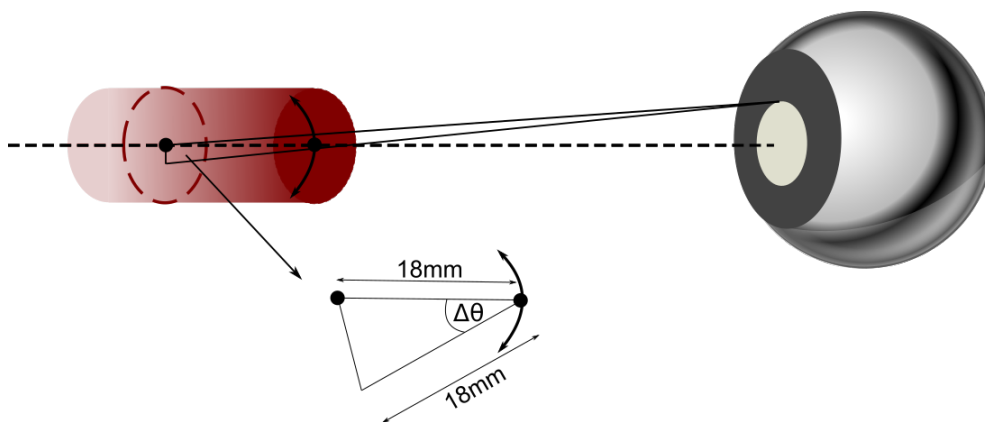


Abbildung 5.13.: Veränderung des Drehwinkels bei Verschiebung der Drehachse.

Durch diese Abschätzung entsteht die oben beschriebene Abweichung der sichtbaren Fläche. Dieses ist als Korrektur für den Wert des FOV anzubringen. Es ist demnach elementar für eine Kalibrierung, die Referenzebenen zu bestimmen und das FOV mit der richtigen Referenzebene zu messen. Diese Bestimmung gestaltete sich als schwierig, die Unsicherheiten der Referenzebenenbestimmung wirken sich somit auch auf die Unsicherheiten des FOV aus, sowie bei der Bestrahlungsstärkeempfindlichkeitskalibrierung, siehe Kapitel 6.1.

5.4. Temperaturkoeffizienten

Die Eigenschaften einzelner Komponenten eines Filtrerradiometers können temperaturabhängig sein, wie z. B. die spektrale Empfindlichkeit der verwendeten Photodioden oder der spektrale Transmissionsgrad der schmalbandigen Interferenzfilter, durch die die spektralen Kanäle definiert werden. Sind einzelne Komponenten nicht temperaturstabilisiert, kann somit die spektrale Empfindlichkeitsfunktion des Radiometers von der Umgebungstemperatur abhängig sein. Eine Charakterisierung ist besonders wichtig für den Bereich um 1020 nm, in dem Siliziumphotodioden besonders temperaturempfindlich sind, da es sich hier energetisch um den Bereich der Bandlücke nähert. Der Einfluss der Umgebungstemperatur muss daher charakterisiert und gegebenenfalls in der Messanwendung korrigiert werden. Zu Beginn des AERONET wurde exemplarisch für ein Gerät eine solche Charakterisierung durchgeführt. Die resultierenden Temperaturkoeffizienten wurden als allgemeingültig für alle anderen Netzwerkradiometer betrachtet [5].

Für die Verbesserung der AOD-Daten im AERONET wurden am Goddard Space Flight Center (kurz: *GSFC*) und bei PHOTONS (Lille) damit begonnen, die Temperaturkoeffizienten für jedes einzelne Cimel-Radiometer systematisch durch Labormessungen in einer temperaturkontrollierten Kammer zu bestimmen [70]. Aus den von *Berjon et al.* [77] gezeigten Ergebnissen geht hervor, dass die Verwendung von Temperaturkoeffizienten für ein bestimmtes Radiometer, die aus dem Vergleich mit einem zuvor im Labor charakterisierten Referenzgerät abgeleitet werden, bessere Ergebnisse liefert als die Verwendung eines standardisierten Koeffizienten für alle Temperaturbedingungen [77]. Empfohlen wird jedoch auch hier eine Charakterisierung für jedes einzelne Gerät. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Temperaturkoeffizienten des Radiometers sowohl für integrale als auch spektrale Empfindlichkeiten aller Kanäle bestimmt.

Integrale Bestimmung der Temperaturkoeffizienten

Die Bestimmung der temperaturabhängigen Empfindlichkeit der spektralen Kanäle lässt sich am einfachsten realisieren, wenn das Radiometer in einer Klimakammer platziert wird und die Signale der einzelnen Kanäle bei einer Messung mit einer stabilen und breitbandigen Quelle, beispielsweise einer Lampe, als Funktion der Gerätetemperatur aufgenommen werden. So sieht es auch das Standardverfahren im AERONET zur Bestimmung der Temperaturabhängigkeit der integralen spektralen Empfindlichkeit eines Radiometers vor. Diese

Methode wurde im Rahmen dieser Arbeit umgesetzt.

Die Temperaturabhängigkeit wurde für den Temperaturbereich von -35°C bis 50°C gemessen.

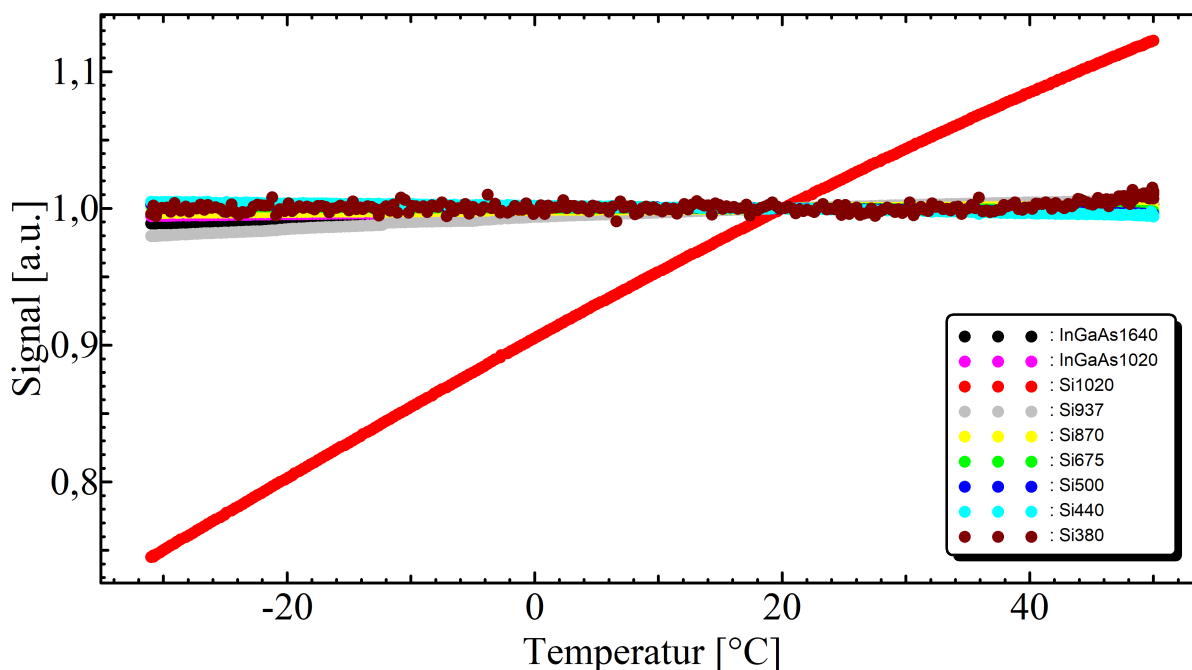


Abbildung 5.14.: Auf das Signal bei $T = 20^{\circ}\text{C}$ normierte Signale der spektralen Kanäle gegen die Temperatur des Cimels.

Wie in Abbildung 5.14 zu sehen ist der Si-Kanal um die Peakwellenlänge 1020 nm der einzige Kanal mit einer signifikanten Änderung der Empfindlichkeit mit der Temperatur, siehe auch Tabelle 5.4. Die übrigen Kanäle haben keine signifikante Änderung der Empfindlichkeit bei Änderung der Temperatur. Dies ist ein Indiz dafür, dass die Temperaturabhängigkeit der Messungen mit dem Cimel-Radiometern hauptsächlich von der verwendeten Photodiode und der Wellenlänge abhängt. Diese zeigen ab einem Bereich von $> 900\text{ nm}$ deutliche Veränderungen in der Sensitivität bei der Erhöhung der Umgebungstemperatur, wohingegen in unteren Wellenlängen kaum Änderungen auftreten, vgl. Abschnitt 4.6. Für die Messungen in der Klimakammer wurde die Temperaturanzeige des internen Sensors des Cimels verwendet. Neben der Temperaturanzeige des Cimels wurden auch die Temperaturanzeige der Klimakammer und eines Temperatursensors überwacht und aufgenommen.

Cimel Channel [nm]	[%/°C]
Si 380	0,02
Si 440	0,01
Si 500	0,06
Si 675	0,03
Si 870	0,06
Si 937	0,04
Si 1020	0,493
InGaAs 1020	0,13
InGaAS 1640	0,03

Tabelle 5.4.: Abschätzung der Werte für die Temperaturkorrektur für die spektralen Kanäle des Cimel-Radiometers.

Tabelle 5.4 enthält die aus den Anpassungen in Abbildung 5.14 ermittelten Unsicherheiten im Zusammenhang für die Temperaturkorrektur. Um diese zu bestimmen, wurden die Signale auf die Referenztemperatur von 20 °C normiert und somit dort die Korrektur als Null angenommen. Die Unsicherheiten im Zusammenhang mit den aus dieser Messung abgeleiteten Korrekturen sind sehr gering. Für Messungen im Labor fallen diese demnach kaum ins Gewicht.

Spektral aufgelöste Messung der Temperaturkoeffizienten

Um die mögliche Auswirkung der Umgebungstemperatur auf die Bandpassfunktionen des Radiometers zu bestimmen, sind spektral aufgelöste Messungen erforderlich. Da das Radiometer während der spektral aufgelösten Messungen nicht in einer Klimakammer positioniert werden kann, wurden Heizwiderstände auf dem Halter des Radiometers für die Messungen am TULIP-Setup angebracht. Mit Hilfe der Heizwiderständen und einer Regelschaltung können die Temperatur des Halters und damit das Radiometer auf eine gewünschte Temperatur eingestellt während der Messung konstant gehalten werden.

Das Radiometer wurde zunächst bei 21 °C Raumtemperatur gemessen und nachfolgend mit Hilfe der Heizwiderstände auf 35 °C aufgeheizt. Die resultierende Temperaturverteilung auf dem Gehäuse des Filtrerradiometers wurde mit einer Thermographiekamera beobachtet und ist in Abbildung 5.15 b) zu sehen.

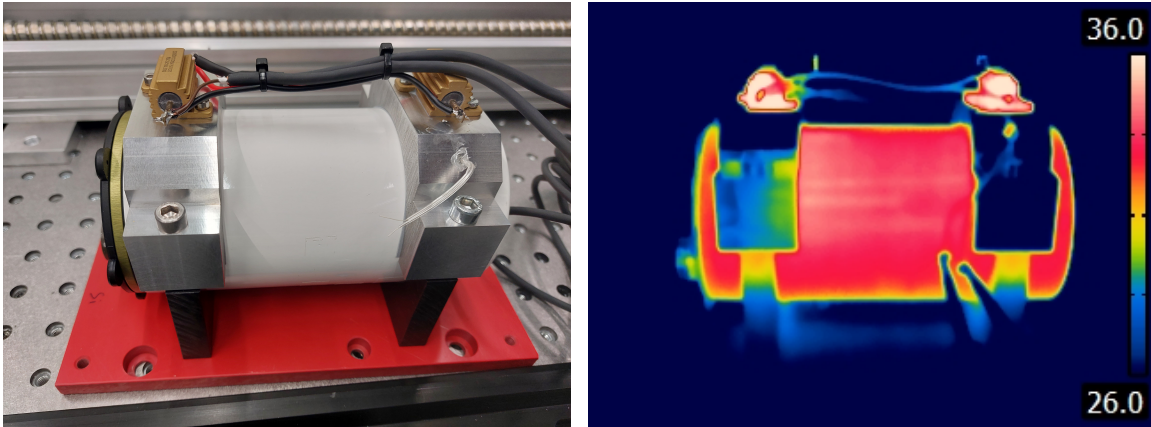


Abbildung 5.15.: a) Montierte Heizwiderstände auf der Oberseite des Halters, b) Temperaturbild des beheizten Filtrerradiometers.

Die spektralen Bestrahlungsempfindlichkeiten wurden bei 21 °C und 35 °C für Kanäle mit Peakwellenlängen bei 380 nm, 440 nm und 675 nm sowie für Si- und InGaAs-Kanäle bei 1020 nm gemessen.

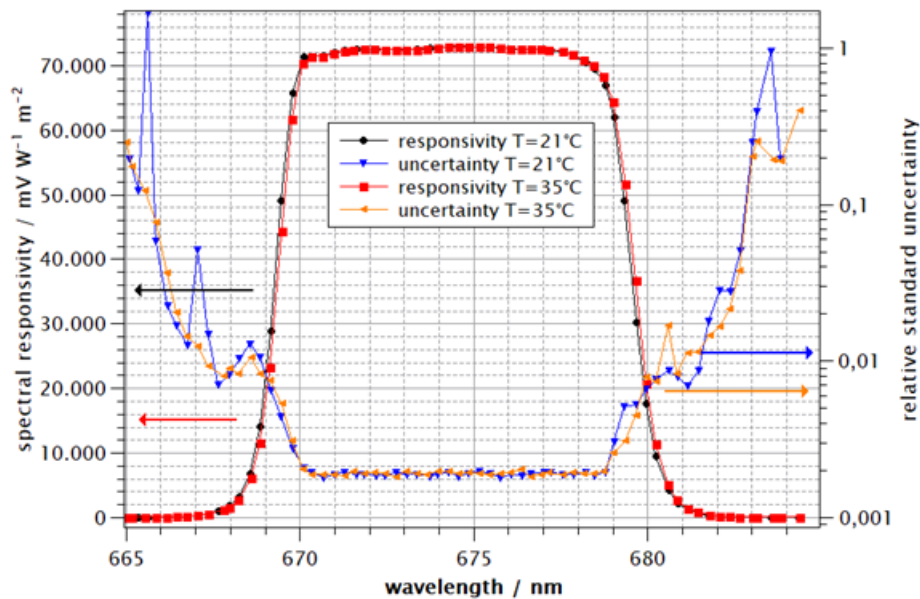


Abbildung 5.16.: Spektrale Empfindlichkeit des 675 nm-Kanals mit entsprechender relativer Standardunsicherheit bei 21 °C und 35 °C.

Abbildung 5.16 zeigt den Vergleich der spektralen Empfindlichkeit für unterschiedliche Temperaturen. Die schwarze und die rote Linie zeigen die Empfindlichkeit bei 21 °C bzw. bei 35 °C. Es ist zu erkennen, dass sich die Empfindlichkeit des Kanals bei einer Temperaturänderung weder in Bezug auf die Amplitude noch auf die Wellenlänge wesentlich ändert. Ein ähnliches Verhalten wurde auch bei den anderen Kanälen außer bei 1020 nm beobachtet, vgl. Abbildung 5.17.

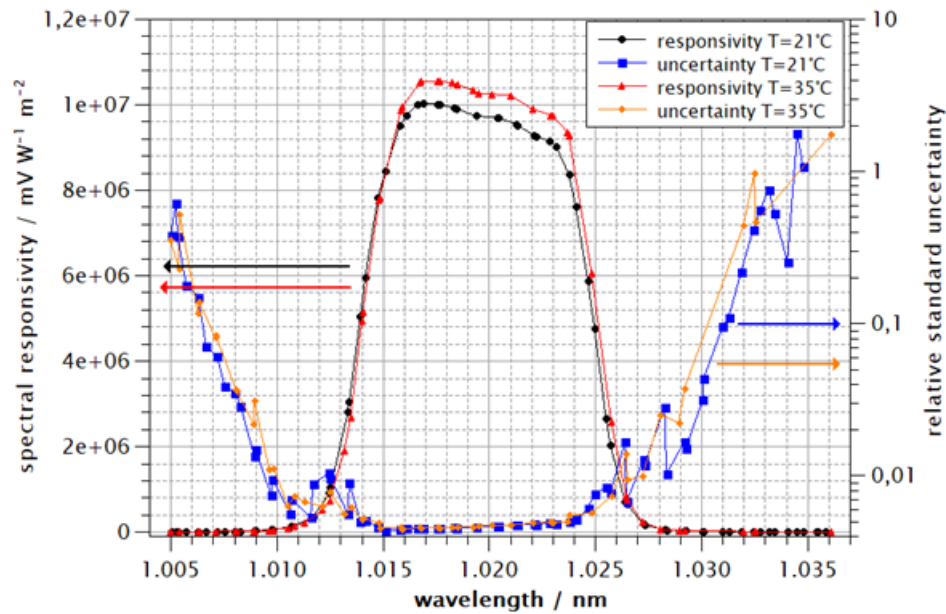


Abbildung 5.17.: Spektrale Empfindlichkeit des Si1020 nm-Kanals mit entsprechender relativer Standardunsicherheit bei 21 °C und 35 °C.

Für den Si-Kanal um 1020 nm wurde nur ein Anstieg der spektralen Empfindlichkeit um etwa $\sim 5\%$ beobachtet, was $0,382\% ^\circ\text{C}$ ausmacht, während keine andere signifikante spektrale Verschiebung der Bandpassfunktion zu beobachten war, vgl. Abbildung 5.17. Die Schwerpunktwellenlänge des Si-Kanals bei 1020 nm verschob sich nur um etwa 0,2 nm infolge der Temperaturänderung von 21 °C auf 35 °C. Bei den anderen Kanälen wurden Verschiebungen von etwa 0,04 nm beobachtet.

Die Spektralkanäle, die bei integralen Messungen keine signifikante Temperaturabhängigkeit zeigen, weisen auch keine nennenswerten spektralen Änderungen in ihren Empfindlichkeiten auf. Für den Si-Kanal bei 1020 nm zeigten die Messungen der spektralen Empfindlichkeit bei zwei Temperaturen einen Anstieg der Empfindlichkeit bei Erhöhung der Temperatur von 21 °C auf 35 °C. Dies stimmt mit dem Temperaturkoeffizienten überein, der sich aus dem Standardverfahren mit integralen Messungen einer Lichtquelle ergibt. Die Änderung der Temperatur von 21 °C auf 35 °C führte zu einer Verschiebung der Schwerpunktwellenlänge des Si-Kanal bei 1020 nm um etwa 0,2 nm, während für die anderen Kanäle kleinere Verschiebungen von etwa 0,04 nm beobachtet werden konnten. Die beobachteten spektralen Verschiebungen der Bandpassfunktionen sind für die Messanwendung des Radiometers nicht signifikant. In Anbetracht dessen ist das Standardverfahren zur Bestimmung der Temperaturkoeffizienten der AERONET-Instrumente ist für diesen Zweck ausreichend. Der Vergleich der beiden Methoden zur Bestimmung der Temperaturabhängigkeit der spektralen Empfindlichkeit wurde in AIP Conference Proceedings veröffentlicht [78].

5.5. Linearität

Eine Komponente der Radiometerkalibrierung ist die Linearität. Die Linearität ist ein Maß dafür, wie proportional das Ausgangssignal des Radiometers zur tatsächlichen eingestrahelten Bestrahlungsstärke bzw. Strahldichte ist. Die Linearität bzw. Nichtlinearität von Photodioden wird in der Literatur bereits ausgiebig untersucht und beschrieben. *Kübarsepp et al.* beispielsweise beschreiben Nichtlinearitäten der Empfindlichkeit verschiedener Arten von Silizium-Photodetektoren [79]. Die betrachteten Photodioden sind fast baugleich mit der im Cimel verwendeten Si-Photodiode und mit Abweichungen innerhalb von $2 \cdot 10^{-4}$ linear [79]. Mit diesen Messungen wurde bestätigt, dass diese Photodiode bis zur Sättigungsgrenze, die in der Nähe von 1 mW beginnt, mit einer Genauigkeit von $\pm 10^{-4}$ linear ist, was zuvor unter anderem von *Fischer und Fu* gezeigt wurde [80].

Die Linearität wurde für das Cimel-Radiometer bereits von *Taylor et al.* am National Physical Laboratory (kurz: *NPL*) untersucht [72, 81]. Abbildung 5.18 zeigt den schematischen Aufbau des Setups.

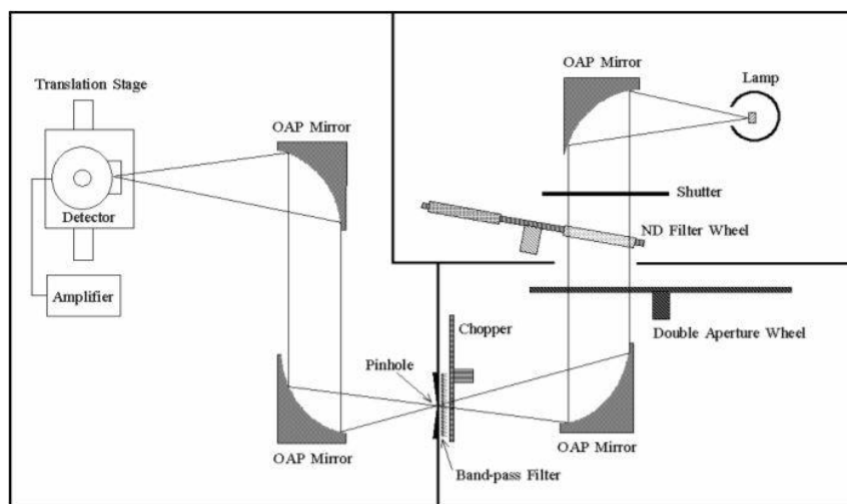


Abbildung 5.18.: Schematischer Aufbau der Linearitätsmessung am NPL. OAP: Off axis parabola, ND: Neutraldichtefilter [72].

Bei den Messungen wurden der Si- und der InGaAs-Kanal einzeln vermessen. Eine Wolframlampe diente als Quelle, der Detektor wurde erst durch eine Apertur A, dann durch eine Apertur B und folgend durch eine Apertur A+B bestrahlt. Bei Linearität ist zu erwarten, dass das Signal bei Verwendung von A+B gleich dem Signal von A plus dem Signal von B ist. Der Linearitätsfaktor L wird berechnet durch:

$$L(V_{A+B}) = \frac{V_{A+B}}{V_A + V_B}, \quad (5.13)$$

wobei V_A und V_B das Signal beim Bestrahlen von Apertur A bzw. B minus Dunkelsignal ist, V_{A+B} das Signal abzüglich Dunkelsignal bei der Bestrahlung von Apertur A+B [82]. Abbildungen 5.19 und 5.20 zeigen die Ergebnisse der Linearitätscharakterisierung in der Veröffentlichung.

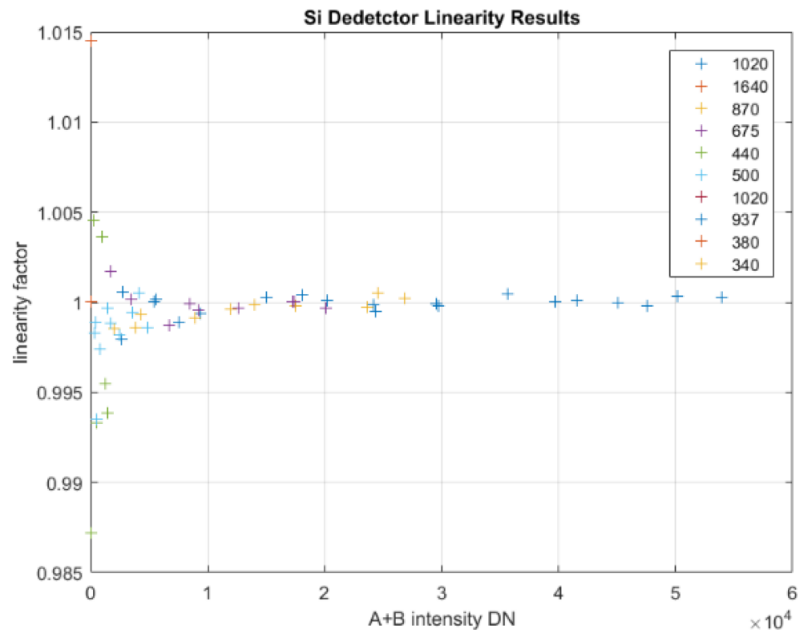


Abbildung 5.19.: Ergebnisse für die Linearitätsmessungen des Si-Detektors aus dem Bericht des NPL [72]. A+B intensity beschreibt die durch Appertur A+B gemessenen Werte in Geräteeinheiten (DN).

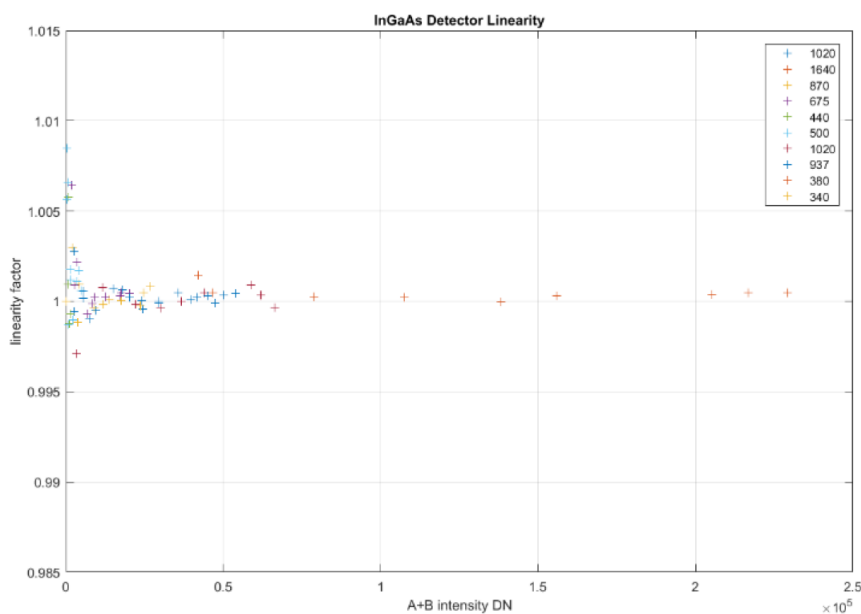


Abbildung 5.20.: Ergebnisse für die Linearitätsmessungen des InGaAs-Detektors aus dem Bericht des NPL [72]. A+B intensity beschreibt die durch Appertur A+B gemessenen Werte in Geräteeinheiten (DN).

Die Linearität wurde für verschiedene Beleuchtungsniveaus berechnet. Die Ergebnisse wurden folgend für jeden Kanal gemittelt. Für Wellenlängen über 500 nm beträgt die Nichtlinearität weniger als 0,1 %, zudem ist in den Diagrammen kein systematisches Muster zu erkennen. Für kürzere Wellenlängen ist eine Variabilität zu erkennen, jedoch kein Muster. Es wird davon ausgegangen, dass dies in erster Hinsicht ein Phänomen des niedrigen Signal-zu-Rauschen-Verhältnisses ist und auf niedrige Signale zurückzuführen. Die Nichtlinearität wird folgend als vernachlässigbar angesehen und wird in dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

6. Laborkalibrierung und Rückführung auf das internationale Einheitensystem SI

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die SI-rückführbaren Messungen der optischen Eigenschaften von Aerosolen zu ermöglichen, die aus der passiven Fernerkundung der Atmosphäre unter Verwendung von Sonnen- und Mondstrahlungsmessungen gewonnen werden können und ihre konstante Weitergabe einschließlich ihrer Unsicherheit zu gewährleisten.

Die in Kapitel 2 beschriebene Methodik über Master-Instrumente führt zu einem relativen Vergleich der Geräte in der Einheit „Counts“, erstrebenswert ist jedoch eine Rückführung auf das internationale Einheitensystem SI.

Mögliche Strategien für die Rückführungen sind in Abbildung 6.1 gezeigt. Der linke Zweig in Abbildung 6.1 zeigt den Ansatz einer Rückführung auf das internationale Einheitensystem über ein SI-rückgeführtes Sonnenspektrum. ToA-Sonnenspektren wurden in den letzten zwei Jahrzehnten auf der Grundlage verschiedener Satellitenmissionen und Experimente gewonnen. Der Vorteil solcher abgeleiteten ToA-Spektren ist, dass sie außerhalb der Atmosphäre gemessen werden und daher nicht durch atmosphärische Absorptionsmerkmale beeinflusst werden. Wie in mehreren Studien, z. B. *Schöll et al.* [83] oder *Gröbner et al.* [84], gezeigt wurde, gibt es erhebliche Unterschiede zwischen den einzelnen Studien in verschiedenen Spektralbereichen, es gibt somit kein einheitliches Sonnenspektrum. Daher ist diese Methode bisher nicht praktikabel und wird im Rahmen dieser Arbeit nicht diskutiert. Der rechte Zweig zeigt die möglichen Rückführungsstrategien auf der Internationale Einheitensystem über Laborkalibrierungen.

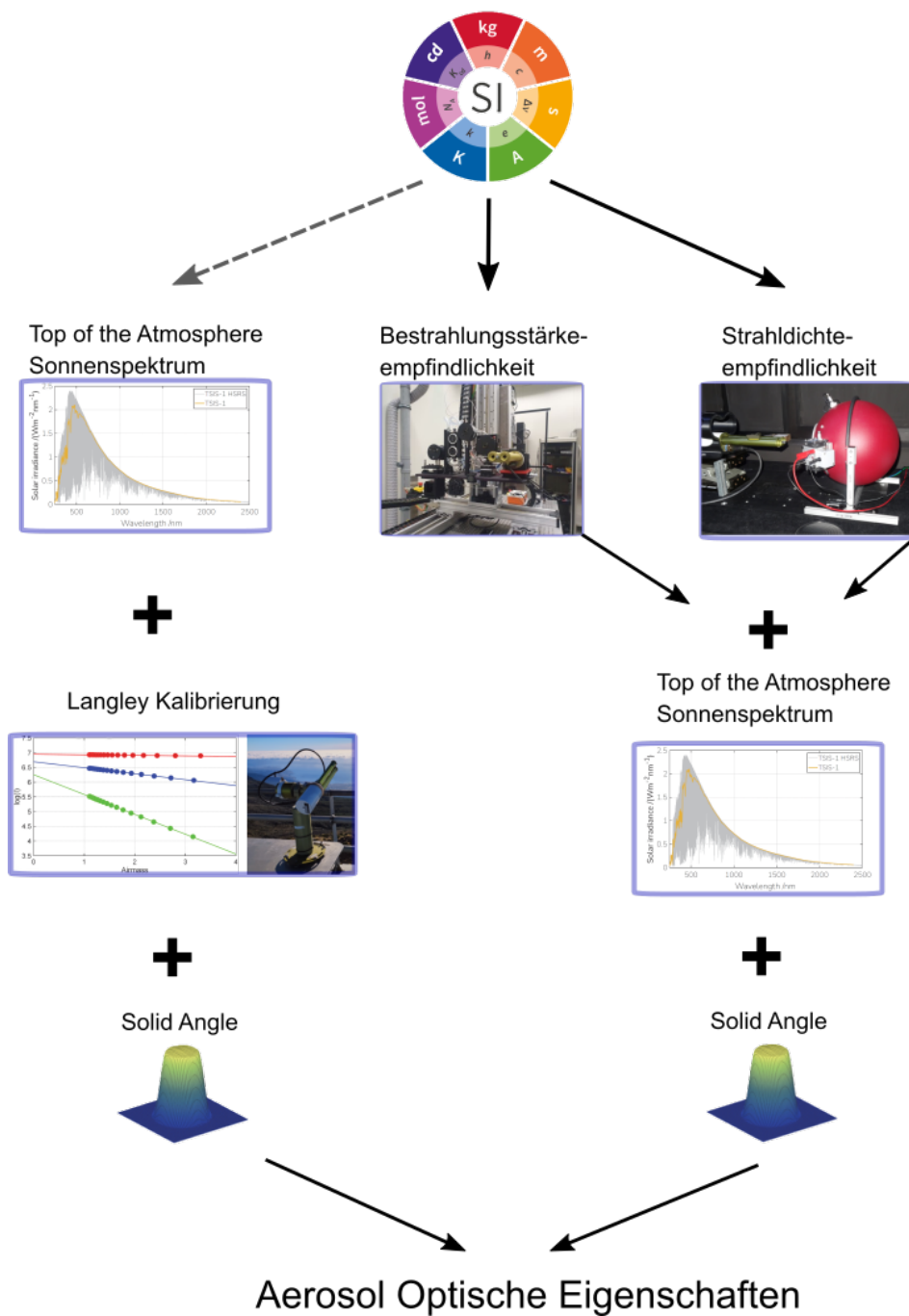


Abbildung 6.1.: SI-rückgeführte Kalibriermethoden für die AERONET-Radiometer.

Die spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit $s_E(\lambda)$ und die spektrale Strahllichtempfindlichkeit $s_L(\lambda)$ können durch die Kenntnis des FOV Ω_{sr} des Radiometers in Beziehung gesetzt und verglichen werden. Es gilt:

$$\Omega_{sr} = \frac{s_L(\lambda)}{s_E(\lambda)} \quad (6.1)$$

Der nächste Teil dieser Arbeit befasst sich mit den Laborrückführungen der AERONET-Radiometer. Verglichen werden sollen Bestrahlungsstärkekalibrierungen, wie sie am TULIP-Setup durchgeführt werden können, einer Lampenkalibrierung sowie zwei Strahldichte-kalibrierungen. Die eine erfolgt über eine kalibrierte Ulbricht-Kugel, die andere über ein Strahldichtenormal in Form einer Tablette. Am Ende des Kapitels werden die unterschiedlichen Laborrückführungen verglichen und diskutiert.

6.1. Rückführung über Bestrahlungsstärkeempfindlichkeitskalibrierung

Für die Kalibrierung über die Bestrahlungsstärke gibt es zwei Methoden, spektral aufgelöst mittels einer spektral durchstimmbaren Quelle und Referenzdetektoren oder integral und strahlergestützt gegen ein Normal für spektrale Bestrahlungsstärke, vgl. Abbildung 3.1. Die Rückführung auf das internationale Einheitensystem soll hier auf beide Weisen erfolgen und miteinander verglichen werden.

Spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeitskalibrierung

Die spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeitskalibrierung wurde am TULIP-Setup durchgeführt, vgl. Abschnitt 5.1.2. Die mit diesem Setup bestimmten Bestrahlungsstärkeempfindlichkeiten können aufintegriert werden, um die Bestrahlungsstärkeempfindlichkeiten für jeden einzelnen Radiometerkanal s_E zu erhalten:

$$s_E = \int s_E(\lambda) d\lambda \quad (6.2)$$

Diese werden für die einzelnen Kanäle aufintegriert und mit dem in Abschnitt 5.3 bestimmten FOV verrechnet. Die Strahldichteempfindlichkeit s_L wird berechnet durch:

$$s_L = s_E \cdot \Omega_{sr} \quad (6.3)$$

wobei $s_E(\lambda)$ die spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit und Ω_{sr} das FOV des Kanals in Steradian sind.

Tabelle 6.1 zeigt die mit Hilfe des TULIP-Setups bestimmten Bestrahlungsstärken pro Kanal und die daraus berechneten Strahldichteempfindlichkeiten und die zugeordneten Unsicherheiten.

Channel	s_E [counts/ $\frac{W}{m^2}$]	$u(s_E)$ [counts/ $\frac{W}{m^2}$]	s_L [counts/ $\frac{W}{m^2 sr}$]	$u(s_L)$ [counts/ $\frac{W}{m^2 sr}$]
Si 340	49520	740	18,4	0,2
Si 380	126010	440	46,8	0,2
Si 440	436040	800	163,4	0,4
Si 500	510700	1700	192,4	0,6
Si 675	753500	1700	283,5	0,7
Si 870	958500	4600	360,3	1,5
Si 937	1024400	5300	385,2	1,7
Si 1020	841100	8300	311,6	1,9
InGaAs 1020	1201000	12000	440,0	3,1
InGaAs 1640	4977000	35000	1850	12

Tabelle 6.1.: Bestrahlungsstärkeempfindlichkeiten und die daraus berechneten Strahldichteempfindlichkeiten mit zugehörigen Standardunsicherheiten für die Cimel Kanäle bestimmt durch die Messungen am TULIP-Setup.

Die Messunsicherheiten für die Kalibrierungen von filterbasierten Radiometern verschiedener Aerosolüberwachungsnetzwerke am TULIP-Setup gegen die Referenzdetektoren werden unter anderem in *Nevas et al.*, *Kouremeti et al.*, oder *Campanelli et al.* beschrieben [74, 85, 86]. Der deutlich größere und somit relevante Anteil der hier aufgeführten Messunsicherheiten hat seinen Ursprung in der Bestimmung des FOV und der Referenzebenen, wie in Abschnitt 5.1 und 5.3 aufgeführt wurde. Die hier aus einer Bestrahlungsstärkeempfindlichkeitsmessung bestimmten Strahldichteempfindlichkeiten werden am Ende dieses Kapitels mit den bestimmten Werten aus zwei Strahldichtemessaufbauten verglichen.

Integrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeitskalibrierung

Eine weitere Möglichkeit der Kalibrierung ist eine integrale Bestrahlungsstärkekalibrierung realisiert mit einer Glühlampe. Die Glühlampe wurde im Abstand von 700 mm zum Radiometer aufgestellt. Die Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit, die pro Kanal gemessen wird, kann mit Hilfe der relativen spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit $s(\lambda)$ und der bekannten Bestrahlungsstärke E der Lampe berechnet werden:

$$s_E(channel) = \frac{Signal(counts)}{\int s(\lambda) \cdot E(\lambda) d\lambda} \quad (6.4)$$

Über die bekannte Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit pro Kanal und dem FOV kann wie bei den Messungen am TULIP-Setup mit $s_L = s_E \cdot \Omega_{sr}$ auf die Strahldichteempfindlichkeit geschlossen werden.

Die angegebenen Unsicherheiten ergeben sich aus der Monte-Carlo-Simulationsmethode, für die relative spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit $s(\lambda)$, sowie die Größen E und

Ω_{sr} sind die Unsicherheiten bekannt und werden in dieser Simulation berücksichtigt. Es ergibt sich:

Channel	s_E [counts/ $\frac{W}{m^2}$]	$u(s_E)$ [counts/ $\frac{W}{m^2}$]	s_L [counts/ $\frac{W}{m^2 sr}$]	$u(s_L)$ [counts/ $\frac{W}{m^2 sr}$]
Si 340	49631	565	18,5	0,5
Si 380	126807	1331	47,1	0,9
Si 440	439647	4408	164,7	0,8
Si 500	512387	5048	193,1	0,8
Si 675	757058	8584	284,8	1,3
Si 870	966755	10999	360,4	1,2
Si 937	1023303	12744	385,8	1,8
Si 1020	838936	607	310,8	2,3
InGaAs 1020	1192565	863	440,9	5,3
InGaAs 1640	4940713	3239	1837	22

Tabelle 6.2.: Bestrahlungsstärkeempfindlichkeiten und daraus berechnete Strahldichteempfindlichkeiten mit zugehörigen Standardunsicherheiten für die Cimel-Kanäle bestimmt durch die Messungen mit einer Lampe.

Vergleicht man die in Tabelle 6.2 gezeigten Werte für die Bestimmung der Strahldichteempfindlichkeit des Cimel-Radiometers über Bestrahlungsstärkemessungen mit denen, die am TULIP-Setup bestimmt wurden, vgl. Tabelle 6.1, fällt auf, dass diese im Rahmen der Unsicherheiten stimmig sind. Eine direkte Möglichkeit einer Strahldichtekalibrierung ergibt sich aus der Verwendung eines Reflexionsnormals und einer Glühlampe.

6.2. Strahldichteempfindlichkeitskalibrierung mit einer kalibrierten Strahldichtequelle

Die Strahldichteempfindlichkeitskalibrierung des Radiometers wurde gegen ein kalibriertes Strahldichtenormal durchgeführt. Dieses Strahldichtenormal ist eine mit $BaSO_4$ beschichtete Ulbricht-Kugel in Kombination mit Lampen und wird im Kalibrierlabor PHOTONS unter dem Namen *RedIS* für die Übertragung der Kalibrierung der Master-Instrumente auf die Feldinstrumente verwendet. Um die Stabilität des Strahlers zu überwachen wurde ein Photometerkopf eingebaut.

Mit Hilfe der in Abschnitt 5.2 bestimmten relativen Empfindlichkeiten kann die integrale Strahldichteempfindlichkeit berechnet werden:

$$s_L = s(\lambda) \cdot L_{\text{RedIS}}(\lambda) \quad (6.5)$$

$s_E(\lambda)$ sind dabei die Bandpassempfindlichkeiten der einzelnen Kanäle des Cimels, $L_{RedIS}(\lambda)$ ist die Strahldichte der Ulbricht-Kugel RedIS.

Teilt man nun die mit dem Cimmel gemessenen Werte durch die berechnete Strahldichte erhält man die Strahldichteempfindlichkeit des Cimels pro Kanal:

$$s_L(channel) = \frac{Signal(counts)}{\int s(\lambda) \cdot L_{RedIS}(\lambda) d\lambda} \cdot f_{Homogenität} \quad (6.6)$$

wobei $f_{Homogenität}$ ein Korrekturfaktor für das Strahlungsfeld der Strahldichtequelle RedIS ist, der nach Gleichung 6.7 berechnet wird.

Es ergibt sich:

Cimel Channel [nm]	$s_L \left[\text{counts} / \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{sr}} \right]$	$u_{s_L} \left[\text{counts} / \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{sr}} \right]$	$u(s_L) [\%]$
Si 340	17,9	0,2	1,2
Si 380	45,7	0,5	1,0
Si 440	159,4	1,1	0,7
Si 500	187,1	1,2	0,6
Si 675	277,5	1,2	0,4
Si 870	353,4	1,2	0,3
Si 937	377,9	1,1	0,3
Si 1020	308,0	0,9	0,3
InGaAs 1020	430,0	1,3	0,3
InGaAS 1640	1816,4	6,1	0,3

Tabelle 6.3.: Strahldichteempfindlichkeiten mit zugehörigen Standardunsicherheiten für die Cimel Kanäle bestimmt durch die Messungen mit RedIS.

Mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulationsmethode werden die Unsicherheiten bestimmt. Die Unsicherheitskomponenten für diese Messungen setzen sich dabei sowohl aus den Unsicherheiten der Kalibrierungen des Strahlers zusammen, als auch aus Unsicherheiten des Radiometers und den Messbedingungen. Das statistische Rauschen setzt sich aus den Dunkelmessungen des Cimels sowie der Standardabweichung des Mittelwerts zusammen. Die Dunkelmessungen enthalten sowohl das interne Rauschen des Geräts, als auch Streustrahlung während der Messung durch die Umgebung des Messplatzes.

Für RedIS wurde ein Drift in der Signalstabilität eine Unsicherheit von $1 \cdot 10^{-4}$ angenommen, der im Vergleich zu den anderen Unsicherheitsbeiträgen kaum ins Gewicht fällt. Eine Unsicherheitsquelle wäre die Stabilität der Lampen, aber auch der Einfluss der Ulbricht-Kugel, bspw. Temperaturschwankungen können die Stabilität beeinträchtigen. Um dies abzuschätzen wird der Photostrom des eingebauten Photometerkopfes zu Beginn der Messung und am Ende der Messung ausgelesen. Der Einfluss der Homogenität des

Strahlungsfeldes wird durch einen Korrekturfaktor in der Messunsicherheit berücksichtigt. Aus der Messung der Homogenität des Strahlungsfeldes wird ein Korrekturfaktor bestimmt, der bei der Strahldichteempfindlichkeitsbestimmung des Cimel-Radiometers berücksichtigt werden muss. Die Faltung der relativen Empfindlichkeitsverteilung der gemessenen Fläche des Strahlungsfeldes und die Fläche, die ein Empfänger dieses Strahlungsfeldes misst wird berechnet und zur Korrektur genutzt:

$$f_{\text{Homogenität}}(\lambda) = \left[\iint_A s_{\text{rel},DUT}(x,y,\lambda) dx dy \middle/ \iint_A s_{\text{rel},DUT}(x,y,\lambda) \cdot E_{\text{rel}}(x,y,\lambda) dx dy \right] \cdot \left[\iint_A s_{\text{rel},ref}(x,y,\lambda) \cdot E_{\text{rel}}(x,y,\lambda) dx dy \middle/ \iint_A s_{\text{rel},ref}(x,y,\lambda) dx dy \right] \quad (6.7)$$

Gleichung 6.7 beschreibt allgemein die Bestimmung des Korrekturfaktors der Homogenität mit einem bekannten Empfänger (REF) und einem Detektor, dessen Homogenität bestimmt werden soll (DUT). Der Korrekturfaktor $f_{\text{Homogenität}}(\lambda)$ dient der Korrektur der Inhomogenität der Empfindlichkeit der Detektoren und der Empfänger des während der Messung genutzten Strahlungsfeldes.

Für die Kalibrierung spektraler Strahldichte dieses Normals wurde die spektrale Strahldichte eines 2 mm x 2 mm großen Flächenelements in der Mitte der Abstrahlfläche wurde durch Vergleich mit der bekannten Strahldichte des Primärnormals, dem Hochtemperatur Schwarzkörperstrahlers, bestimmt. Die Temperatur dieses Schwarzen Strahlers wird mit Hilfe einer kalibrierten Wolframstreifenlampe und mit kalibrierten Filterradiometern bestimmt. Die Strahlungstemperatur der Wolframlampe ist auf den Gold-Fixpunkt-Schwarzkörper der PTB zurückgeführt, die spektrale Strahldichteempfindlichkeit der Filterradiometer ist rückführbar auf das Kryoradiometer der PTB, vgl. Abbildung 3.1.

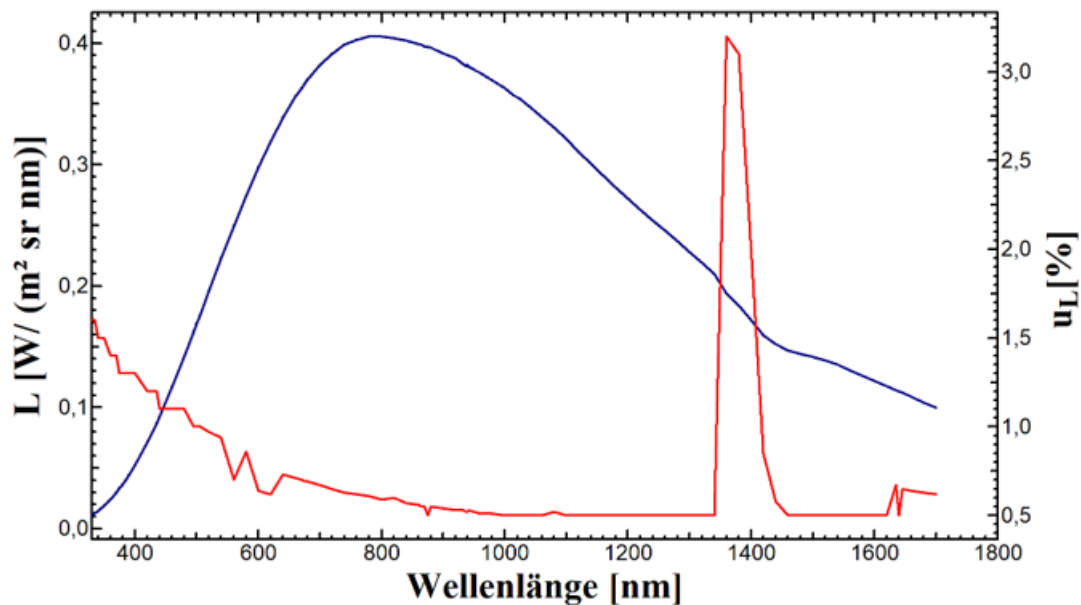


Abbildung 6.2.: Spektrale Strahldichte des Strahldichtenormals *RedIS* (blau) und zugehörigen relativen Unsicherheiten (rot).

Abbildung 6.2 zeigt die aus der Kalibrierung resultierende spektrale Strahldichte und die zugehörigen Unsicherheiten für RedIS. Auffällig sind dabei die hohen Unsicherheiten um 1400 nm. In diesem Bereich gibt es eine starke Absorptionsbande von Wasserdampf. Die Absorption kann bereits durch die Luftfeuchtigkeit im Inneren der Kugel auftreten und Änderungen in der optischen Strecke hervorrufen [87]. Die Unsicherheiten aus der Kalibrierung wurden für die Bestimmung der Strahldichteempfindlichkeiten der einzelnen Kanäle des Cimel-Radiometers berücksichtigt.

Eine weitere Möglichkeit die spektrale Strahldichteempfindlichkeit kann über ein Reflexionsnormal realisiert werden.

6.3. Strahldichteempfindlichkeitskalibrierung über ein Reflexionsnormal und eine Normallampe

Eine zweite Möglichkeit, die Cimel-Radiometer bezüglich ihrer Strahldichteempfindlichkeit zu kalibrieren besteht darin, ein Reflexionsnormal in Verbindung mit einem Strahlernormal, z. B. einer Normallampe, zu verwenden. Reflexionsnormale sind bezüglich ihres Reflexionsgrades in Abhängigkeit der Wellenlänge charakterisiert, so dass eine von der Fläche des Strahldichtenormals reflektierte und bekannte Bestrahlungsstärke mit Hilfe dieses Faktors auf eine Strahldichte umgerechnet werden kann.

Für den Aufbau der Charakterisierung wurde eine mit BaSO₄ gespachtelte Tablette verwendet und für diese Messungen bezüglich ihres Reflexionsgrades kalibriert. Als Strahlungsquelle dient eine auf Bestrahlungsstärke kalibrierte Lampe. Die Tablette hat eine 0/45

Anordnung, was bedeutet, dass der Strahler in 0° zur Tablette steht und der Empfänger, das Cimel-Radiometer, in einem Winkel von 45° zur Tablette. Abbildung 6.3 zeigt den schematischen Messaufbau für die Strahldichtemessungen mit Hilfe der Tablette.

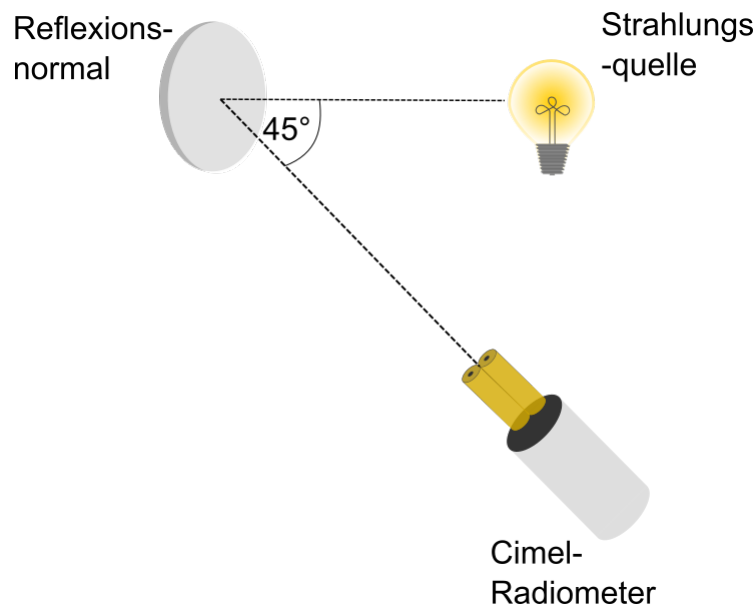


Abbildung 6.3.: Schematischer Aufbau zur Strahldichtekalibrierung mit Hilfe eines Reflexionsnormals und einer Lampe. Der Strahler steht dabei in 0° zum Normal, das Cimel-Radiometer im 45° Winkel zur Tablette.

Abbildung 6.3 zeigt den Aufbau zur Bestimmung der Strahldichteempfindlichkeit des Cimel-Radiometers mit Hilfe des Reflexionsnormals und der Lampe. Die Strahldichtetablette ist bzgl. dieser Winkel kalibriert. Realisiert wurde dieser Aufbau durch zwei Photometerbankelemente, die exakt ausgerichtet werden müssen. Für die Einjustage wurden mehrere bidirektionale Laser verwendet, welche die optische Achse definierten.

Über die bekannte Bestrahlungsstärke der Lampe $E_\lambda(\lambda)$ und dem spektralen Strahldichtefaktor $\beta_{0^\circ:45^\circ}$ der Tablette kann die Strahldichte rechnerisch bestimmt werden [88]:

$$L_{\lambda,0^\circ:45^\circ,calc}(\lambda) = \frac{E_\lambda(\lambda) \cdot \beta_{0^\circ:45^\circ}}{\pi} \quad (6.8)$$

$L_{\lambda,0^\circ:45^\circ,calc}(\lambda)$ ist damit die Strahldichte, die vom Reflexionsnormal ausgeht. Die berechnete Strahldichte ist mit zugehöriger relativer Unsicherheit in Abbildung 6.4 gezeigt:

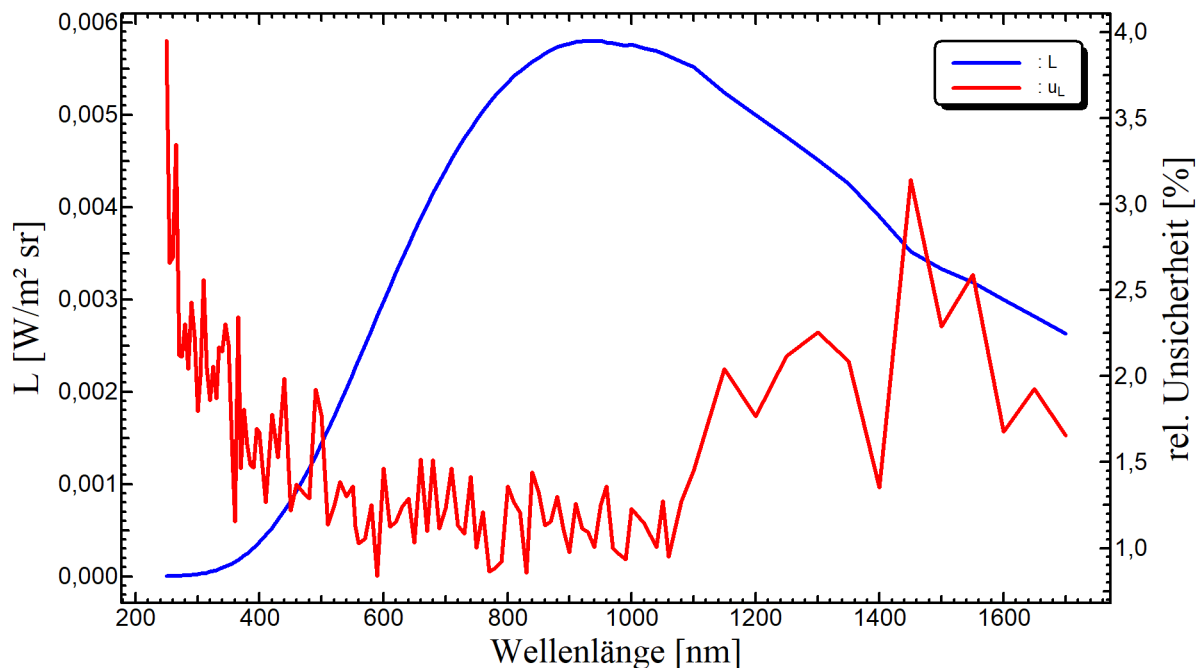


Abbildung 6.4.: Berechnete Strahldichte für die vom Reflexionsnormal ausgehende Strahldichte mit zugehöriger Unsicherheit. Als Strahler wurde eine Lampe verwendet

Die Strahldichte, die pro Kanal gemessen wird, berechnet sich aus der Faltung der relativen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit $s(\lambda)$, vgl. Abschnitt 5.2, des Cimel pro Kanal und der berechneten Strahldichte aus:

$$L_{\text{Channel}} = s(\lambda) \cdot L_{\lambda,0^\circ:45^\circ,\text{calc}}(\lambda) d\lambda \quad (6.9)$$

Die Strahldichteempfindlichkeit pro Kanal kann nun durch die mit dem Cimel gemessenen Werte pro Kanal bestimmt werden durch:

$$s_L = \frac{\text{counts}(\text{Channel})}{L_{\text{Channel}}} \quad (6.10)$$

Damit ergeben sich die in Tabelle 6.4 angegebenen Strahldichteempfindlichkeiten und durch Monte-Carlo-Simulation bestimmte Unsicherheiten:

Cimel Channel [nm]	s_L $\left[\text{counts}/\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{sr}} \right]$	u_{s_L} $\left[\text{counts}/\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{sr}} \right]$	u_{s_L} [%]
Si 340	19	11	57
Si 380	44,8	4,0	8,9
Si 440	156,4	2,6	1,7
Si 500	184,7	2,5	1,4
Si 675	275,7	2,4	0,9
Si 870	356,1	3,0	0,84
Si 937	380,7	2,8	1,5
Si 1020	311,6	3,0	0,96
InGaAs 1020	443,2	4,3	0,97
InGaAs 1640	1883	29	1,5

Tabelle 6.4.: Strahldichteempfindlichkeiten mit zugehöriger Standardmessunsicherheit für die Cimel Kanäle bestimmt durch die Messungen mit einem BaSO_4 basiertem Strahldichtenormal.

Für die Kalibrierung mit Hilfe der BaSO_4 gespachtelten Tablette ergeben sich im Vergleich zu den Messungen mit *RedIS* große Unsicherheiten, die mit der Monte-Carlo Simulationsmethode bestimmt wurden. Diese sind zum größten Teil dadurch zu begründen, dass sehr kleine Signale gemessen wurden, die nur unwesentlich größer sind als die Dunkelsignale, also ein kleines Signal-zu-Rauschen Verhältnis vorliegt. Das liegt zum einen daran, dass die verwendete Quelle in den entsprechenden Bereichen vergleichsweise wenig Leistung hat als auch daran, dass diese mit der Entfernung zur Tablette kleiner wird und Verluste durch die Reflexion auf der Tablette auftreten. Das Ishikawa-Diagramm 6.5, nach *K. Ishikawa* [89], zeigt eine Zusammenfassung der Einflussgrößen, welche im weiteren genauer beschrieben werden.

brierung der Lampe und der damit weitergegebenen Messunsicherheit berücksichtigt. Einen Beitrag zur Unsicherheit geben jedoch die in Abschnitt 5.1 bestimmten Referenzebenen.

Ebenso wird mit der Messunsicherheit des Reflexionskoeffizienten der Tablette verfahren. Zur entsprechenden Kalibrierungen liegen Unsicherheiten vor, die bei der Berechnung der Strahldichte mit eingehen, was auch auf die Bandpassempfindlichkeiten des Cimels angewandt wird. Diese wurden in Abschnitt 5.2 bestimmt. Die in dem Zuge bestimmten Unsicherheiten für die Bandpassempfindlichkeiten fließen ebenso in diese Betrachtung ein.

Nicht zu vernachlässigen ist in diesem Messaufbau die Unsicherheit, die durch die Justage einhergeht. Die drei Hauptkomponenten des Aufbaus, also Lampe, Strahldichtenormal und Cimmel sind stark von der richtigen Justage abhängig. Was sich bei der Lampe in der Bestrahlungsstärke auswirkt, so ist vor allem bei der Tablette auf eine korrekte Winkeljustage zu achten, da sie in einer $0^\circ : -45^\circ$ -Anordnung kalibriert ist. Elementar für eine korrekte Messung ist auch die Ausrichtung des Cimmel-Radiometers.

Unsicherheitsquelle	Beitrag zur Unsicherheit	relative Standardunsicherheit
Bestrahlungsstärke	Stabilität (Lampe)	0,01 %
	Lampenstrom	0,3 %
	Kalibrierung (Bestrahlungsstärke)	0,5 %
	Justage (Abstand Lampe-Tablette)	0,3 %
Strahldichte	Reflexionsfaktor (Kalibrierung)	0,3 %
	Homogenität (Strahlungsfeld Tablette)	0,5 %
	Justage (Kippung Tablette)	1 %
Radiometer	Justage (Kippung)	1 %
	Streulicht	1,4 %
	Rauschen	0,7 %
	Bandpassfunktion	0,4 %

Tabelle 6.5.: Messunsicherheitsbeiträge für die Messungen der Strahldichteempfindlichkeit mit einem BaSO_4 basiertem Reflexionsnormal und einer Lampe am Beispiel des 675 nm-Kanals mit relativen Standardunsicherheiten.

Die in Tabelle 6.5 dargestellten Unsicherheiten fassen jene Unsicherheiten zusammen, die vom Strahler, realisiert durch Lampe und Reflexionsnormal, und dem Radiometer ausgehen. Die Unsicherheiten ergeben sich bei der Lampe aus der Bestrahlungsstärkekalibrierung, dem Abstand zwischen Tablette und Lampe, der mit einer Unsicherheit von 1 mm auf einen Abstand von 500 mm behaftet wurde, sowie eines Korrekturfaktors für eine Dejustage, die zum einen den Abstand zwischen Lampe und Tablette beinhaltet. Bei einer Verstellung des Winkels der Tablette zur Strahlungsquellen um 1° wurde Veränderungen im gemessenen Signal von $\sim 1\%$ festgestellt, was daher als Unsicherheit für die Verkippung angenommen

wurde. Für die übrigen Kanäle wurde auf gleiche Weise verfahren.

Die Umrechnung von Bestrahlungsstärke in Strahldichte erfolgt mit dem Reflexionsfaktor β der Tablette, die durch ihre Kalibrierung auch mit einer Unsicherheit versehen wurde. Die Abweichung Homogenität des daraus resultierenden Strahlungsfeldes wird mit 0,5 % abgeschätzt. Es wurde eine Justagekorrektur von 1 % für die Verkippung bzw. Winkelfehler abgeschätzt.

Die Unsicherheiten für das Radiometer sind als statistische Werte für das Cimel zusammengefasst. Darin sind sowohl die Standardabweichung der Messwerte, sowie Dunkelwerte. Die Dunkelmessungen beinhalten demnach das interne Rauschen des Geräts, aber auch den deutlichen Einfluss von Streulicht auf die Messung.

Ein numerischer Vergleich der Laborkalibrierungsmöglichkeiten wird im nächsten Abschnitt gezeigt und diskutiert.

6.4. Vergleich der Laborkalibrierungen des Cimel-Radiometers

In den vorherigen Kapiteln wurden verschiedene Möglichkeiten der Laborkalibrierung für die Cimel-Radiometer aufgezeigt. Die Methoden führten zum einen über eine Messung im Bestrahlungsstärkemode am Tulip-Setup, zum anderen über Strahldichtemessungen mit Hilfe einer Ulbricht-Kugel und eines Strahldichtenormals in Form einer Tablette. Um die Eignung der verschiedenen Methoden bewerten zu können, soll zunächst ein Vergleich der Kalibrierwege erfolgen. Tabelle 6.6 stellt eine Übersicht der gemessenen Strahldichteempfindlichkeiten mit zugehörigen Messunsicherheiten dar, die in den vorherigen Kapiteln diskutiert wurden.

Cimel Channel [nm]	$s_L(\text{Tulip})$ [counts/ $\frac{W}{m^2 sr}$]	$s_L(\text{Lampe})$ [counts/ $\frac{W}{m^2 sr}$]	$s_{L_{\lambda,0^\circ:45^\circ}}(\text{Tablette})$ [counts/ $\frac{W}{m^2 sr}$]	$s_L(\text{RedIS})$ [counts/ $\frac{W}{m^2 sr}$]
Si 340	18,4 (0,4)	18,5 (0,5)	19 (22)	17,9 (0,5)
Si 380	46,7 (0,4)	47,1 (0,9)	44,8 (8,2)	45,7 (1,9)
Si 440	163,4 (0,8)	164,7 (0,8)	156,4 (5,2)	159,4 (2,2)
Si 500	192,4 (1,2)	193,1 (0,8)	184,7 (5,0)	178,1 (2,4)
Si 675	283,5 (1,4)	284,8 (1,3)	275,7 (4,8)	277,5 (2,4)
Si 870	360,3 (3,0)	360,4 (1,2)	356,1 (6,0)	353,4 (2,4)
Si 937	385,2 (3,4)	385,8 (1,8)	380,7 (5,4)	377,9 (2,2)
Si 1020	311,6 (1,9)	310,8 (2,3)	311,6 (6,0)	308,0 (1,9)
InGaAs 1020	444,0 (6,4)	440,9 (5,3)	443,2 (8,6)	430,0 (2,6)
InGaAs 1640	1850,0 (24,0)	1837,0 (22,0)	1883,0 (58,0)	1816,4 (12,2)

Tabelle 6.6.: Vergleich der auf vier unterschiedlichen Methoden basierten Labormessungen bestimmten Strahldichteempfindlichkeiten. In Klammern sind die erweiterten absoluten Messunsicherheiten angegeben.

Die Tabelle 6.6 gibt einen Überblick über die mit verschiedenen Messaufbauten bestimmten Strahldichteempfindlichkeiten pro Kanal und die zugehörigen Unsicherheiten. Eine graphische Darstellung der Ergebnisse ist in Kapitel 10 zu finden. Auffällig sind dabei die vergleichsweise hohen Unsicherheiten bei der Messung mit dem Reflexionsnormal. Eine maßgebende Verbesserung wäre ein höheres Signal speziell in den unteren Kanälen bei 340 nm und 380 nm. Die Streulichtbeiträge und Dunkelsignale der Messungen zeigten sich als einer der größten Beiträge zur Unsicherheit. Weitergehend müsste für eine Reduktion der Unsicherheiten im Zuge einer geplanten Etablierung dieser Methoden Verbesserung an den Messaufbauten vorgenommen werden. Speziell der Aufbau zu Strahldichteempfindlichkeit mit Hilfe einer BaSO₄-basierten Tablette zeigte sich sehr anfällig gegenüber kleinster Dejustagen. Berücksichtigt man diesen Aspekt, ist es sowohl einfacher als auch mit geringerer Unsicherheit behaftet, Messungen an festen Messplätzen ähnlich dem TULIP-Setup durchzuführen. Solche spektralen Kalibrierungen wären nur von einigen Referenzgeräten möglich, jedoch nicht von jedem einzelnen Netzwerkradiometer. Eine praktikable Lösung wäre daher die Verwendung eines Strahldichtenormals kombiniert mit einer vereinfachten FOV-Messung, um auf Bestrahlungsstärkeempfindlichkeiten schließen zu können.

Sowohl der Aufbau der Strahldichteempfindlichkeitsmessung mit einem Reflexionsnormal als auch das Lasersystem sind zudem keine portablen Aufbauten. Innerhalb des AERO-NET und auch im Vergleich mit anderen Aerosolüberwachungsnetzwerken ist es üblich, dass Kalibrierquellen zu Messkampagnen mitgeführt werden. Daher soll der Ansatz der Kalibrierung mit einer Ulbricht-Kugel weiter verfolgt werden. Die für diesen Vergleich verwendete Ulbricht-Kugel hat jedoch den Nachteil, dass sie mit Lampen betrieben wird, deren Verfügbarkeit nimmt jedoch aufgrund der schrittweisen Einstellung der Produktion von Glühlampenprodukten ab. Daher wurde eine LED-basierte Strahldichtequelle entwickelt, die im folgenden Kapitel beschrieben und charakterisiert wird.

7. Entwicklung und Charakterisierung einer LED-basierten Strahldichtequelle

In der Photometrie und der Radiometrie werden Transferrnormale für Leuchtdichte bzw. spektrale Strahldichte auf Basis von Ulbricht-Kugeln, meist mit Halogenlampen als Lichtquellen, verwendet. Im AERONET werden auch solche Quellen auf Basis von Ulbricht-Kugeln verwendet, allerdings nicht als Transferrnormale für die spektrale Strahldichte, sondern als großflächige homogene Strahlungsquellen, um die Kalibrierwerte eines Master-Instruments auf ein Netzwerkradiometer im direkten Substitutionsverfahren zu übertragen, vgl. Kapitel 2. Diese Art von Quelle hat den Vorteil, dass sie transportabel und weitestgehend robust ist. Da die Verfügbarkeit von Glühlampen allmählich abnimmt, ist es notwendig, moderne und neue Quellen zu entwickeln. Für die Cimel-Radiometer wurde daher eine LED-basierte Quelle entwickelt.

Die Voraussetzungen, die diese Strahldichtequelle erfüllen muss, sind:

- die Quelle muss großflächig und homogen sein
- die LEDs müssen die Radiometerbänder von 340 nm - 1640 nm abdecken
- ein stabiler und reproduzierbarer Strahlungsfluss muss gewährleistet sein
- die Quelle muss über eine ausreichend hohe Strahlung für die Verwendung mit Cimel-Radiometern verfügen

In diesem Kapitel wird das Design der entwickelten LED-Quelle und die relevanten Eigenschaften wie die spektrale Verteilung, Stabilität und räumliche Homogenität vorgestellt.

7.1. Auswahl der LED

In diesem Kapitel wird zunächst auf die Entwicklung der LED-basierten Quelle eingegangen. Beschrieben wird zunächst die Auswahl der LEDs. Das LED-Spektrum ist schmalbandig und bietet nicht wie Glühlampen ein kontinuierliches Spektrum über einen größeren Wellenlängenbereich. Die schmalbandigen Spektren der einzelnen LEDs stellen die technische Herausforderung, LEDs mit passenden Spektren zu selektieren und zu kombinieren, damit das resultierende Spektrum der LEDs einerseits die spektralen Bandpässe der Radiometerkanäle vollständig abdeckt und andererseits das Produkt der spektralen Faltung der Bandpassfunktion des Radiometerkanals und des Spektrums möglichst unempfindlich gegenüber einer spektralen Verschiebung der LEDs ist. Zusätzlich zu den oben aufgeführten Voraussetzungen müssen die Abmaße der LED-Quelle passend für die Input Ports der Ulbricht-Kugel sein.

Dazu werden möglichst passend LEDs herausgesucht und folgend mit den in Abschnitt 5.2 bestimmten Bandpassfunktionen verglichen, um die Abdeckung der spektralen Bandpässe der Radiometerkanäle zu überprüfen. Die Auswahl der LEDs richtet sich dabei nach den Peakwellenlängen der Radiometerkanäle und der Verfügbarkeit. Für den LED-Typ entscheidend ist zudem eine Umsetzung einer Temperaturregelung, da sowohl der Output als auch die Peakwellenlänge von LEDs abhängig von der Temperatur sind, vgl. Abschnitt 4.4.4. Daher wurde die Auswahl auf Surface Mounted Devices (kurz: *SMD*) beschränkt.

Vergleich mit den Bandpassfunktionen

Eine Anforderung der LED-basierten Quelle ist das Ausfüllen der Radiometerkanäle. Bei kontinuierlichen Spektren wie derer, die durch Glühlampen erzeugt werden, haben Verschiebungen der Kanäle bei unterschiedlichen Radiometern nur kleine Auswirkungen auf die Unsicherheiten der Messungen. Bei schmalbandigen Spektren wie derer, die von LEDs erzeugt werden, fällt eine eventuelle Verschiebung deutlicher ins Gewicht.

In Abschnitt 5.2 wurde die Bestimmung der relativen Empfindlichkeiten des Cimel-Radiometers beschrieben. Die hier ermittelten Bandpassfunktionen werden nun mit den gemessenen Spektren der LEDs verglichen, um zu sehen, wie gut die Kanäle ausgefüllt werden.

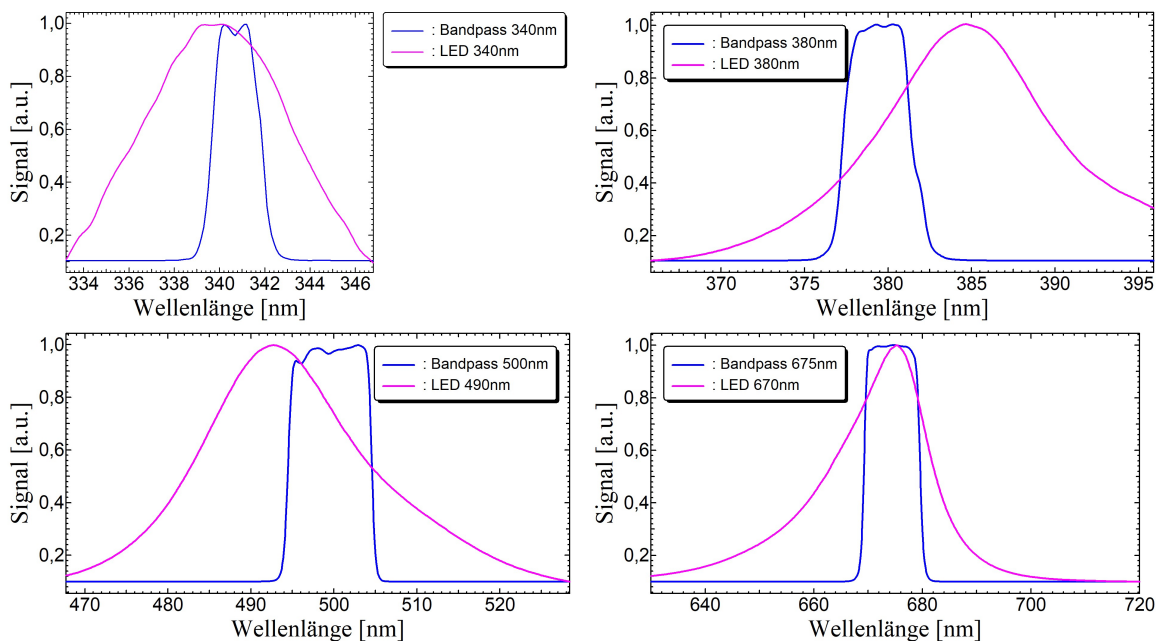


Abbildung 7.1.: Vergleich der gemessenen Bandpassfunktionen mit dem gemessenen Spektrum der LEDs für den 340 nm-Kanal (oben links), 380 nm-Kanal (oben rechts), 500 nm-Kanal (unten links) und den 675 nm-Kanal (unten rechts). In der Legende sind die nominellen Peakwellenlängen der LEDs angegeben.

Abbildung 7.1 zeigt an Beispielen die Abdeckung der Radiometerkanäle durch die LEDs. Während die Kanäle bei 340 nm und 675 nm ausreichend durch die LEDs abgedeckt sind, ist bei den Kanälen 380 nm und 500 nm zu erkennen, dass Bandpass und LED Spektrum

gegeneinander verschoben sind, aber durchaus ausreichend Strahlung detektierbar ist, was auch durch Messungen mit dem Cimel verifiziert werden konnte, vgl. Tabelle 7.1. Allerdings ist dieser Füllgrad für die Quelle in soweit nicht optimal, als dass sich die Unsicherheiten spürbar erhöhen, wenn die Flanke der LED Peaks gemessen wird. Zudem war bei einigen Kanälen nur sehr wenig Signal. Tabelle 7.1 zeigt die mit einem Cimel Radiometer gemessenen Signale.

Cimel Channel	Signal [counts]
Si 340	2818
Si 380	8087
Si 440	52009
Si 500	70739
Si 675	243178
Si 870	55807
Si 937	108204
Si 1020	3286
InGaAs 1020	4532
InGaAs 1640	5632

Tabelle 7.1.: Gemessene Signale mit einem Cimel-Radiometer in Geräteeinheiten (counts) von Platine 1.

Bei den gemessenen Signalen fällt auf, dass die Kanäle im Bereich 440 nm bis 937 nm im Vergleich zu den beiden UV-Kanälen 340 nm und 380 nm und den IR-Kanälen 1020 nm und 1640 nm große Signale aufweisen. Daher wurden auf Platine 2 baugleiche LEDs verbaut, um die Signale in diesen Bereichen zu verstärken. Um die Probleme der Abdeckung der Radiometerkanäle und der geringen Signale zu lösen wurden weitere LEDs für eine zweite Platine ausgesucht, die einzelne Kanäle in Kombination mit den vorhandenen ausfüllen sollen. Tabelle 7.2 gibt einen Überblick über die verwendeten LEDs, die nun auf zwei Platinen verteilt sind.

Cimel Channel [nm]	LED Spezifikationen (Platine 1)	I [mA]	LED Spezifikationen (Platine 2)	I [mA]
340	340± 5 nm 44 mW 350 mA	310	340± 5 nm 44 mW 350 mA 2 LEDs	310
380	380-385 nm 90 – 160 mW 350 mA	310	375 nm 560 mW 500 mA	450
440	430± 15, nm 500 mW 350 mA	310		
500	490± 26 nm 240 mW 350 mA	310	515 nm 230 mW 350 mA	310
675	670± 20 nm 520 mW 600 mA	450		
870	880± 43 nm 320 mW 800 mA	720	870 nm 440 mW 1000 mA	720
937	940± 40 nm 630 mW 1000 mA	720		
1020	1050± 48 nm 35 mW 500 mA	450	1050 nm 700 mW 1000 mA	720
1640	1650± 50 nm 16 mW 500 mA	450	1650 nm 16 mW 500 mA 2 LEDs	450

Tabelle 7.2.: Spezifikationen der LEDs der erweiterten Quelle. Platine 1 beschreibt die ursprüngliche Version, Platine 2 ist eine zusätzliche Platine zur Ergänzung.

Für manche Kanäle des Cimels wurden keine ergänzenden oder zusätzlichen LEDs verbaut, da das Signal ausreichend war oder der Bandpass des Cimels mit dem Peak der verbauten LED auf der Platine 1 ausreichend stimmig war. Die Anordnung der Platine 1 ist im nächsten Abschnitt gezeigt, die Anordnung für Platine 2 ist im Anhang B zu finden.

7.2. Design der LED-Quelle

7.2.1. Entwicklung der Schaltung basierend auf den Eigenschaften der LEDs

Die verwendeten LEDs weisen unterschiedliche maximale Ströme auf, mit denen jene betrieben werden können. Um die LEDs mit möglichst viel Leistung zu betreiben, wurde eine Platine mit drei Stromkreisen erstellt, die Ströme sind 310 mA, 450 mA und 720 mA.

Die ausgewählten LEDs wurden kreisförmig auf einer Platine angeordnet, um die verfügbare Fläche eines Inputports einer Ulbricht-Kugel möglichst gut auszunutzen, siehe Abbildung 7.2.

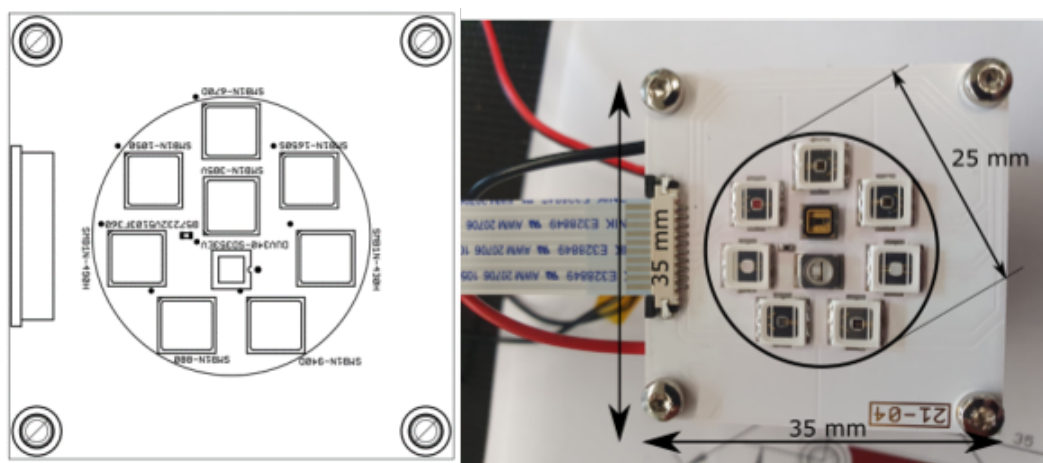


Abbildung 7.2.: Anordnung der SMD LEDs auf der Platine 1 [90].

Die Anordnung der LEDs ermöglicht es, die Platine mit einem speziellen Halter direkt an die Ulbricht-Kugel zu flanschen, deren Input Port einen Durchmesser von 25 mm besitzt, so dass die LEDs direkt in die Kugel strahlen können.

7.2.2. Temperaturstabilisierung der LED-Platine

Für eine möglichst konstante Leistung wird die Platine mit einem Peltierelement temperaturstabilisiert. Auf der Platine sitzt ein Temperatursensor, über den die Temperatur der Platine ausgelesen werden kann. Durch diese Bauart wird die Platinentemperatur gemessen, nicht die Temperatur der einzelnen LEDs. Im weiteren wird zu überprüfen sein, ob diese Art der Stabilisierung ausreichend für eine stabile Quelle ist, da die Temperatur direkten Einfluss auf das Spektrum und die Leistung der LEDs hat.

Die Messergebnisse von Leuchtdioden hängen stark von ihren thermischen Bedingungen ab [91]. Um reproduzierbare Ergebnisse mit geringen Unsicherheiten zu erzielen, ist es entscheidend, die Sperrschichttemperatur einer LED während der optischen Messung genau einzustellen und zu kontrollieren.

Bei niedrigeren Temperaturen wird die Bandlücke größer, weil der Gitterparameter des Halbleiters kleiner wird, bildlich rücken Atome näher zusammen. Dies führt dazu, dass die Valenzelektronen näher an andere Valenzelektronen herankommen, wodurch sich die elektrostatische potenzielle Energie erhöht, siehe:

$$U = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (7.1)$$

wobei r der Abstand zwischen einem freien Elektron und einem Valenzelektron ist, ϵ_0 ist die Permittivität, q und Q sind freie Ladungen. r nimmt ab, wodurch sich U erhöht. Die höhere elektrostatische potenzielle Energie der Elektronen führt zu einer größeren Bandlücke, da es für die Elektronen aufgrund der Wechselwirkungen schwieriger wird, in das Leitungsband zu gelangen.

Steigt die Umgebungstemperatur an, so verschiebt sich die spektrale Verteilung in die Richtung der höheren Wellenlängen. Die Verschiebung der Peakwellenlänge beträgt typischerweise zwischen 0,1 nm/K und 0,3 nm/K [92]. Die an diesen Platinen verbaute Temperaturstabilisierung gewährleistet eine konstante Temperatur mit $\pm 0,1$ K, was eine Verschiebung von 0,01 nm/K und 0,03 nm/K verursachen würde. Diese Verschiebungen sind für die Messungen mit dem Cimel-Radiometer kaum relevant, so dass diese Genauigkeit für eine LED-basierte Strahldichtequelle ausreicht.

In der Praxis werden in der Photometrie LEDs die Spannungen jeder LED einzeln vermessen. Über die Beziehung $U_{LED} \propto T_{LED}$ kann dann auf die Sperrschichttemperatur geschlossen werden. Für die gegebenen Randbedingungen ist es hier nicht möglich, die Temperatur oder die Spannung jeder LED einzeln zu messen. Die Spannungen werden nur für jeden einzelnen der Stromkreise überwacht und aufgezeichnet. Würde sich eine der Spannungen ändern, könnte man dies im Spektrum aller an diesem Kreis befindlichen LEDs feststellen.

Innerhalb des verwendeten Peltierelements wird sich im laufenden Betrieb ein Temperaturgradient ausbilden, da auf der einen Seite der Sensor platziert ist, auf der anderen Seite die Regelung. Es wird demnach zu überprüfen sein, wie schnell die Temperaturregelung auf äußere Einflüsse reagiert und ob sich dieses in den Spannungsmessungen für die einzelnen Stromkreise der Platine feststellen lässt.

7.2.3. Einbrennen der LEDs

Ähnlich wie andere Strahler wie z. B. Glühlampen verändern sich LEDs und müssen vorgealtert werden. Die Lebensdauer von LEDs ist im Vergleich zu Glühlampen sehr lang, was neben der Energieeffizienz auch einen wichtigen Beitrag zur Nachhaltigkeit leistet. Während der ersten Betriebsstunden können LEDs aufgrund der thermischen Stabilisierung Veränderungen in der Lichtintensität aufweisen.

Die Überwachung der Alterung ist eine weitere Herausforderung. Die Alterung von LED-Lichtquellen kann jedoch durch eine Erhöhung der Sperrschichttemperatur der LEDs beschleunigt werden, die LED-Lichtausbeute wird stark von der Sperrschichttemperatur beeinflusst, die sich aus der Kombination von Strom und Umgebungstemperatur ergibt [93, 94].

Um die LEDs einzubrennen wurden die LEDs zunächst ohne Ulbricht-Kugel vermessen. Es konnte gezeigt werden, dass die LEDs nach einer gewissen Einbrennzeit stabil sind und somit den Anforderungen einer Kalibrierquelle genügen, siehe Abbildung 7.3. Das Einbrennen wurde mit einem Array-Spektralradiometer überwacht. Die Peaks der einzelnen LEDs wurden aufintegriert und auf den ersten Wert normiert, um die Änderung in den Signalen sichtbar zu machen. Abbildung 7.3 zeigt das Einbrennverhalten der einzelnen LEDs.

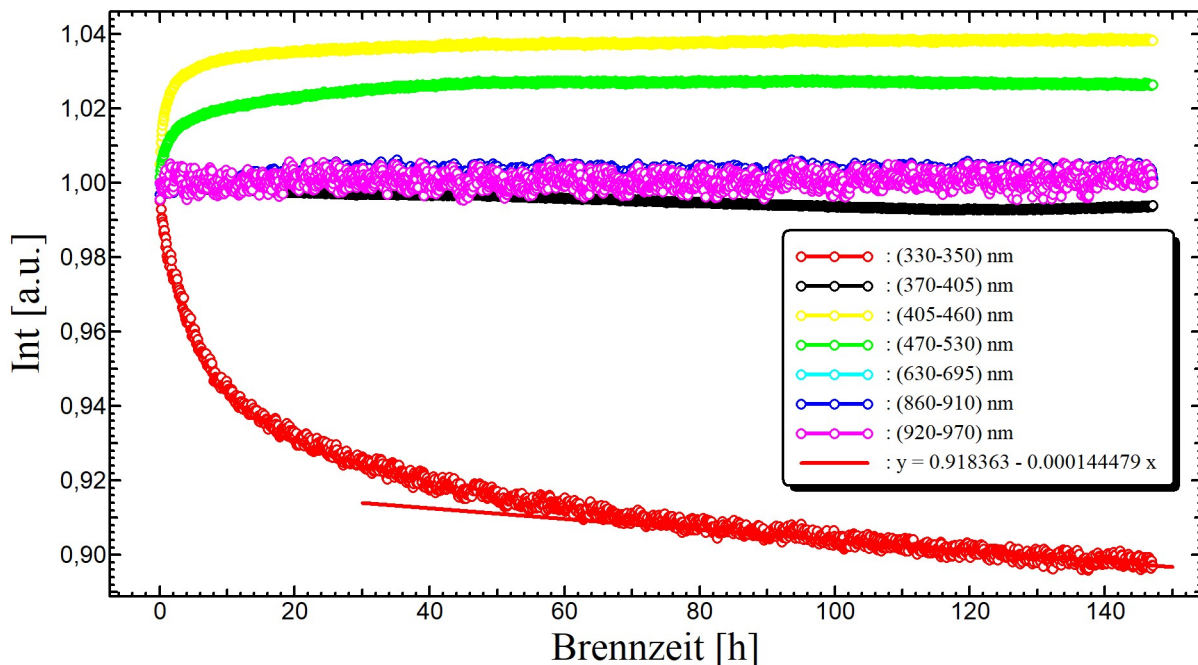


Abbildung 7.3.: Einbrennverhalten der LEDs in einem Zeitraum von über 140 Stunden. Für die 340 nm LED ist eine Ausgleichsgerade für die letzten 20 Stunden in rot eingezeichnet.

Während die LEDs im Bereich ab 500 nm nur wenige Stunden brauchen um sich zu stabilisieren, sieht man für die LEDs mit Wellenlängen größer als 500 nm, dass in den ersten Stunden ein deutlicher Drift zu erkennen ist, der sich nach ca. 40 Stunden stabilisiert. Die LED mit 340 nm Peakwellenlänge (rot) benötigt an die 60 Brennstunden, bis sie sich in einem stabilen Bereich mit einer Signalabnahme von $1 \cdot 10^{-4}$ /h eingebraunt hat (Ausgleichsgerade in rot).

Die LEDs erfüllen demnach die Stabilitätsvoraussetzung für die Quelle, die Veränderung ist vergleichbar mit den bisher für diese Messungen verwendeten Glühlampen.

7.2.4. Verschiebung der Centroidwellenlängen der LEDs bei Veränderung der Umgebungstemperatur

Ähnlich wie in Abschnitt 5.4 wurde die LED-basierte Quelle in einer Klimakammer aufgestellt, um kontrolliert die Umgebungstemperatur zu variieren. Dieses sollte zum einen die Tauglichkeit der Temperaturstabilisierung zeigen, zum anderen, dass, wenn die Umgebungstemperatur Einfluss auf die Schwerpunktswellenlängen hat, wie groß die Abweichungen sind. Diese Abweichungen müssten dann in die Unsicherheitsbetrachtungen bei Messungen einbezogen werden, wie auch der Shift in der Schwerpunktswellenlänge, der vom Gerät bei Temperaturveränderungen ausgeht. Variiert wurde in einem Temperaturintervall zwischen 28 °C und 36 °C. Es ergab sich für die Änderungen der Schwerpunktswellenlängen der einzelnen Kanäle:

Channel	Verschiebung der Schwerpunktswellenlänge [nm/°C]
Si 340	0,0019
Si 380	0,0030
Si 440	0,0025
Si 500	0,0034
Si 675	0,00001
Si 870	0,0009
Si 937	0,0003

Tabelle 7.3.: Schwerpunktswellenlängenverschiebung der LEDs bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen für die einzelnen Kanäle des Cimel-Radiometer.

Tabelle 7.3 zeigt die Veränderungen der Schwerpunktswellenlängen der LEDs unter Veränderung der Umgebungstemperatur pro °C. Die Veränderungen bewegen sich im Bereich von Pikometern und fallen daher nicht ins Gewicht bei späteren Messungen. Die ausgesuchten LEDs scheinen den Anforderungen zu genügen, dass sie eine zeitliche Signalstabilität vorweisen und dass die Temperaturstabilisierung Abweichungen in einem zu vernachlässigen Bereich zulässt.

7.2.5. Einhausung

Da die LEDs wie in Abbildung 7.3 gezeigt die Bedingung der Stabilität erfüllen, wurde nun ein Halter und eine Einhausung für die Quellen gebaut. Diese soll stabil an eine Ulbricht-Kugel anflanschbar sein, gleichzeitig aber leicht genug sein, dass die Ports der

Kugel nicht beschädigt werden. Die Einhausung basiert auf einem Metallring, auf dem die Platine gesetzt wird, der mit Hilfe von spitzen Schrauben an der Kugel angebracht wird.

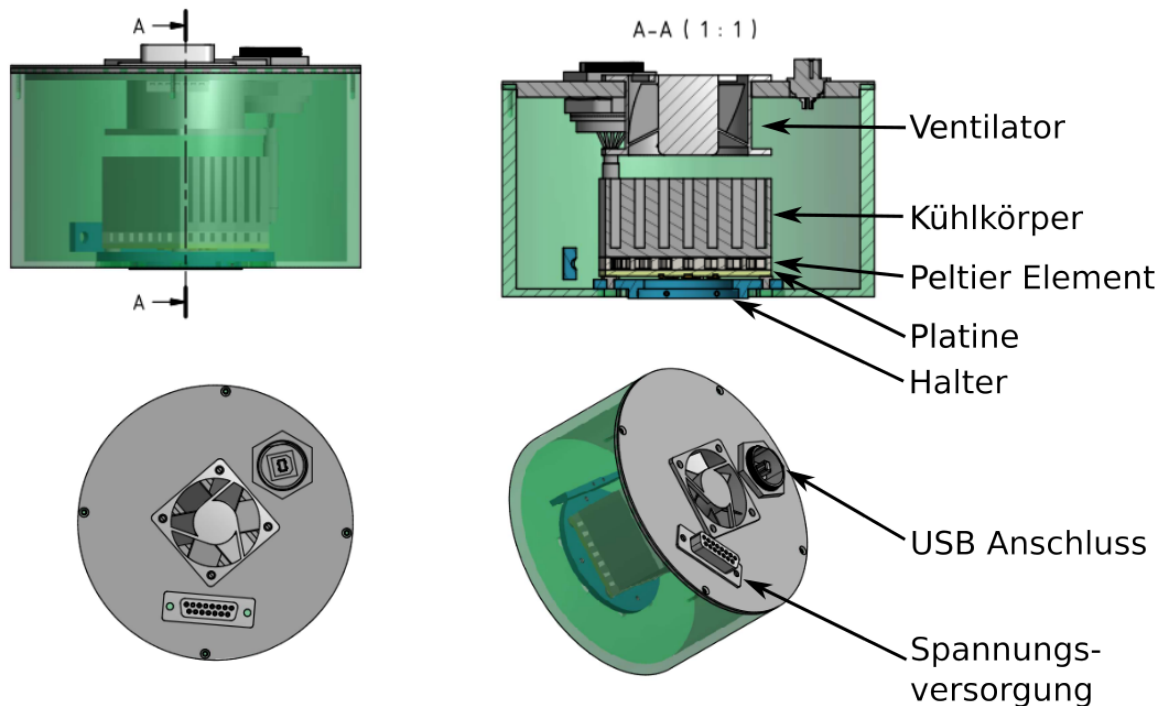


Abbildung 7.4.: Einhausung der LED-Quellen. Die Schnittebene für die Schnittdarstellung wird durch die Punkte A-A angezeigt [95].

Abbildung 7.4 zeigt die Einhausung von der Seite, einen Querschnitt, die Draufsicht und eine seitliche Ansicht. Auf dem Metallhalter, in der Skizze als Halter gekennzeichnet, ist eine aus Kunststoff 3D gedruckte Einhausung angebracht. Die aufliegende Platine ist thermisch vom Metallhalter und somit von der Kugel isoliert. Die Überwachung der Temperatur erfolgt über ein PT100, das über den USB-Port mit Hilfe einer Software [96] ausgelesen werden kann. Die Wärme der Kugel bzw. des Halters hat somit keinen Einfluss auf die Platinentemperatur.

7.2.6. Gesamtspektrum der LED-Quelle

Das Gesamtspektrum wurde mit zwei Spektralradiometern gemessen. Für den Wellenlängenbereich bis 800 nm wurde ein Array-Spektralradiometer, für die Messungen oberhalb von 800 nm ein scannendes Spektralradiometer verwendet. Der untere Bereich wurde in 1 nm Schritten gemessen, der Bereich oberhalb 800 nm in 5 nm Schritten. Das Gesamtspektrum für den Bereich zwischen 300 nm und 1700 nm ist in Abbildung 7.5 gezeigt.

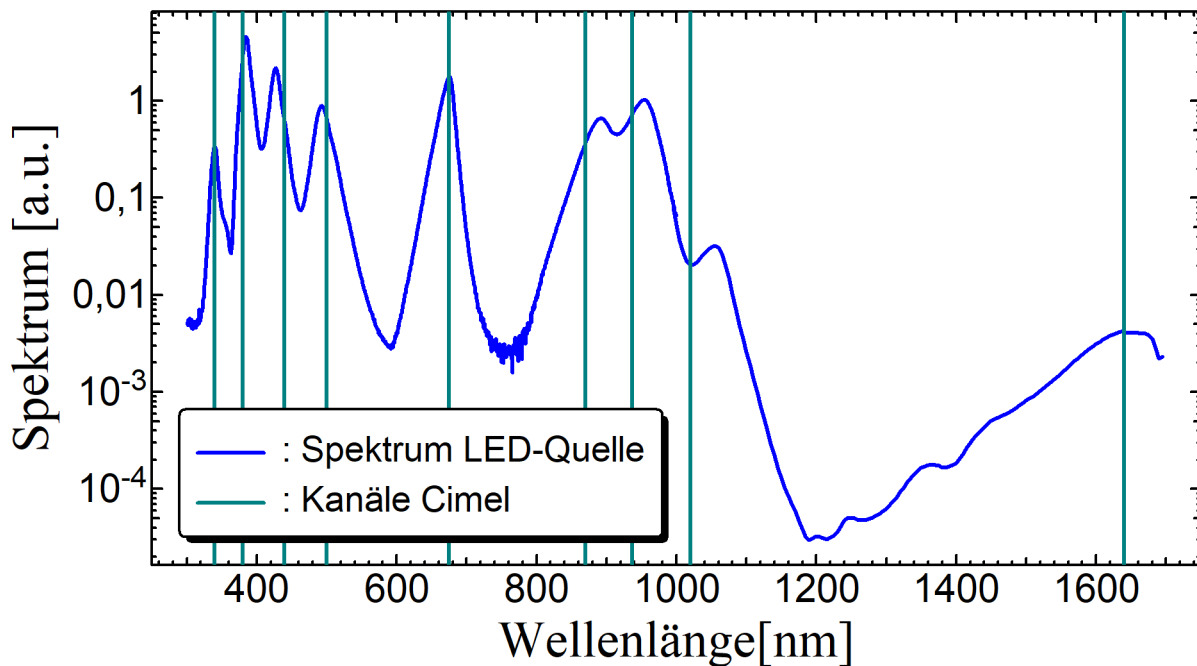


Abbildung 7.5.: Gesamtspektrum der LED-Quellen. In grün sind die Peakwellenlängen der Cimel Kanäle eingezeichnet.

Ein Vergleich des Spektrums in Abbildung 7.5 mit den Kanälen des Cimels zeigt, dass alle Kanäle ausreichend abgedeckt sind. Die zuvor nur unzureichend abgedeckten Kanäle wurden durch die Erweiterung der Quelle weitestgehend aufgefüllt, das Signal bei den leistungsschwachen LEDs wurde durch die Ergänzung weiterer baugleicher LEDs verstärkt. Die spektralen Anforderungen an eine LED-basierte Quelle ist nun insoweit abgeschlossen, dass es gelungen ist, stabile LEDs auszuwählen, die eine ausreichende Abdeckung der Radiometerkanäle aufweist.

Die dafür angefertigte Einhausung ist auf eine Ulbricht-Kugel anflanschbar und beeinträchtigt die Temperaturstabilisierung der LED-Platine nicht. Zu überprüfen ist jedoch das Verhalten der Quelle bei Veränderungen der Umgebungstemperatur, also der Funktionalität der Temperaturstabilisierung.

7.3. Auswahl der Ulbricht-Kugel

Da die LED-basierte Quelle jedoch in Verbindung mit einer Ulbricht-Kugel betrieben werden soll, um eine großflächige Strahlungsquelle zu erhalten, muss jene weitergehend in Verbindung mit einer Kugel untersucht werden. Hierfür können entweder Ulbricht-Kugeln mit einer Bariumsulfat- oder PTFE-basierten Beschichtung verwendet werden, da beide Materialien die erforderliche hohe Reflektivität im gesamten Spektralbereich der LED-Quelle aufweisen, vgl. Abschnitt 4.3.3.

Da mit Bariumsulfat beschichtete Ulbricht-Kugeln kommerziell von verschiedenen Anbietern am günstigsten erhältlich sind, wurde eine solche Ulbricht-Kugel zunächst für die LED-Quelle verwendet. Für die Verwendung der Ulbricht-Kugel mit der LED-Quelle als Referenzquelle müssen noch folgende Anforderungen erfüllt werden:

- der spektrale Durchsatz der Ulbricht-Kugel mit der LED-Quelle muss zeitlich stabil bleiben. Dieser kann aufgrund von kleinsten Änderungen der Reflexions- und/oder Fluoreszenzeigenschaften zeitlich driften [97, 98]
- die Geometrie des Eintrittsports muss eine homogene räumliche Verteilung der eingekoppelten LED-Strahlung über den Austrittsport erzeugen

Die Untersuchungen der ausgewählten Ulbricht-Kugel hinsichtlich dieser beiden Anforderungen werden im nächsten Abschnitt vorgestellt.

7.3.1. Verwendung der LED-Quelle mit einer BaSO₄-basierten Ulbricht-Kugel

Für die zeitliche Stabilitätsuntersuchung der Ulbricht-Kugel wurden die LED-Quellen an den Eintrittsports angebracht und die von dem Austrittsport abgegebene Strahlung mittels eines Array-Spektralradiometers über längere Zeit beobachtet. Da der zeitliche Drift der LED-Strahlung aus vorherigen Messungen bekannt ist, kann ein höherer Drift der Ulbricht-Kugel zugeordnet werden. Die hier verwendete Kugel hat einen Durchmesser von 25 cm, sowie vier Inputports mit jeweils 2,5 cm.

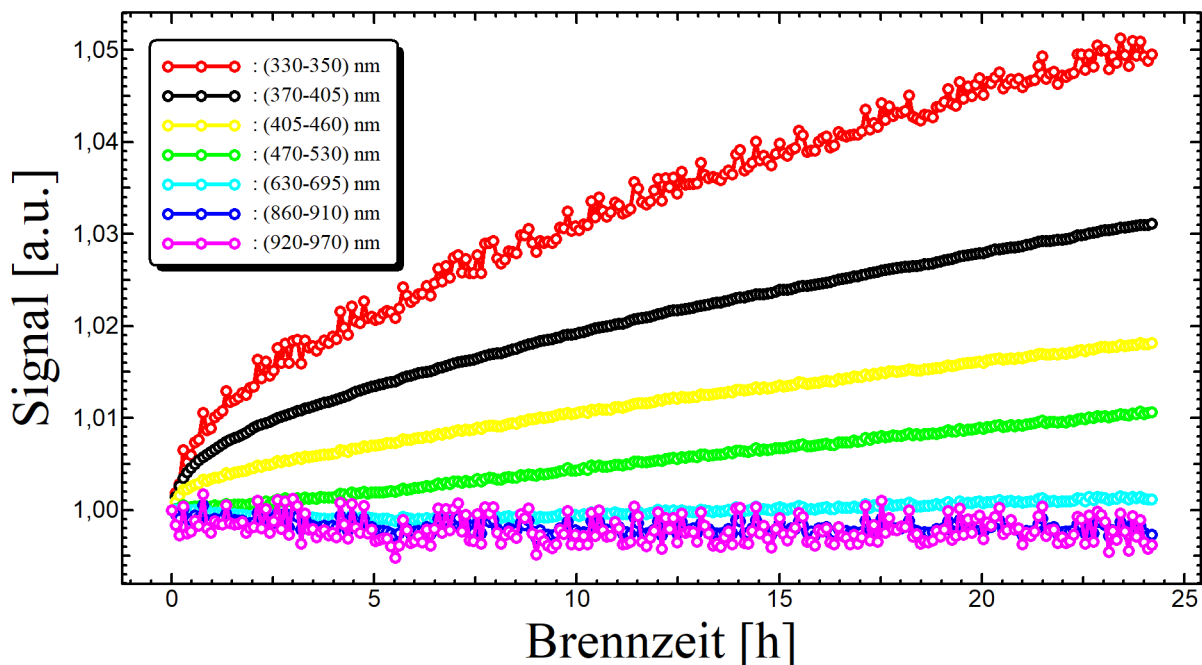


Abbildung 7.6.: Integrierte und normierte Signale des Spektralradiometers bei einer zeitlichen Driftmessung der LED-Quelle gekoppelt mit einer BaSO₄ beschichteten Ulbricht-Kugel.

Die von der Ulbricht-Kugel abgegebene Strahlung unterhalb von 600 nm zeigt einen wellenlängenabhängigen Drift, der bei den LEDs alleine nicht zu beobachten war und daher von einer wellenlängenabhängigen Veränderung des Durchsatzes der Ulbricht-Kugel verursacht werden muss. Anzumerken ist, dass ein solcher Drift bei der Verwendung von Ulbricht-Kugeln mit Glühlampen nicht beobachtet wurde. Daher werden im Weiteren Untersuchungen angestellt, dessen Ziel es ist, die Wechselwirkung zwischen der eingekoppelten Strahlung und der Ulbricht-Kugel Beschichtung sowie deren Abhängigkeiten von den Umgebungsbedingungen zu verstehen.

Ursachen des wellenlängenabhängigen Drifts

Nachdem bei der Verwendung der LED-Quellen mit einer Ulbricht-Kugel Drifts in den Signalen beobachtet werden konnten, wurden verschiedene Lösungsansätze zur Unterdrückung dieses Drifts verfolgt. Im Folgenden werden mögliche Erklärungen betrachtet und in ihrer Plausibilität bewertet.

Es kann nicht angegeben werden, wie dicht die Partikel in der Beschichtung gepackt sind oder wie stark das Bindemittel die Lücken zwischen den Partikeln ausfüllt, was vermutlich von der Art der Auftragung abhängt. Die optimale Packungsdichte beträgt $2,3 \text{ g/cm}^3$ [99]. Nach *Egan und Hilgeman* entspricht dies einer Volumenanteil von 51% für Bariumsulfatpulver [100]. Mit Hilfe des Packungsanteils lässt sich eine Abschätzung darüber machen, inwieweit das Bindemittel die Lücken zwischen den Partikeln ausfüllen kann und damit, wie groß der Einfluss auf das Reflexionsverhalten sein könnte. Laut dem Hersteller Labsphere beträgt das Mischungsverhältnis von Bindemittel zu Bariumsulfatpulver 1:100 [31]. Bezieht sich dieses auch auf das Volumen, beträgt der Volumenanteil des verwendeten Bindemittels PVOH 0,51 %, was nicht ausreicht um die Lücken in der Beschichtung zu füllen. Im Bezug auf die Masse ergäbe sich ein Verhältnis von 0,14 %, was ebenfalls nicht ausreichend ist. Daher kann davon ausgegangen werden, dass der Hohlraum mit Umgebungsluft gefüllt wird, die Feuchtigkeit enthält, die das Reflexionsverhalten des Bariumsulfats beeinflussen kann. Diese Anreicherung mit Luft bzw. der Feuchtigkeit der Luft scheint durch die Bestrahlung mit Wellenlängen im UV-Bereich nach und nach aufgelöst zu werden, wodurch es zu einer zeitlichen Änderung des Reflexionsvermögen kommt. Bei einer Bestrahlung über mehrere Stunden kam es zu einer Sättigung des gemessenen Signals, was dafür sprechen würde, dass der Feuchtigkeitsgehalt auf ein konstant niedriges Level reduziert wird und dann konstant bleibt, sofern die Bestrahlung fortgeführt wird.

Eine mögliche Reaktion auf die UV-Bestrahlung wäre eine Photoreaktion des Bindemittels und eine damit verbundene Aufspaltung von Molekülketten, wie von *Kaczmarek und Podgorski* beschrieben [101]. Es wird beschrieben, dass die Polydispersität, also die Häufigkeitsverteilung einzelner Molekülmassen in Proben polymerer Stoffe, sich während der Bestrahlung ändert, was auch die optischen Eigenschaften ändert. Es wurde gezeigt, dass

neben dem Aufbruch von Molekülketten auch Rekombinationsprozesse stattgefunden haben. Die optischen Eigenschaften von reinen und wärmebehandelten PVOH-Filmen wurden weitergehend von *Pandit* und *Kundu* mittels UV-VIS-Absorptions- und Photolumineszenz-Emissionsspektroskopie untersucht, strukturelle Veränderungen werden mittels Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie (FTIR) untersucht [102]. Die Absorptionsspitzen von reinem PVOH werden bei Anregungswellenlängen von 280 nm und 335 nm und die entsprechende Emission bei 424 nm beobachtet [102], was zumindest den Ansatz einer Erklärung für den Drift um die gemessenen Werte um 430 nm geben könnte.

Bei Polycarbonaten, einem sehr speziellem Thermoplastik, der auch als Binder bei $BaSO_4$ -Beschichtungen verwendetet wird, wurde beobachtet, dass wenn Sonnenlicht auf Polycarbonat fällt, Polycarbonatmoleküle Energie bestimmter Wellenlängen im UV-Bereich absorbieren. Dies gilt insbesondere für die Estergruppen und die aromatischen Ringe, die starke UV-Absorber sind. Die absorbierte Energie kann zum Aufbrechen kovalenter Bindungen führen, wodurch Photooxidation und Photo-Fries-Reaktionen (für Wellenlängen kleiner als 310 nm) begünstigt werden [103]. Photooxidation, Oxidationsreaktionen die durch Licht ausgelöst werden, wird durch Wellenlängen im Bereich von 290–350 nm hervorgerufen [104].

Da der Effekt offenbar durch die UV-LED hervorgerufen wird, wurde versucht, die Prozesse in der Kugelbeschichtung, die zu diesem Drift führen, durch eine Vorbehandlung mit einem UV-Strahler vor der eigentlichen Messung zu unterdrücken. Dazu wurde ein kommerziell erhältlicher Hg-Xe-Strahler verwendet.

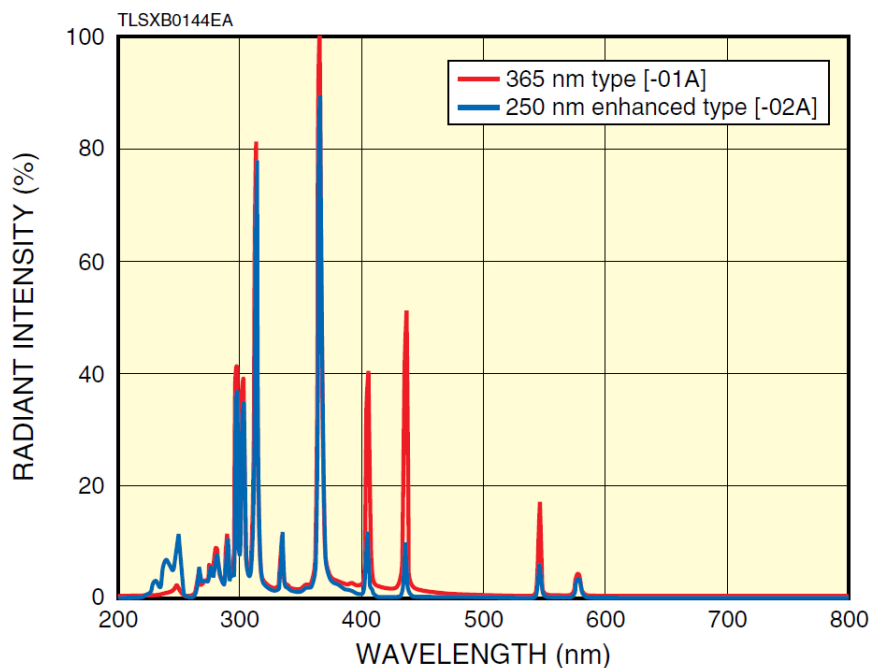


Abbildung 7.7.: Spektrum des verwendeten Hg-Xe-Strahlers (blau) [105].

Die Grundidee dahinter ist, dass die Ursachen des Drifts auf den UV-Anteil der LED-Quelle zurückzuführen ist. Die Kugel wurde über 62 Stunden bestrahlt und direkt eine Messung mit den LEDs gestartet. Leider zeigte sich keine Verbesserung des Drifts.

Ein weiterer Lösungsansatz bestand darin, die Kugel auszuheizen, was allerdings nur begrenzt möglich ist, da durch zu hohe Temperatur die Beschichtung, speziell der Binder in der Beschichtung, beschädigt werden kann und die Kugel dann ausgilbt. Aus diesem Grund wurde die Kugel bei 40 °C über einen Zeitraum von mehreren Stunden ausgebacken. Das Ausbacken zeigte erneut keine sichtbare Verbesserung.

Als weiterer Versuch wurde der Strom des Stranges der LED-Quelle verringert, mit dem die UV-LEDs versorgt werden. Der Drift war jedoch im gleichen Maß zu sehen wie vorher. Da der Drift bei der Verwendung von Ulbricht-Kugeln und Glühlampe nicht beobachtet wurde, wurde eine gleichzeitige Messung von Glühlampe und LED-Quelle durchgeführt. Zusätzlich zu den Spektren wurden Temperatur und Luftfeuchtigkeit in der Kugel gemessen. Auffällig war dabei, dass sich die relative Luftfeuchtigkeit bei gleichzeitiger Messung von Lampe und LED auf 12 % reduzieren ließ und der Drift tatsächlich geringer wurden. Daher wurde die relative Luftfeuchtigkeit als mögliche Ursache für den Drift der Signale in Betracht gezogen.

Um dieses genauer zu untersuchen wurde die Kugel verschlossen und mit Stickstoff gespült. Durch die nahezu abgeschlossene Kugel war es möglich, eine relative Luftfeuchtigkeit von 0,1 % zu erreichen, vgl. Abbildung 7.8.

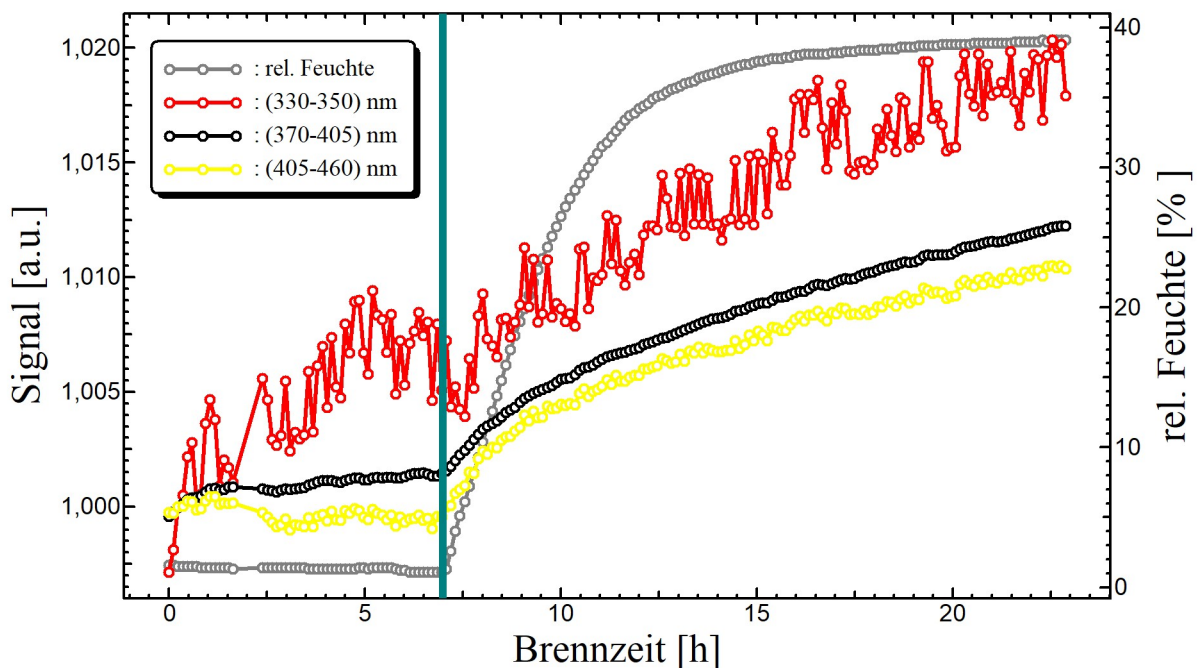


Abbildung 7.8.: Integrierte und normierte Signale während der Spülung mit Stickstoff (0-7 h) und nach dem Stoppen der Spülung (>7 h). Der Zeitpunkt des Stopps der Spülung ist durch eine grüne Linie gekennzeichnet.

Die Abbildung 7.8 zeigt das Verhalten der Signale während der Spülung mit Stickstoff und nach dem Stoppen der Spülung. Die relative Feuchte (rechte Achse) kann durch die Spülung auf 0,1 % reduziert werden. Die aufgenommenen Signale zeigen ein deutlich konstanteres Verhalten als ohne Spülung. Während der Messung wurde die Stickstoffspülung unterbrochen, was durch die grüne Linie im Diagramm gekennzeichnet ist. Erkennbar ist deutlich, dass die relative Feuchte sofort ansteigt. Mit dem Ansteigen sind erneut Drifts in den Signalen der LEDs zu erkennen. Dies ist ein Indiz für die Abhängigkeit der Stabilität von UV-LEDs in Verbindung mit BaSO₄ beschichteten Kugeln von der relativen Feuchte.

Die Verwendung der LED-Quelle mit einer BaSO₄-basierten Kugel gewährleistet keine ausreichende Stabilität des spektralen Durchsatzes, sofern die relative Feuchte innerhalb der Kugel nicht dauerhaft niedrig gehalten wird. Da eine dauerhafte Spülung mit Stickstoff nicht praktikabel ist, aber eine Strahldichtequelle mit Hilfe einer Kugel realisiert werden muss, muss über die Beschichtung mit einem anderen Material in Betracht gezogen werden. Für diese Anwendung bietet sich PTFE als Alternative zu Bariumsulfat an, da dieses ebenfalls die erforderliche Reflektivität im gesamten Spektralbereich der LED-Quelle aufweist.

7.3.2. Verwendung der LED-Quelle mit einer PTFE-basierten Kugel

Die PTFE-beschichtete Kugel wurde so ausgewählt, dass sie kompatibel mit den bisher vorhandenen LED-Quellen ist. Die Ulbricht-Kugel besitzt wie die vorherige BaSO₄-beschichtete Kugel vier Inputports mit dem Durchmesser von jeweils 2,5 cm, so dass die Quellen direkt an diese Kugel angeflanscht werden können.

Die Ulbricht-Kugel besteht aus einer aus PTFE gefrästen Schale mit einer Wandstärke von 10 mm, die in eine Metallschale eingebracht wurde. Das verwendete PTFE bietet eine Reflexion von 98,5% im sichtbaren Spektralbereich, im Bereich von 250 nm bis 2500 nm ist die minimale Reflexion bei 93%, vgl. Abbildung 4.6. Zudem ist diese Beschichtung aus einem temperaturstabiler Werkstoff (bis zu 280°C), er ist UV beständig und nicht wasserlöslich [41]. Ähnlich wie die vorherige Kugel hat die Kugel einen Durchmesser von 280 mm, der Auslassport hat einen Durchmesser von 130 mm. Die Kugel ist mit zylindrischen Baffels ausgestattet. Ein Baffel, manchmal als Blende oder Blendenplatte bezeichnet, dient dazu direktes Licht von der Lichtquelle zum Detektor zu blockieren. Zylindrische Baffels sollen eine bessere Durchmischung gewährleisten sollen als die Portbaffels, die in der BaSO₄-basierten Kugel verbaut wurden, vgl. Abbildung 7.9.

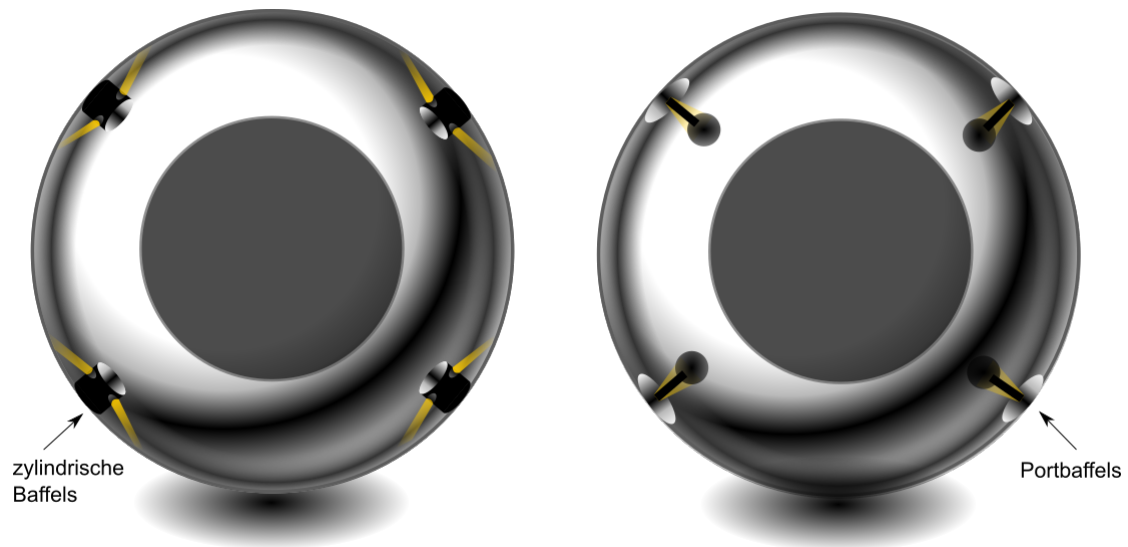


Abbildung 7.9.: Vergleich der verschiedenen Baffels der verwendeten Kugeln. Links: zylindrische Baffels, rechts: Portbaffels.

Die Baffels sind so angeordnet, dass durch den Auslassport nicht direkt die in den Inputports angebrachten Quellen gemessen werden können. PTFE-beschichtete Kugeln gelten als hydrophob, im Gegensatz zu der Verwendung von BaSO_4 -beschichteten Kugeln. Es ist bekannt, dass bei der Verwendung von PTFE-basierten Kugeln Fluoreszenz auftritt, siehe dazu beispielsweise *P.S. Shaw et al.* [43, 97], was durch spätere Messungen durch *Valenta* verifiziert wurde [98]. Eine hilfreiche Methode, diese Fluoreszenz zu unterdrücken ist das Ausheizen der Kugel [106] oder die Vorbehandlung mit einem UV-Strahler [107]. Wie bei *Shaw et al.* beschrieben wurde die PTFE-basierte Kugel in einer Klimakammer bei 90°C für 40 h bei geringer Luftfeuchte ausgeheizt.

Stabilität der LEDs mit einer PTFE-basierten Ulbricht-Kugel

Wie zuvor wurden die LED-Quellen an die Kugel geflanscht und die Stabilität überprüft. Das Verhalten wurde mit den gleichen Spektralradiometern wie in Abschnitt 7.3.1 überwacht.

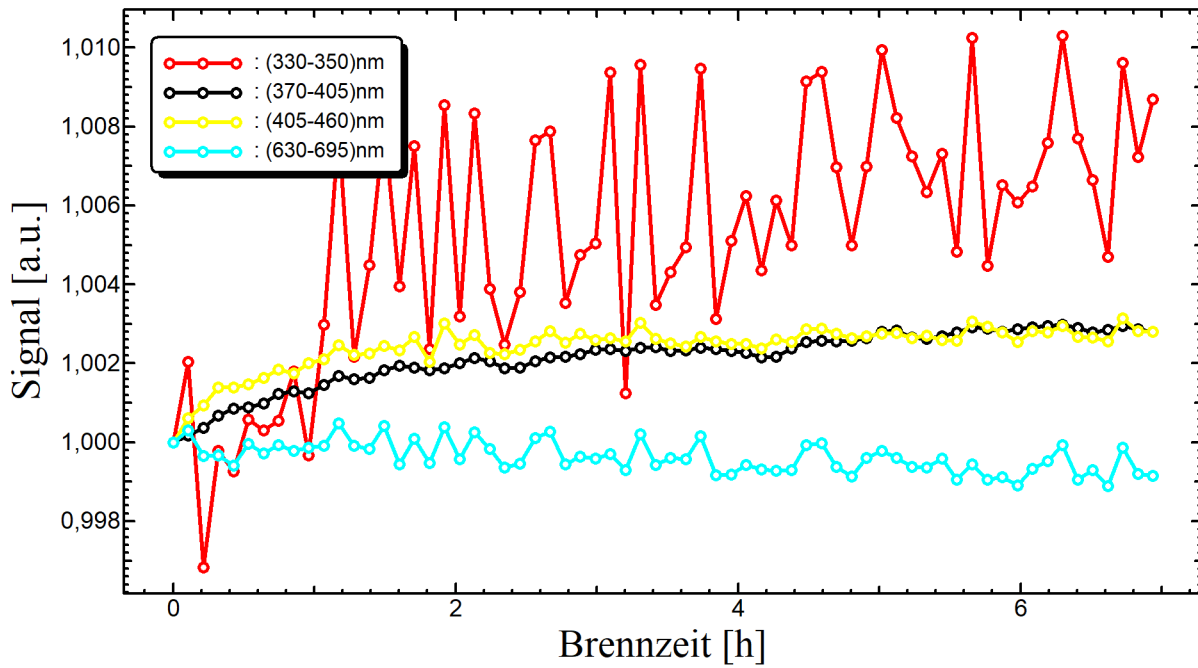


Abbildung 7.10.: Integrierte und normierte Signale des Spektralradiometers bei einer zeitlichen Driftmessung der LED-Quelle gekoppelt mit einer PTFE-basierten Ulbricht-Kugel.

In Abbildung 7.10 sind die integrierten und normierte Signale des Spektralradiometers bei Verwendung mit einer PTFE-Kugel zu sehen. Vergleicht man diese mit Abbildung 7.6 fällt auf, dass der Drift in der PTFE-Kugel kleiner ist als in der BaSO_4 -Kugel. Während es bei der mit BaSO_4 -beschichteten Kugel im Integral um 340 nm innerhalb der ersten sechs Stunden zu einem Drift von 3% kommt, sind es bei den gleichen Integralwerten in der PTFE-basierten Kugel 0,8%. Ähnliches ist bei den integrierten Signalen um 380 nm zu beobachten. Während sich in den ersten sechs Stunden dieser Wert bei der BaSO_4 -Kugel um 1,5% ändert, sind es bei der PTFE-basierten Kugel 0,2%. Die Verwendung einer PTFE-basierten Ulbricht-Kugel scheint demnach deutliche Vorteile bei der Stabilität in den Wellenlängen unterhalb von 500 nm zu bringen. Die Wellenlängen oberhalb der 500 nm verhalten sich in beiden Ulbricht-Kugeln zufriedenstellend.

7.4. Kompatibilitäts- und Stabilitätstest des LED-basierten Strahldichtenormals mit einem Cimel-Radiometer

Für die entwickelte Quelle wurde eine ausreichende Stabilität mit der PTFE-basierten Kugel erzielt. Ein weiterer wichtiger Test für die Tauglichkeit ist es, ob die Quelle genügend Signal für die Messungen mit dem Cimel-Radiometer gibt. Bei der späteren Verwendung der LED-Quelle mit einer Kugel ist es ebenso von Bedeutung, ob sich die LED-basierte Strahldichtequelle verändert, wenn sie eine Zeit lang nicht verwendet wird. Darum wurden unterschiedliche Pausenzeiten zwischen den Messungen gesetzt, um einen Einsatz in einem Kalibrierlabor zu simulieren. Zu diesem Zweck wurde ein Cimel-Radiometer vor der Kugel positioniert. Die gemessenen Werte der einzelnen Kanäle wurden auf den ersten Wert der ersten Messung normiert und aufgetragen, siehe Abbildung 7.11.

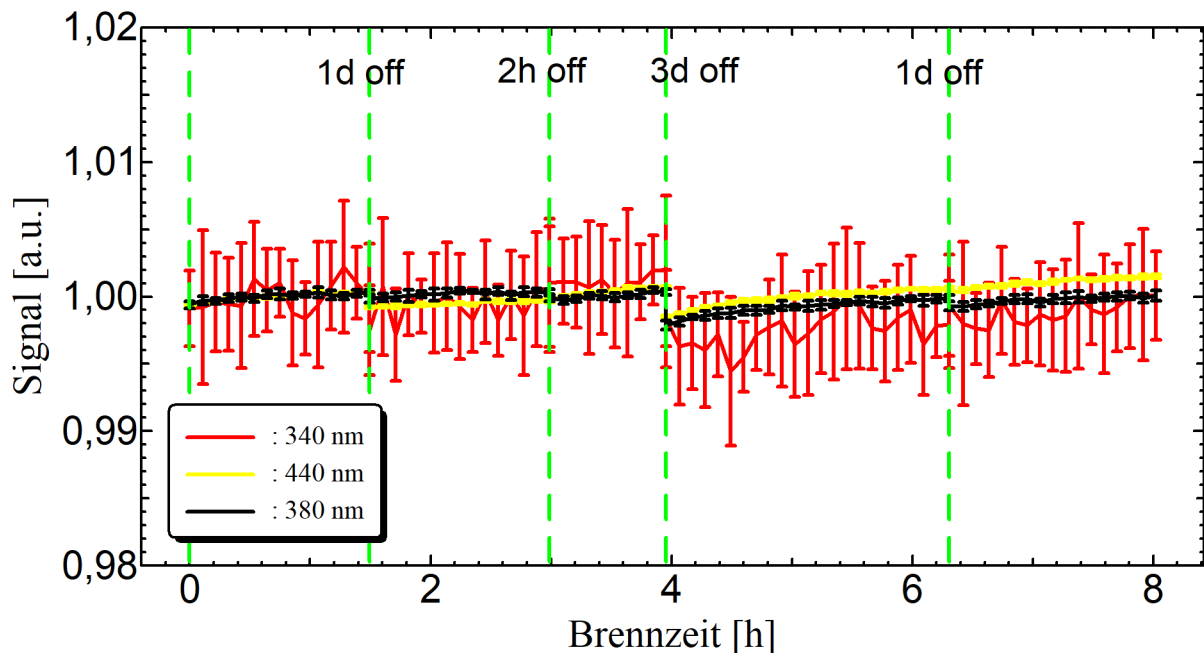


Abbildung 7.11.: Normierte Signale der LED-Quelle an der PTFE-basierten Kugel, gemessen mit einem Cimel-Radiometer nach unterschiedlichen Pausenzeiten. Die grünen Linien indizieren dabei Pausen.

Zur besseren Sichtbarkeit wurden in Abbildung 7.11 nur die drei Kanäle um 340 nm, 380 nm und 440 nm aufgetragen. Die drei Kanäle waren bei den letzten Tests von den Drifts betroffen, alle anderen Kanäle waren stabil. Die gestrichelten grünen Linien indizieren die Pausenzeiten zwischen den Messungen. Es zeigt sich, dass nach kurzen Pausenzeiten von einigen Stunden keine Relaxion der Kugel zu erkennen ist. Nach einer Pause von drei Tagen sieht man einen Abfall im Signal von 0,4%. Gleichzeitig lässt sich durch diese Messung die Aussage treffen, dass die LED-Quelle hinsichtlich des Signals ausreichend ist, um sinnvolle Messungen mit einem Cimel-Radiometer durchzuführen.

Das „Signal zu Rauschen Verhältnis“ (engl. *signal to noise ratio*, kurz: *S/N ratio*) ist ein Maß für die Größe eines Messwertes im Verhältnis zum Dunkelwert. Wenn das S/N-Verhältnis groß ist, ist die Größe des Signals im Verhältnis zum "Rauschen", das mit der Standardabweichung gemessen wird, groß. Ist das S/N-Verhältnis groß, wird das Signal als signifikant angesehen. Die einzelnen Messwerte wurden aus zehn aufgenommenen Werten gemittelt, aus denen sich die Standardabweichungen ergeben. Das Verhältnis der Standardabweichungen zu den Mittelwerten bewegt sich für den Großteil der Kanäle im Bereich von 10^{-4} , mit Ausnahme des Si-Kanals um 340 nm und des InGaAS-Kanals um 1640 nm. Für diese beiden Kanäle liegt das Verhältnis in der Größenordnung 10^{-3} . Dies ist dadurch zu begründen, dass die verwendeten LEDs für diese Kanäle geringen Output haben, vgl. Abbildung 7.5 und Tabelle 7.2. Für eine Messung mit Halogenlampen sind ähnliche Verhältnisse anzunehmen [108].

7.5. Homogenität der der LED-basierten Strahldichtequelle

Für die Realisierung dieses Messvorhabens wurde ein motorisierter xyz-Achsentisch verwendet, auf dem mehrere Empfänger angebracht sind. Für die Vermessung des spektralen Bereichs der LED-Quelle von 340 nm bis 1640 nm werden mehrere Spektralradiometer benötigt. Für diese Messungen wurden zwei Spektralradiometer verwendet, eines für den Ultraviolett- bis sichtbaren Bereich, eines für den Infrarotbereich. Weiterhin verfügt dieser Messplatz über einen Justierlaser, mit dessen Hilfe die Mitte des Auslassports der Kugel als Nullpunkt des abzuscannenden Bereichs eingemessen werden kann. Abgescannt wird in Spots mit einem Durchmesser von 7 mm über ein quadratisches Feld von $-70\text{ mm} \times +70\text{ mm}$ Größe um den Nullpunkt herum. Zu Beginn und zum Ende einer jeden Messung wird dieser Nullpunkt erneut vermessen, um einen Drift des Signals während der Homogenitätsmessungen berücksichtigen zu können. Bei diesen Messungen wurde zusätzlich die Relevanz der Quellenanordnung untersucht, sowie die Abfolge des Scans, also ob es Unterschiede ergibt wo Start und Endpunkt der Messungen sind.

Die LED-basierte Strahldichtequelle wurde um zwei weitere Quellen erweitert, so dass vier Inputports verwendet werden. Zwei Quellen sind mit Platine 1 ausgestattet, zwei Quellen mit Platine 2.

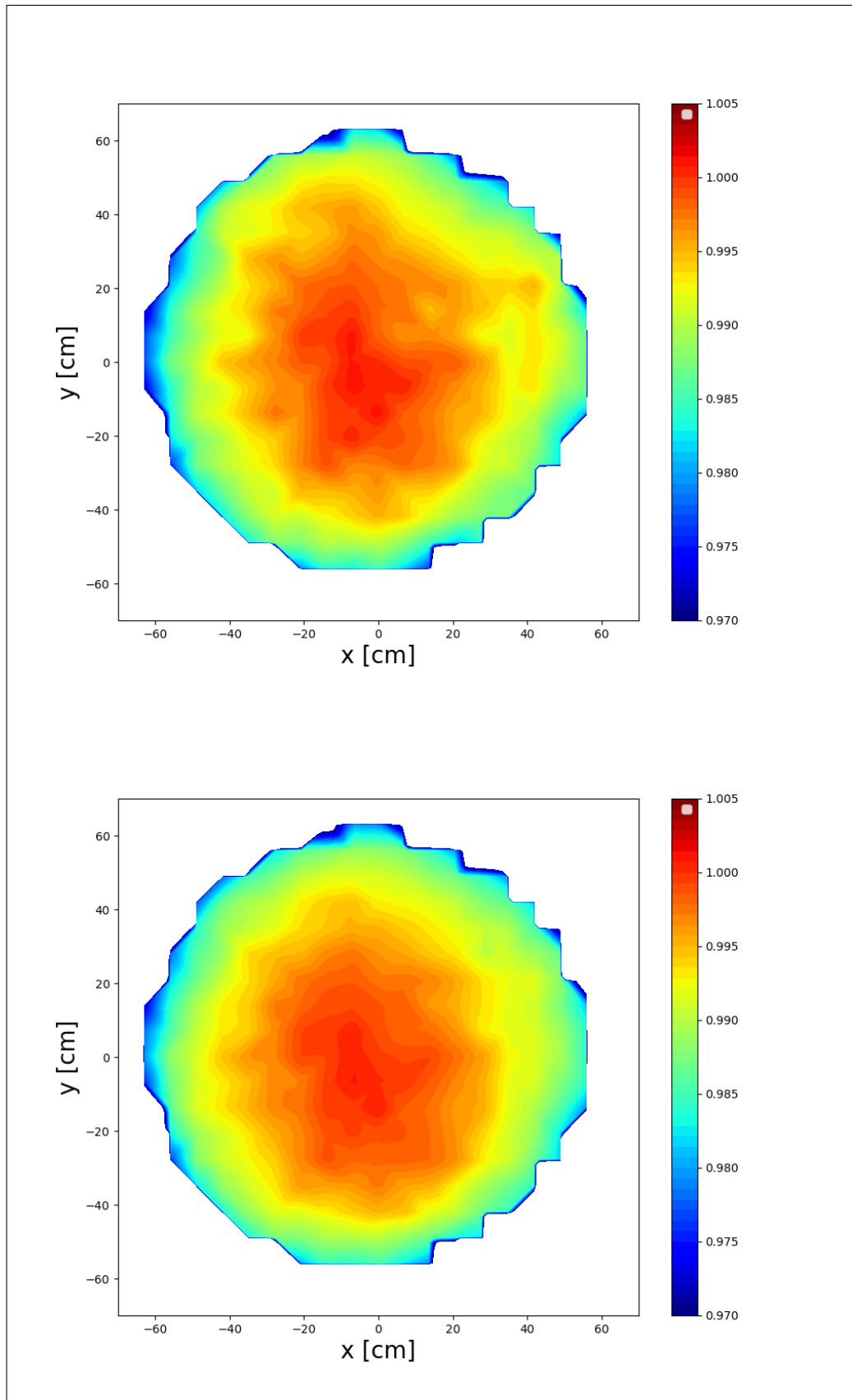


Abbildung 7.12.: Homogenität für den Kanal um 500 nm (oben) und für den Kanal um 675 nm (unten).

Abbildung 7.12 zeigt am Beispiel der Kanäle um 500 nm und 675 nm die Homogenität der PTFE-basierten Ulbricht-Kugeln und vier Quellen. Während dieser Messungen fiel jedoch auf, dass die Homogenität davon abhängt, wie die Quellen an der Kugel angebracht werden. Durch die Form der Baffels kommt es zu einer Art „Strahl“ der direkt auf die Innenseite der Kugel fällt und reflektiert wird, vgl. Abbildung 7.13.

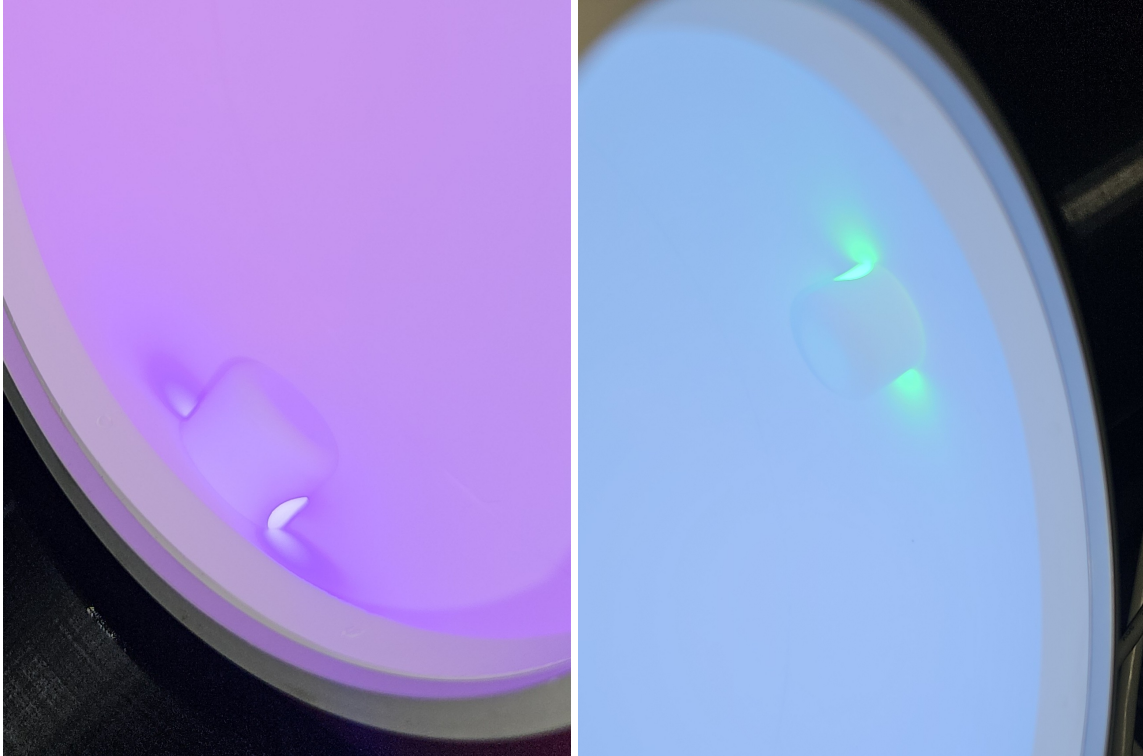


Abbildung 7.13.: Sicht durch den Auslassport der PTFE-basierten Kugel auf die Zylinderbaffels. Zu sehen ist die Strahlungsverteilung aus den Baffels in die Kugel und den Unterschieden der Strahlung je nach Drehung der Quellen.

Die Kugel verfügt über ein Milchglas am Auslassport, was abgenommen werden kann. Schaut man in die Kugel sieht man, dass durch die Konstruktion der Baffel je nach Drehung verschiedene LEDs direkt auf die Innenseite der Kugel strahlen. Es gilt also, die Quellen so anzubringen, dass eine LED nicht direkt am Ausgang des Baffels ist und nicht direkt auf die Kugelinnenfläche strahlen kann. Vermeidet man dies, findet eine deutlich bessere Durchmischung innerhalb der Kugel statt und resultiert in einer deutlich besseren Homogenität des Strahlungsfeldes. Einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss hat dabei auch die milchige Abdeckung des Auslassports. Für die angestrebte Kalibrierung wie auch schon für die Bestimmung der Homogenität wurden die Quellen auf die Weise angeordnet, dass die bestmögliche Durchmischung stattfindet.

Aus der Messung der Homogenität des Strahlungsfeldes wird ein Korrekturfaktor bestimmt, der bei der Strahldichteempfindlichkeitsbestimmung des Cimel-Radiometers mit der LED-

Strahldichtequelle berücksichtigt werden muss, vgl. Abschnitt 6.2. Unter der Annahme, dass die Empfindlichkeit des Detektors homogen ist vereinfacht sich die Berechnung zu:

$$k_{\text{Homogenität}}(\lambda) = \iint_{A(DUT)} E_{\text{rel}}(x,y,\lambda) dx dy / \iint_{A(REF)} E_{\text{rel}}(x,y,\lambda) dx dy \quad (7.2)$$

Mit Hilfe der Gleichung können Korrekturfaktoren für die Homogenität pro Kanal angegeben werden.

Auswirkungen der Homogenität auf die Kalibrierungen bei Messungen abweichend der optischen Achse

In einem Kalibrierlabor des AERONET Europe wird mit Hilfe der auch für diese Arbeit verwendeten BaSO₄-basierten Ubricht-Kugel *RedIS* und den darin verbauten Lampen gemessen. Im Gegensatz zu der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen wird nicht jeder Detektor einzeln einjustiert, sondern es wird auf einen Punkt mittig der beiden Eingangsaperturen justiert. In dieser Justage werden dann Messungen für beide Detektoren durchgeführt, also an verschiedenen Stellen des Strahlungsfeldes der Ulbricht-Kugel. Dafür wird ein Halter für drei Radiometer verwendet, siehe Abbildung 7.14. Es soll abgeschätzt werden, inwiefern diese Art der Messung bei Verwendung der LED-basierten Strahldichtequelle von der möglicherweise unterschiedlichen Homogenität des Strahlungsfeldes beeinflusst wird.

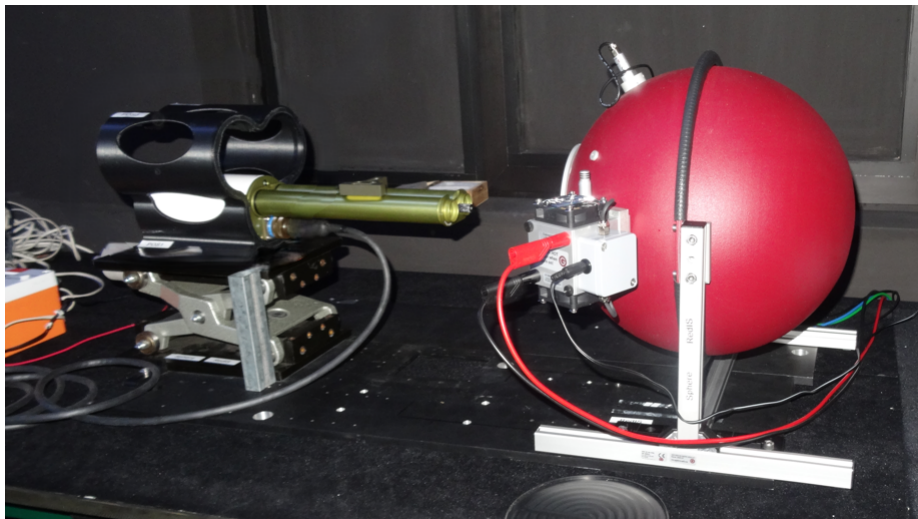


Abbildung 7.14.: Messaufbau für die Kalibrierung von Cimel-Radiometern im Kalibrierlabor. Der Aufbau sieht eine gleichzeitige Messung von drei Radiometern vor.

Ein Problem bei dieser Art der Messung wird sein, dass nicht von einer gleichbleibenden Homogenität bei allen Messungen ausgegangen werden kann, sondern eher, dass diese bei den Messungen der einzelnen Geräte voneinander abweicht. Da die LED-Quelle in

Verbindung mit einer Ulbricht-Kugel für die Kalibrierungen in solch einem Kalibrierlabor entwickelt und charakterisiert wurde, soll abgeschätzt werden, in welchem Maß die Homogenität bei einer Messung unter Verwendung eines solchen Halters abweichen kann.

Es sei betont, dass für den metrologisch sinnvollen Einsatz der Quelle, nur eine gleichbleibende Justage in Frage kommt. Wenn der Einfluss der unterschiedlichen Einbaupositionen bekannt ist, kann zwar korrigiert werden, jedoch wird durch die höheren Korrekturfaktoren, z. B. bezüglich der Homogenität, eine deutlich größere Unsicherheit entstehen.

Die Auswirkungen der Verwendung des Halters soll anhand der Homogenität verdeutlicht werden. Die Abweichungen von der Mitte des Strahlungsfeldes können mit der im vorherigen Abschnitt 7.5 bestimmten relativen Homogenität abgeschätzt werden. Mit den bekannten Maßen des Cimel-Radiometers kann näherungsweise bestimmt werden, an welchen Stellen des Feldes gemessen werden würde. Die Tabelle 7.4 zeigt die Korrekturfaktoren für Messungen am Mittelpunkt des Strahlungsfeldes, für beide Kanäle gleichzeitig und eine mögliche Konstellation im Halter für drei Geräte.

Channel	Mittelpunkt (Si/InGaAs nacheinander)	Mittelpunkt (Si/ InGaAs zeitgleich)	drei Geräte zeitgleich
Si 340	0,996 (0,02)	0,996 (0,02)	0,984 (0,04)
Si 380	0,997 (0,01)	0,997 (0,01)	0,982 (0,02)
Si 440	0,996 (0,02)	0,996 (0,02)	0,984 (0,04)
Si 500	0,998 (0,02)	0,997 (0,01)	0,991 (0,02)
Si 675	0,998 (0,01)	0,998 (0,01)	0,991 (0,02)
Si 870	0,998 (0,01)	0,998 (0,02)	0,994 (0,06)
Si 937	0,996 (0,02)	0,996 (0,02)	0,987 (0,04)
Si 1020	0,997 (0,01)	0,997 (0,01)	0,990 (0,01)
InGaAs 1020	0,997 (0,01)	0,997 (0,01)	0,990 (0,01)
InGaAs 1640	0,997 (0,02)	0,996 (0,02)	0,988 (0,04)

Tabelle 7.4.: Korrekturfaktoren für unterschiedliche Messpositionen vor der LED-basierten Quelle pro Kanal. In Klammern ist die relative Messunsicherheit angegeben.

An den Korrekturfaktoren für die Homogenitäten lässt sich erkennen, dass im Vergleich der Werte und der Einfluss der Unterschiede bei der Bestimmung der Strahldichteempfindlichkeit gering ist im Vergleich mit anderen Einflüssen, wie zum Beispiel das Rauschen des Radiometers. Es wird sich im folgenden Kapitel bei der Absolutkalibrierung der LED-Quelle an der PTFE-basierten Kugel gezeigt, dass die Homogenität nur einen kleinen Beitrag zur Unsicherheit liefert.

8. Absolutkalibrierung der LED-basierten Strahldichtequelle

Die LED-basierte Quelle soll als Strahldichtequelle verwendet werden. Sie wurde entwickelt, um Veränderungen in der spektralen Beleuchtungsstärkeempfindlichkeit der in AERONET verwendeten Cimel-Radiometern feststellen zu können. Diese Quelle wird absolut kalibriert, um eine Eignung als Strahldichteempfindlichkeitskalibrierquelle und somit als Alternative zu einer Ulbricht-Kugel mit Lampen zu verifizieren.

Die Kalibrierung wird mit einem auf Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit kalibrierten Spektralradiometer durchgeführt. Die Kalibrierung der Strahldichte im Bestrahlungsstärkemode wird dadurch erreicht, dass die gemessene Fläche durch eine kalibrierte Blende begrenzt wird. Der Umweg von der Strahldichte, die von der LED-Quelle ausgeht, zur gemessenen Bestrahlungsstärke mit dem kalibrierten Spektralradiometer führt über die Strahlstärke.

Strahlstärke

Da das für die Absolutkalibrierung verwendete Spektralradiometer bzgl. Bestrahlungsstärke kalibriert ist, muss zur Bestimmung der Strahldichte und der Strahldichteempfindlichkeit von der gemessenen Bestrahlungsstärke über die Strahlstärke I auf die Strahldichte gerechnet werden.

Die Strahlstärke ist der Anteil der Strahlungsleistung $d\Phi$, der von einer Strahlungsquelle, in diesem Fall die Ulbricht-Kugel mit den LED-Quellen, in einer gegebenen Raumrichtung in das Raumwinkelement $d\Omega$ emittiert wird, siehe Tabelle 4.1:

$$d\Phi = Id\Omega \quad (8.1)$$

und damit

$$\Phi = \int Id\Omega \quad (8.2)$$

Die Einheit der Strahlstärke ist W/sr. Gemessen wird eine Bestrahlungsstärke E in einem festen Abstand r . Um von der Bestrahlungsstärke auf die Strahlstärke zu schließen, wird ein definierter Raumwinkel benötigt, über den die Strahlung verteilt wird. Es gilt:

$$E = \frac{I}{r^2} \Leftrightarrow I = E \cdot r^2 \quad (8.3)$$

Die Strahldichte ergibt sich aus der Strahlungsleistung pro Fläche und Raumwinkel. Dieses kann durch eine Blende mit der Fläche A realisiert werden.

$$L = \frac{I}{A \cos(\Theta)} \quad (8.4)$$

wobei Θ der Winkel zwischen der Oberflächennormalen und der Abstrahlrichtung ist. Die Realisierung der Messvorhabens und der geforderten Geometrie besteht demnach aus der LED-basierten Strahldichtequelle, einer kalibrierten Blende im festen Abstand zur LED-basierten Strahldichtequelle und einem kalibrierten Spektralradiometer, das im festen Abstand von der Blende positioniert wird.

8.1. Messaufbau für die Absolutkalibrierung

Der Messaufbau wurde an einer Photometerbank realisiert. Der Messaufbau ist in Abbildung 8.1 gezeigt.

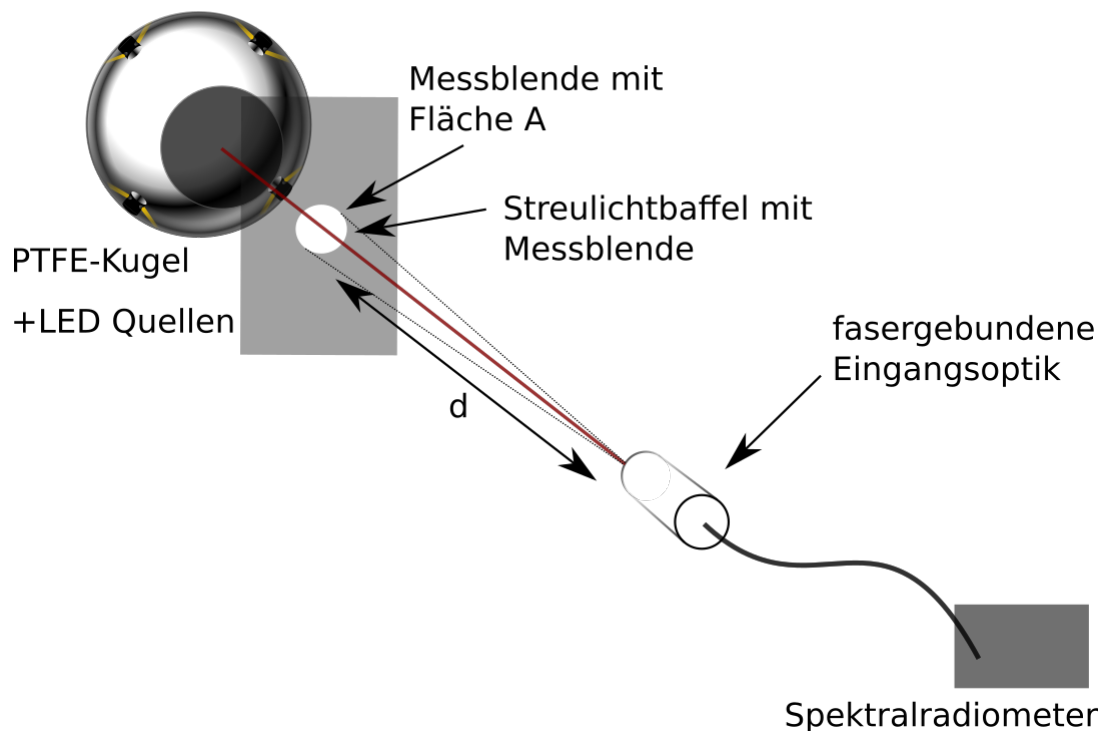


Abbildung 8.1.: Aufbau für die Absolutkalibrierung der LED-Quelle. Gemessen wurde mit Hilfe einer kalibrierten Messblende, die in einen Streulichtbaffel eingebracht ist. Der Messaufbau wurde auf einer Photometerbank realisiert.

Da das Cimel-Radiometer bereits für die Messung von Strahldichte konzipiert ist, ist für diese Messung keine Blende notwendig.

8.2. Messung der Strahldichte im Bestrahlungsstärkemode

Für diese Messungen wurde hinsichtlich der Bestrahlungsstärke kalibriertes Spektralradiometer verwendet. Der Messabstand zwischen der Ulbricht-Kugel und der Vorderseite der fasergebundenen Eingangsoptik muss so gewählt werden, dass ein definierter Raumwinkel gemessen wird. Der Raumwinkel, den das Spektralradiometer durch die Blende sieht ist gegeben durch:

$$\Omega = \frac{A_{\text{Blende}}}{d^2} \quad (8.5)$$

mit der Blendenfläche A_{Blende} und dem Abstand zwischen Blende und Spektralradiometer d . Für einen kleinen Abstand d wird der Raumwinkel groß, wodurch keine definierte Richtung mehr vorgegeben ist und eine Winkelintegration der Strahldichte vorliegt, also eine Bestrahlungsstärke gemessen werden würde [109]:

$$E = \int L(\Theta, \Phi) \cos(\Theta) d\Theta \quad (8.6)$$

Für einen ausreichend großen Abstand d hingegen würde Θ klein werden und die Strahldichte L ist näherungsweise konstant, damit wäre $E \approx L \cdot d\Omega$. Um den Messabstand zu bestimmen, in dem Strahldichte gemessen werden kann, wurden Testmessungen mit variierendem Abstand durchgeführt.

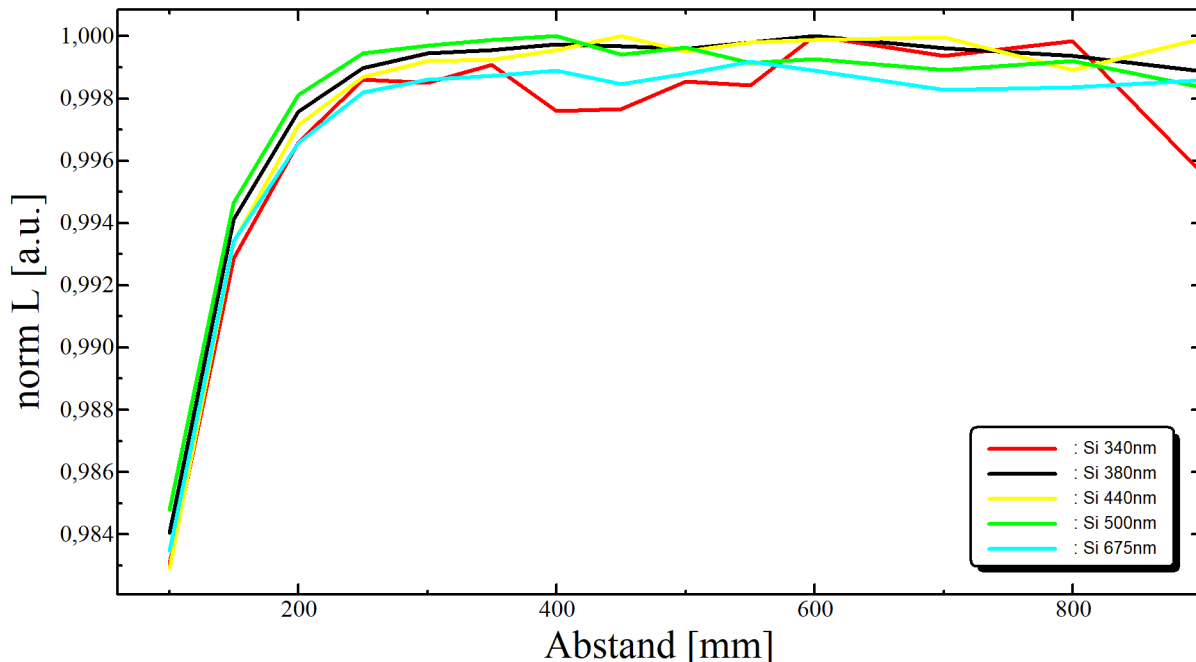


Abbildung 8.2.: Normierte Strahldichte gegen den Messabstand für die Kanäle 340 nm, 380 nm, 440 nm, 500 nm und 675 nm.

Abbildung 8.2 zeigt die Abhängigkeit des Signals vom Abstand für die Kanäle 340 nm, 380 nm, 440 nm, 500 nm und 675 nm. Zu erkennen ist ein sich nur noch geringfügig änderndes Signal ab einem Messabstand von 600 mm. Ab diesem Abstand kann eine Strahldichtemessung erfolgen, das Signal wird als vom Abstand unabhängig angesehen.

Im Abstand von 700 mm wurden mehrere Spektren aufgenommen, die dunkelkorrigiert und gemittelt wurden. Die dunkelkorrigierten Spektren wurden mit Hilfe von

$$L(\lambda) = \frac{4d^2 E(\lambda)}{A} \quad (8.7)$$

in eine spektrale Strahldichte umgerechnet, wobei d der Abstand zwischen Messblende und Spektralradiometereingangsoptik ist, A die Öffnungsfläche der Messblende und E die mit Hilfe des kalibrierten Spektralradiometers gemessene Bestrahlungsstärke. Es ergibt sich für die berechnete spektrale Strahldichte:

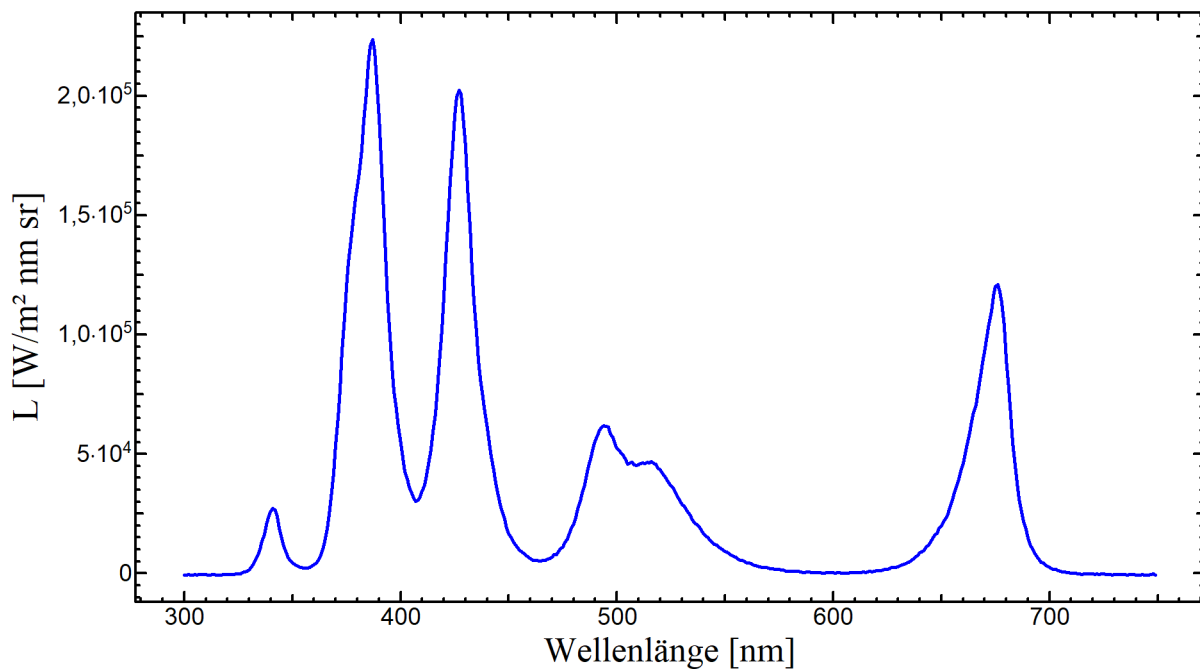


Abbildung 8.3.: Spektrale Strahldichte der LED-Quelle mit PTFE-basierter Kugel im Bereich von 300 nm bis 750 nm.

Abbildung 8.3 zeigt die bestimmte spektrale Strahldichte der LED-Quelle mit einer PTFE-basierten Kugel. Dies soll nun dazu verwendet werden, die Strahldichte eines Cimel-Radiometers zu bestimmen und mit den Kalibrierungen in Kapitel 6 zu vergleichen.

9. Bestimmung der Strahldichteempfindlichkeit mit LED-basierter Strahldichtequelle

Die berechnete Strahldichte wird mit den in Abschnitt 5.2 bestimmten relativen Empfindlichkeiten gewichtet, so dass diese für jeden einzelnen Kanal des AERONET-Radiometers angegeben werden kann. Diese kann dann mit den bisherigen Kalibriermethoden für die Radiometer verglichen werden. Der gleiche Aufbau wurde für die Messungen mit dem AERONET-Radiometer verwendet, vgl. Kapitel 6. Erneut wurden mehrere Messungen durchgeführt, dunkelkorrigiert und gemittelt. Die gemessenen Signale für jeden Kanal des Radiometers in counts wurden nun durch die entsprechenden Strahldichten geteilt, die mit in Kapitel 8.2 bestimmt wurden. Dadurch ergibt sich eine Strahldichteempfindlichkeit für die einzelnen Kanäle des Radiometers. Die Strahldichteempfindlichkeiten werden bestimmt durch:

$$s_L = \int s(\lambda) \cdot L(\lambda) d\lambda \cdot f_{hom} \quad (9.1)$$

mit $s(\lambda)$ sind dabei die relativen Empfindlichkeiten der einzelnen Kanäle, L die in Kapitel 8 bestimmte spektrale Strahldichte. f_{hom} ist der Korrekturfaktor für die Homogenität des Strahlungsfeldes der Quelle. Aus dieser Messung ergeben sich folgende Strahldichteempfindlichkeiten mit Unsicherheiten, die durch die Monte-Carlo-Simulationsmethode bestimmt wurden:

Channel	$s_L \left[\text{cts} / \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{sr}} \right]$	$u_{s_L} \left[\text{cts} / \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{sr}} \right]$	$u_{s_L} [\%]$
Si 340	18,71	0,46	2,4
Si 380	45,06	0,53	1,1
Si 440	158,28	1,8	1,2
Si 500	188,35	2,1	0,96
Si 675	280,99	2,9	0,98

Tabelle 9.1.: Strahldichteempfindlichkeiten und ihre Standardmessunsicherheiten für die Cimel Kanäle bestimmt mit der LED-Quelle.

Wie in Tabelle 9.1 zu sehen wurden nur die Strahldichteempfindlichkeiten für die Kanäle 340 nm bis 675 nm bestimmt. Die Gründe dafür liegen in der Limitierung des Messbereichs, der durch die geringen Leistungen der LEDs eingeschränkt wird, die Empfindlichkeit des Spektralradiometers ist für diese Art von Messungen zu gering.

Dieser Ansatz soll eine Abschätzung darüber geben, wie geeignet diese Quelle für die Kalibrierung von Cimel-Radiometern ist und dass das Prinzip einer Absolutkalibrierung

möglich ist. Das Ishikawa-Diagramm 9.1 zeigt die Zusammensetzung der Unsicherheiten für die einzelnen Kanäle bei der Strahldichteempfindlichkeitsmessung der PTFE-Kugel mit den LED-Quellen.

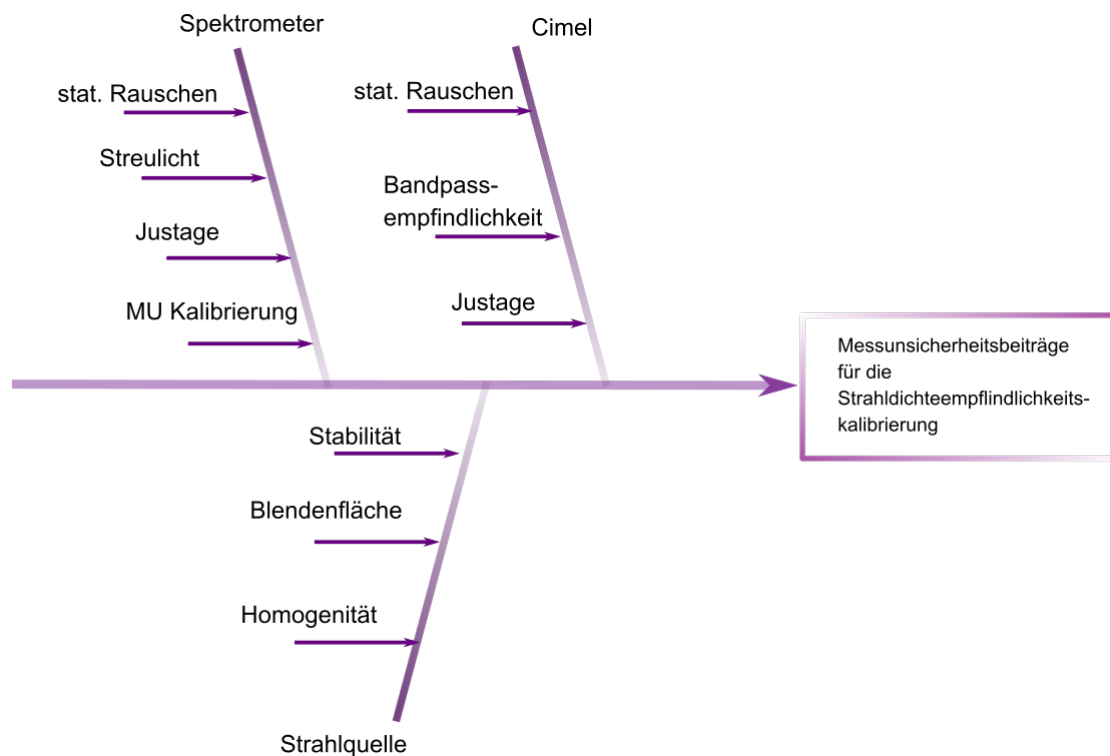


Abbildung 9.1.: Ishikawa-Diagramm zur Darstellung der Einflussgrößen für die Messunsicherheitsbestimmung für die Strahldichteempfindlichkeitsmessung der PTFE-Kugel mit LED-Quellen.

Der Einfluss auf die Messunsicherheiten teilt sich auf die Komponenten der Strahldichtekalibrierung über die Strahlstärke mit einem Spektralradiometer und die Strahldichteempfindlichkeitsmessung mit dem Cimel-Radiometer auf. Die Unsicherheit der Messblende hat nur Einfluss bei den Messungen mit dem Spektralradiometer, jedoch im Vergleich mit den anderen Beiträgen ist sie so gering, dass sie kaum merkbar ins Gewicht fällt. Die relative Unsicherheit der Blende ist im Bereich 10^{-5} , die Gesamtunsicherheiten in der Strahldichteempfindlichkeitskalibrierung liegen teilweise bis zu im einstelligen Prozentbereich. Eine Herausforderung bei dieser Messung ist es, dass das Signal der Strahlquelle durch die Blende so stark eingeschränkt wird, dass Dunkelsignal und Rauschen die deutlichsten Beiträge liefern. Bei den Messungen muss in der Messunsicherheit eine Korrektur für Justageabweichungen einberechnet werden, die sich deutlich in der Messunsicherheit auswirkt. Wie in den Messungen zuvor ist das Cimel gegenüber kleinsten Veränderungen aufgrund des sehr kleinen Sichtwinkels sensibel. Die Homogenität des Strahlungsfeldes wurde mit einem Korrekturfaktor versehen, der auf Grundlage der Messungen in 7.5 ermittelt

wurde. Berücksichtigt wurde dabei der Bereich des Strahlungsfeldes, der bei der Justage auf die optische Achse detektiert wird. Eine Übersicht der Messunsicherheitsbeiträge ist am Beispiel des 675 nm-Kanals in Tabelle 9.2 gegeben.

	Unsicherheitsquelle	Beitrag zur Unsicherheit
Spektralradiometer	stat. Rauschen	$1 \cdot 10^{-4}$
	MU Kalibrierung	$9 \cdot 10^{-4}$
	Streulicht	$3 \cdot 10^{-3}$
	Justage	$1,1 \cdot 10^{-4}$
AERONET-Radiometer	stat. Rauschen	$3,1 \cdot 10^{-6}$
	Bandpassempfindlichkeit	$1,3 \cdot 10^{-2}$
	Justage	$0,5 \cdot 10^{-4}$
Strahlungsquelle	Stabilität	$1,0 \cdot 10^{-4}$
	Blendenfläche	$1,8 \cdot 10^{-8}$
	Homogenität	$2 \cdot 10^{-3}$

Tabelle 9.2.: Messunsicherheitsbeiträge für die Messungen der Strahldichteempfindlichkeit am Beispiel des 675 nm-Kanals.

Die jeweiligen Beiträge zur Bestrahlungsstärke, Strahldichte und zur Statistik des Cimals und lassen sich wieder in einzelne Komponenten aufspalten. Für die Bestrahlungsstärkemessungen mit dem Spektralradiometer sind durch die Kalibrierung der Lampe Messunsicherheiten vorgegeben, mit denen weitergerechnet werden kann. Diese Messunsicherheiten unterscheiden sich je nach gemessenem Kanal.

Für die Messungen mit einer Blende und der daraus berechneten Strahldichte gehen Komponenten wie die Stabilität der Quelle, die Fläche und damit verbundene Messunsicherheit der Blendenfläche, aber auch die Homogenität des Strahlungsfeldes der Kugel ein. Während die Blendenfläche mit entsprechender Unsicherheit bekannt ist, muss für die Homogenität ein Unsicherheitsfaktor bestimmt werden. Dieser leitet sich durch die Homogenitätsmessungen in Abschnitt 7.5 ab. Die Korrekturfaktoren wurden nach Gleichung 6.7 berechnet. Durch die relativen Messungen und der Kenntnis der gemessenen Fläche des Cimals, die durch die Justage sich immer an der gleichen Stelle befindet, ist es möglich eine Abschätzung über die Abweichungen der Homogenität für jeden einzelnen Kanal zu treffen.

Auswirkungen von Bandpassverschiebungen bei Messungen mit der LED-basierten Strahldichtequelle

Die Verwendung nominell baugleicher Filter für die verwendeten Radiometer gewährleistet nicht eine immer gleiche Schwerpunktswellenlänge der Kanäle, eine Verschiebung muss somit in die Unsicherheitsbetrachtung bei den Messungen mit der LED-basierten Quelle berücksichtigt werden. Während bei einer Quelle mit kontinuierlichem Spektrum, wie z. B.

bei der Verwendung von Lampen, eine Wellenlängenverschiebung vernachlässigbar ist, kann es bei LED-Quellen durch das schmalbandige Spektrum zu deutlichen Abweichungen kommen, vgl. Abbildung 9.2:

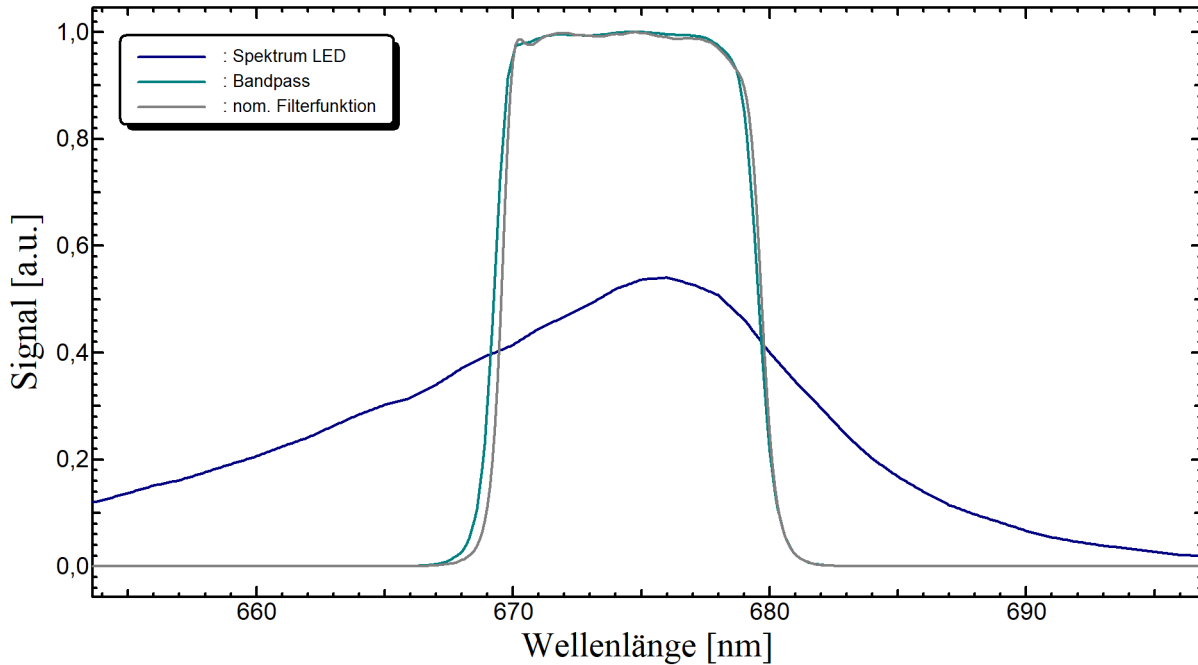


Abbildung 9.2.: Vergleich der nominellen Filterfunktion (grau) mit der gemessenen Bandpassfunktion (grün) am Beispiel des 675 nm-Kanals. In blau ist das gemessene LED-Spektrum eingezeichnet.

Vergleicht man die mit den LED-Spektren gefalteten nominellen Filterfunktionen mit den gemessenen Bandpassfunktionen, die ebenfalls mit den LED-Spektren verrechnet wurden, ergibt sich eine Abschätzung für die relativen Abweichungen, die für die Schwerpunktswellenlängenverschiebung der einzelnen Kanäle angesetzt werden müssen, siehe Tabelle 9.3.

Channel	rel. Abweichung
Si 340	0,016
Si 380	0,0002
Si 440	0,022
Si 500	0,0055
Si 675	0,00007

Tabelle 9.3.: Rel. Abweichungen für die Schwerpunktswellenlängenverschiebung bei unterschiedlichen Geräten.

Die in Tabelle 9.3 gezeigten Unsicherheitsbeiträge basieren auf dem Vergleich der gemessenen Bandpassfunktionen für ein Gerät und den nominellen Filterfunktionen des

Radiometerherstellers für den verwendeten Radiometertyp. Diese Werte wurden bereits in die Unsicherheitsbetrachtung bei der Bestimmung der Strahldichteempfindlichkeit des Cimels mit Hilfe der LED-basierten Quelle in Kapitel 9 miteinbezogen. Da diese Werte nur für den speziellen Fall eines Radiometers sind, dienen diese nur als Abschätzung der entstehenden Unsicherheiten bei unterschiedlichen Geräten dieses Typs. Für eine weitergehende Betrachtung müssen die Bandpassfunktionen der zu messenden Geräte bekannt sein, oder eine zumindest weitere Geräte für eine statistische Betrachtung der Schwerpunktwellenlängenverschiebung vermessen werden.

Die Kalibrierung der LED-Quelle kann nun mit den Kalibrierungen über die BaSO₄-beschichtete und mit Lampen verwendete Kugel, vgl. Abschnitt 6.2, sowie mit der Kalibrierung über die Tablette, Abschnitt 6.3 und die Bestrahlungsstärkekalibrierung über eine Lampe und das durchstimmbare Lasersystem TULIP, beschrieben in Abschnitt 6.1 verglichen werden. Eine Diskussion und ein Vergleich der Ergebnisse findet sich im nächsten Kapitel.

10. Diskussion der Ergebnisse der Kalibrierungsmethoden

Die LED-basierte Quelle wurde unter anderem zu dem Zweck entwickelt, als Alternative für lampenbasierte Systeme eingesetzt zu werden. Elementar hierfür sind Stabilität und Reproduzierbarkeit, aber auch die Möglichkeit, dass diese Quelle absolut kalibriert werden kann, so dass sie im Unterschied zu einer Monitorquelle für die Bestimmung von Empfindlichkeiten verwendet werden kann. Zu diesem Zweck wurden als eine Art Proof-of-Principle die ersten fünf Kanäle vermessen. Im folgenden soll überprüft werden, inwieweit die auf andere Arten und an anderen Aufbauten bestimmten Strahldichteempfindlichkeiten mit denen übereinstimmen, die mit Hilfe der LED-Quelle berechnet wurden. Dies soll ein weiterer Test für die Eignung sein. Tabelle 10.1 zeigt die Empfindlichkeiten, die mit Hilfe der LED-basierten Quelle, von TULIP, der Tablette und der BaSO₄-basierten Kugel *RedIS* und der Lampenmessung bestimmt wurden. Ein graphischer Vergleich folgt.

Für die Umrechnung der Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit wurde wie auch bei den Messungen am TULIP die Werte für das FOV verwendet, die am PMOD bestimmt wurden, vgl. Abschnitt 5.3.

Cimel Channel	$s_L(\lambda)$ (LED-Quelle)	$s_L(\lambda)$ (RedIS)	$s_L(\lambda)$ (Tablette)	$s_L(\lambda)$ (TULIP)	$s_L(\lambda)$ (Lampe)
Si 340	18,5 (0,9)	17,9 (0,5)	19 (11)	18,4 (0,3)	18,5 (0,9)
Si 380	44,8 (1,6)	45,7 (0,5)	44,8 (8,1)	46,7 (0,5)	47,1 (0,2)
Si 440	156,8 (7,6)	159,4 (2,2)	156,4 (5,2)	163,4 (0,8)	164,7 (0,3)
Si 500	186,8 (3,6)	187,1 (2,4)	184,7 (5,0)	192,4 (1,2)	193,1 (0,9)
Si 675	279,3 (5,8)	277,5 (2,4)	275,7 (5,6)	283,5 (1,4)	284,9 (0,4)
Si 870		353,4 (2,4)	356,1 (6,0)	360,3 (3,0)	360,4 (1,2)
Si 937		377,9 (2,2)	380,7 (5,4)	385,2 (3,4)	385,3 (1,8)
Si 1020		308,0 (1,9)	311,6 (6,0)	311,6 (1,9)	310,8 (2,3)
InGaAs 1020		430,0 (2,6)	430,0 (2,6)	444,0 (6,4)	440,9 (5,3)
InGaAs 1640		1816,4 (12,2)	1816,4 (12,2)	1850,0 (24,0)	1837,0 (22,0)

Tabelle 10.1.: Vergleich der auf fünf unterschiedlichen Methoden basierten Labormessungen bestimmten Strahldichteempfindlichkeiten in $[\text{cts}/\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{sr}}]$. In Klammern sind die absoluten erweiterten Messunsicherheiten angegeben.

Vergleicht man die Strahldichteempfindlichkeiten, die mit Hilfe der LED-basierten Quelle gemessen wurden mit den vorherigen Messung, ist zu erkennen, dass die Werte für den Kanal um 340 nm sich innerhalb der Unsicherheiten decken. Der mit dem Strahldichtenormal bestimmte Wert ist innerhalb seiner Unsicherheit im Bereich der anderen Strahldichteempfindlichkeiten für den 340 nm-Kanal, jedoch ist die Unsicherheit sehr groß. Dies ist jedoch dadurch zu begründen, dass bei der Messung des Kanals ein sehr hohes Dunkelsignal und hohe Streulichtbeiträge gemessen wurden. Zusätzlich ist das Signal der Quelle in diesem Wellenlängenbereich sehr gering, so dass der Signal-zu-Rauschen Quotient sehr klein ist und somit eine hohe Unsicherheit entsteht.

Bei den Kanälen um 380 nm, 440 nm, 500 nm und 675 nm stimmen im Rahmen der Unsicherheiten die auf Strahldichtemessungen basierten Methoden miteinander überein, ebenso wie die beiden über die Bestrahlungsstärke bestimmten Werte für die Strahldichteempfindlichkeit. Es fällt auf, dass die am TULIP-Setup und mit Hilfe der Lampe bestimmten Werte über denen liegen, die durch die LED-Quelle, RedIS und mit Hilfe des Strahldichtenormals bestimmt wurden.

Die Kanäle höher als 675 nm wurden nicht mit der LED-basierten Strahldichte bestimmt. Auch hier ist zu erkennen, dass die beiden auf Strahldichtemessungen basierten Methoden untereinander stimmig sind, ebenso wie die beiden auf Bestrahlungsstärkemessungen basierenden Methoden. Dieses Verhalten wird lediglich vom Si1020 nm-Kanal unterbrochen. Die für diesen Kanal bestimmten Strahldichteempfindlichkeiten stimmen für die vier Methoden überein.

Zur besseren Sichtbarkeit wurden die auf verschiedene Weisen bestimmten Strahldichteempfindlichkeiten graphisch im Vergleich zueinander dargestellt. Für diese Darstellung wurde ein gewichteteter Mittelwert x_W berechnet, so dass der Wert mit der kleinsten Unsicherheit das größte Gewicht hat. Der gewichtete Mittelwert berechnet werden aus [110]:

$$x_W = \sum_i w_i x_i = \frac{\sum_i \frac{x_i}{v_i^2}}{\sum_i \frac{1}{v_i^2}} \quad (10.1)$$

wobei der Gewichtungsfaktor w_i gegeben ist durch:

$$w_i = \frac{\frac{1}{v_i^2}}{\sum_j \frac{1}{v_j^2}} \quad (10.2)$$

Die entsprechenden Unsicherheiten u_i können berechnet werden durch:

$$u^2(x_w) = \frac{1}{\sum_j \frac{1}{u_j^2}} \quad (10.3)$$

Die daraus berechneten gewichteten Mittelwerte sind zusammen mit den auf verschiedene Weisen bestimmten Strahldichteempfindlichkeiten pro Kanal und zugehörigen erweiterten Unsicherheiten in den folgenden Abbildungen gezeigt. Der Gewichtete Mittelwert ist durch

eine breite schwarze Linie gekennzeichnet, die zugehörigen erweiterten Unsicherheiten nach oben bzw. nach unten mit dünneren schwarzen Linien.

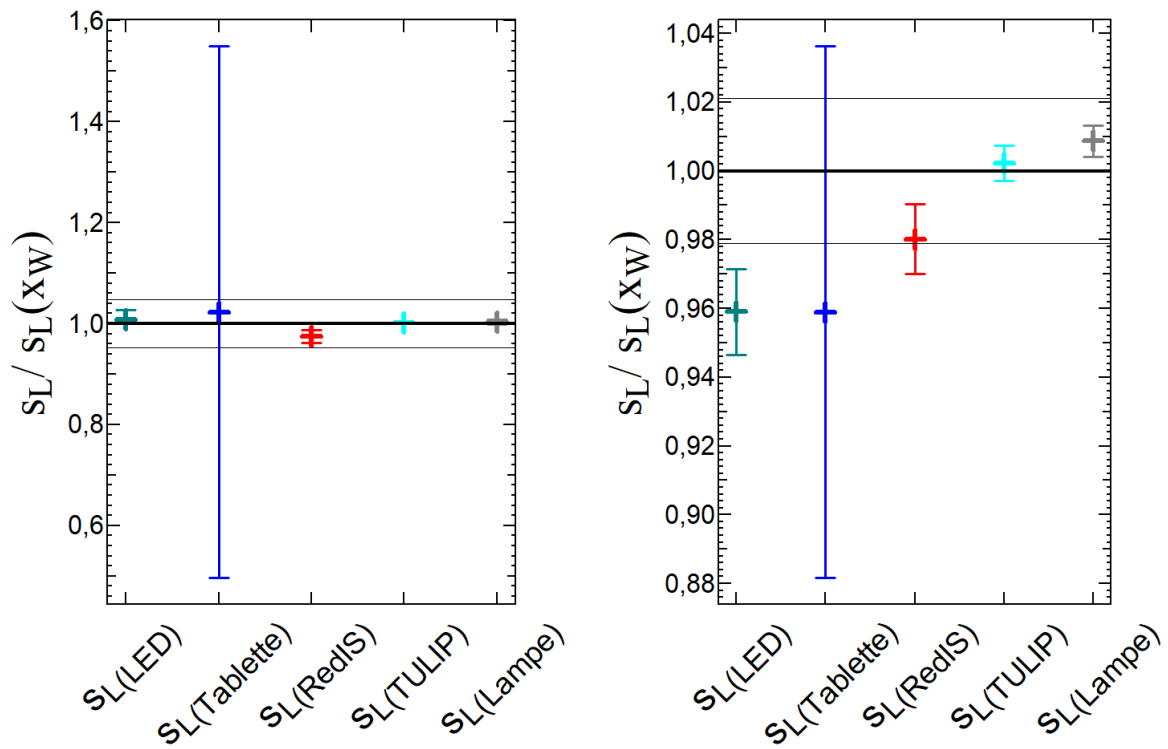


Abbildung 10.1.: Vergleich der Kalibriermethoden für den Kanal um 340 nm (links) und um 380 nm (rechts).

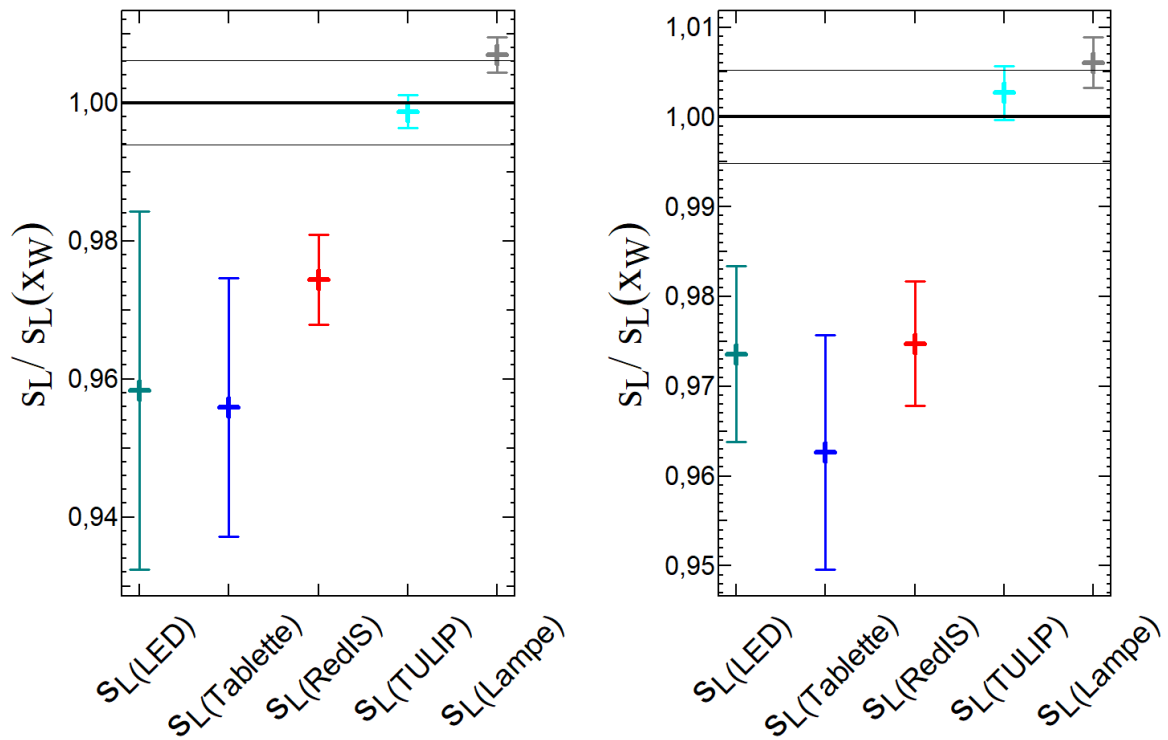


Abbildung 10.2.: Vergleich der Kalibriermethoden für den Kanal um 440 nm (links) und um 500 nm (rechts).

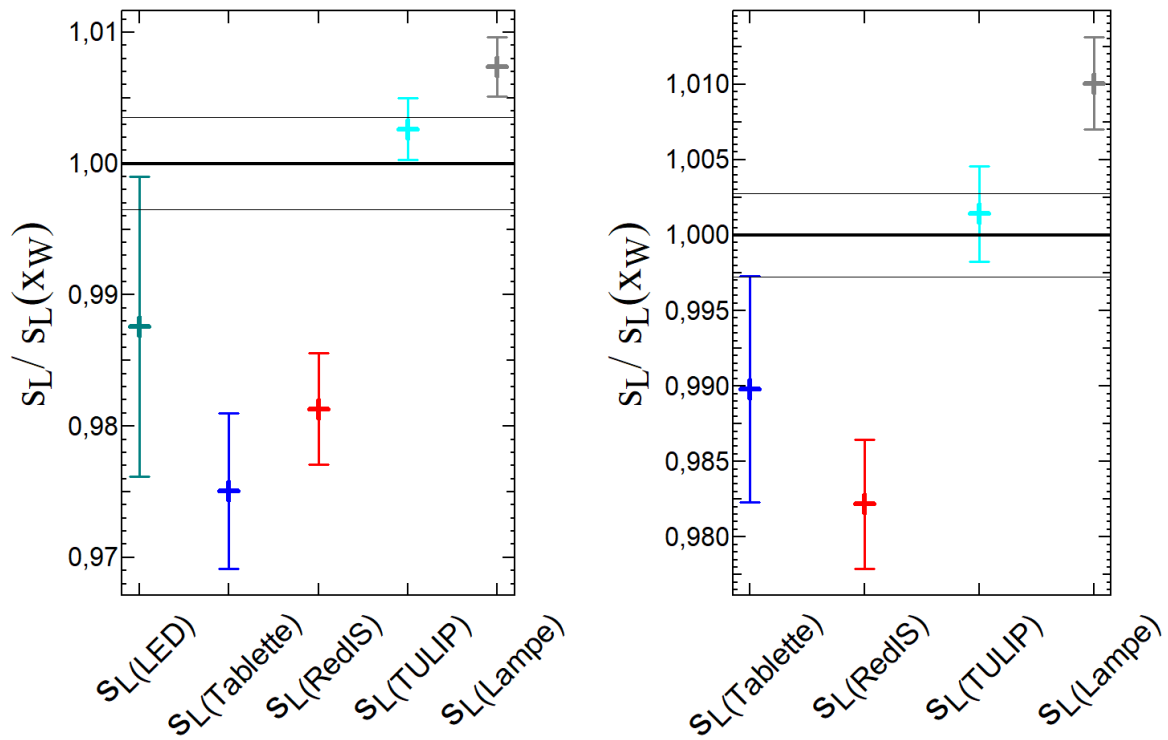


Abbildung 10.3.: Vergleich der Kalibriermethoden für den Kanal um 675 nm (links) und um 870 nm (rechts).

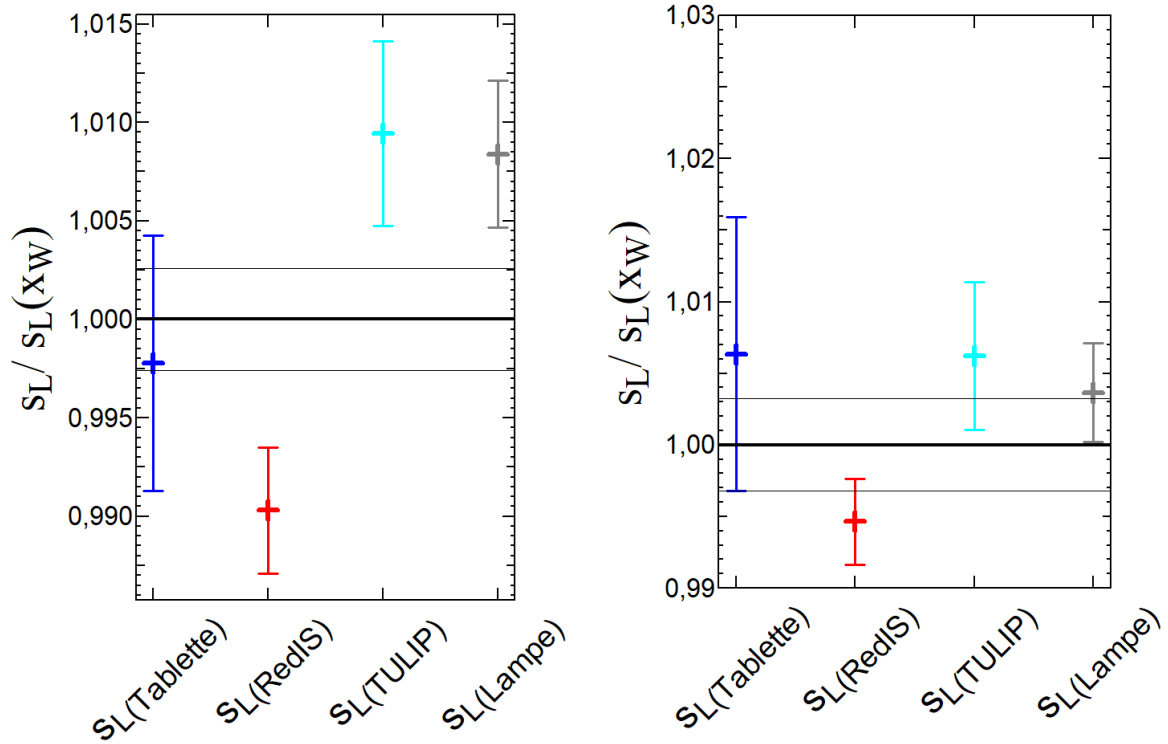


Abbildung 10.4.: Vergleich der Kalibriermethoden für den Kanal um 937 nm (links) und für den Si-Kanal um 1020 nm (rechts).

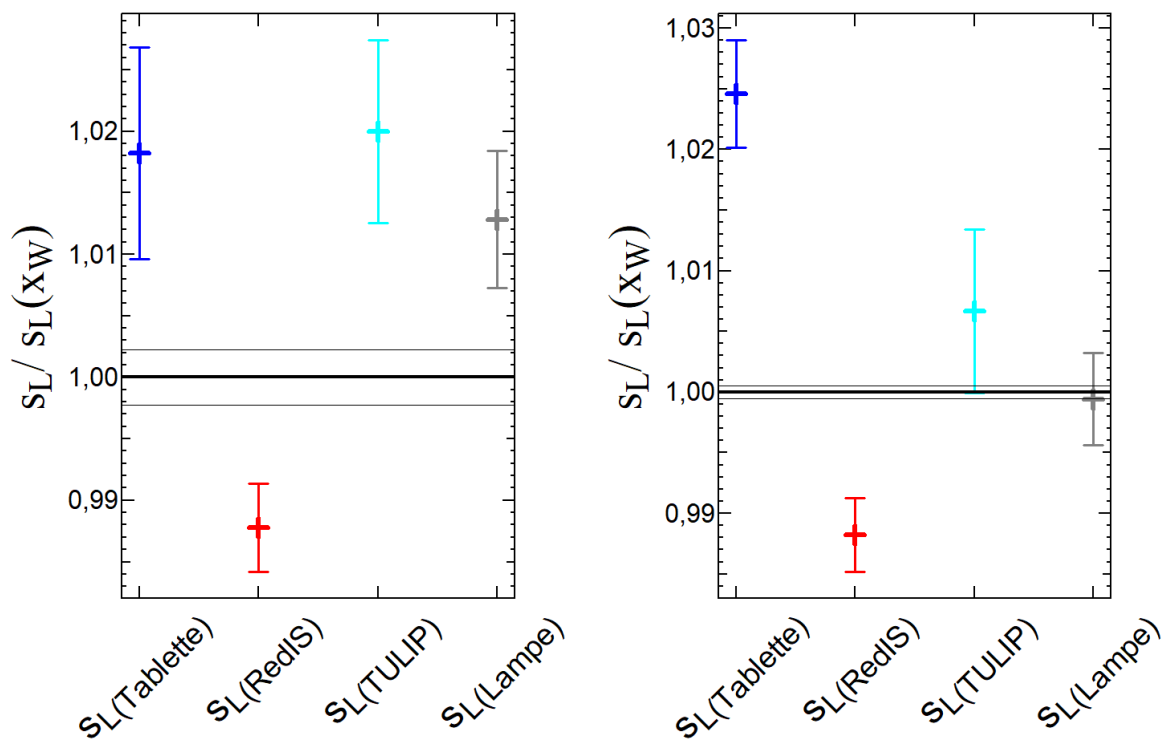


Abbildung 10.5.: Vergleich der Kalibriermethoden für den InGaAs-Kanal um 1020 nm (links) und den InGaAs-Kanal um 1640 nm (rechts).

Die Graphiken zeigen die relativen Werte zum gewichteten Mittelwert mit den zugehörigen erweiterten Unsicherheiten ($k=2$).

Zu Erkennen sind deutlich die vergleichsweise großen Unsicherheiten bei der Messung mit der dem BaSO_4 -basierten Strahldichtenormal, der Tablette. Diese relativ betrachteten großen Unsicherheiten sind hauptsächlich durch den Messaufbau und die dadurch resultierenden Justageunsicherheiten, sowie einen hohen Streulichtanteil zu begründen. Während in den Messungen mit den auf Ulbricht-Kugeln basierten Aufbauten wenige Fehlerquellen entstehen, müssen bei der Tablettenmessung deutlich mehr und höhere Unsicherheiten angenommen werden, siehe Abschnitt 6.3. Auffällig ist jedoch, wie in Tabelle 6.6 auch zu sehen, dass mit den Messungen am TULIP-Setup und mit der Glühlampe höhere Strahldichteempfindlichkeiten gemessen werden als bei den beiden anderen Methoden. Die Methoden über die Strahldichtemessungen sind untereinander stimmig, die Messungen über die Bestrahlungsstärke ebenso.

Der Unterschied liegt darin, dass für die Bestimmung der Strahldichteempfindlichkeit über die Bestrahlungsstärkemessungen das FOV eingerechnet werden muss. Die Messmethode zur Bestimmung des FOV dieser Geräte ist noch nicht abschließend entwickelt. Weitergehend sind die damit verbundenen Unsicherheiten für das FOV noch nicht alle identifiziert und bedürfen weiterhin der Diskussion innerhalb der Kalibrierlabore.

11. Zusammenfassung

In diesem Teil sollen die Ergebnisse der Arbeit diskutiert und hinsichtlich der Zielsetzung bewertet werden. Diese setzt sich in zwei Teile zusammen, was zum einen die Rückführung des Fernerkundungsnetzwerks AERONET betrifft und zum anderen die Entwicklung und Charakterisierung, sowie die Ansätze einer Absolutkalibrierung einer LED-basierten Quelle für die im AERONET verwendeten Radiometer.

Für die im AERONET verwendeten Radiometer vom Typ Cimel CE318-T wurden SI-rückführbaren Messungen der optischen Eigenschaften von Aerosolen ermöglicht, die aus der passiven Fernerkundung der Atmosphäre unter Verwendung von Sonnen- und Mondstrahlungsmessungen gewonnen werden können. Für diese Radiometer wurden die Rückführung über Bestrahlungsstärke- und Strahldichtemessungen durchgeführt. In einem ersten Schritt wurde eines der AERONET-Radiometer hinsichtlich einer radiometrischen Charakterisierung in der Form vermessen, dass die Bandpasssempfindlichkeiten an dem durchstimmbaren Lasersystem TULIP vermessen wurde. Das FOV der Geräte wurde an einem Aufbau am PMOD bestimmt. Zusätzlich wurde ein neuer Aufbau entwickelt, um mögliche Unsicherheitsquellen in den Messungen des FOV festzustellen. Es zeigte sich, dass die Verschiebung der Drehachse deutlichen Einfluss auf die Messergebnisse hat. Diese Unsicherheit muss innerhalb der kalibrierenden Labore zukünftig weiter diskutiert werden. Das Unsicherheitsbudget der FOV Messungen ist noch nicht abschließend vollständig. Gemäß des Kalibrierungsprotokolls des AERONET wurden mit Hilfe einer Klimakammer die Temperaturkoeffizienten bestimmt, welche durch eine spektrale Messung bestätigt wurden. Nach der Charakterisierung der grundsätzlichen Eigenschaften des Geräts wurde am TULIP-Setup eine Bestrahlungsstärkeempfindlichkeitsmessung durchgeführt, um die Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit eines Cimels zu bestimmen. Um eine Vergleichsmessung über die Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit zu haben, wurde in weiterer Aufbau mit einer Lampe realisiert. Durch die Vermessung des FOV konnte somit auf die Strahldichteempfindlichkeit bestimmt werden. Weitere Methoden der Strahldichteempfindlichkeitsbestimmung fanden sich in der Verwendung einer auf Ulbricht-Kugel und Glühlampe basierten Strahldichtequelle und eines Strahldichtenormals in Form einer Tablette.

Die gezeigten Methoden wurden miteinander verglichen und diskutiert. Im Rahmen der ermittelten Unsicherheiten sind die Kalibriermethoden untereinander konsistent. Die jeweiligen Unsicherheiten sind unterschiedlich hoch, was auf die Messaufbauten zurückzuführen ist, die teilweise speziell für diese Arbeit entwickelt und aufgebaut wurden, teilweise im Messbetrieb der PTB Bestand haben. Die etablierten Aufbauten sind auf möglichst geringe Messunsicherheiten ausgelegt, was bei einem neuen Aufbau auf kurze Sicht nicht möglich ist. Für eine metrologische Anwendung mit geringer Messunsicherheit müssten die verwendeten

Aufbauten entweder weiterentwickelt oder auf etablierte Messplätze zurückgegriffen werden. Das Ziel, die grundsätzliche Methodik zu testen und verifizieren wurde somit erreicht.

12. Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Eignung und Kalibrierung der PTFE-Kugel mit LED Quellen gezeigt und diskutiert. Die Quelle erfüllt die Voraussetzungen für eine Strahldichtequelle und es zeigte sich, dass auch eine Absolutkalibrierung mindestens für die Kanäle bis 675 nm möglich ist.

Es wurde begonnen, die Kugel und die Quellen über Monate wiederholt zu vermessen, um eine Abschätzung für die Alterung zu geben. Dafür wurde ein Messaufbau realisiert, der für jede Messung die gleichen Messbedingungen gewährleisten soll, der ähnlich dem Aufbau der Absolutkalibrierung in Kapitel 8. Mit Hilfe dieses Aufbaus kann wie beschrieben die Strahldichte bestimmt werden und das Langzeitverhalten beobachtet werden. Zur besseren Vergleichbarkeit wird das gleiche Spektralradiometer wie in der Absolutkalibrierung verwendet. Die aus radiometrischer Sicht charakterisierte PTFE-Kugel soll im AERONET Kalibrierlabor PHOTONS in Lille getestet werden. In diesem Labor soll die Quelle in den Kalibrieralltag eingebunden werden und mit den dort verwendeten Referenzquellen verglichen werden. Zusätzlich bietet sich dort die Möglichkeit, dass mit verschiedenen Cimel-Radiometern gemessen werden kann, bisher wurde die Bestimmung der Strahldichteempfindlichkeit von nur einem Cimel-Radiometer im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt. Wie beschrieben geht in die Strahldichteempfindlichkeitskalibrierung auch die Bandpassempfindlichkeit des Radiometers ein, die für jedes Gerät individuell ist und bekannt sein muss. Im Kalibrierlabor PHOTONS wird die im Kapitel 8 bestimmte Strahldichte in Abhängigkeit der Wellenlänge auf jedes Gerät korrigiert. Diese Werte können dann sowohl mit alten Kalibrierungen verglichen werden, als auch mit den Werten, die durch Messungen mit Referenzquellen verglichen werden.

Die beschriebenen Vergleichsmessungen werden mit sogenannten Feld-Instrumenten durchgeführt. Zusätzlich soll aber auch mit Master-Instrumenten getestet werden, vgl. Kapitel 2. Sofern die Messungen zufriedenstellend verlaufen, muss über weitere Möglichkeiten der Absolutkalibrierung nachgedacht werden, die auch den spektralen Bereich über 675 nm abdecken. Eine Herausforderung bei der Kalibrierung dieser und auch anderen LED-basierten Quellen ist die geringe Leistung der LEDs, vgl. Abschnitt 7.1. Um eine ausreichende Kalibrierung zu erhalten muss in sehr kleinen Schrittweiten vermessen werden, mit Spektralradiometern, die genügend empfindlich sind für die geringe Leistung der LEDs speziell um 1640 nm.

Sollte die LED-basierte Quelle sich auch im Alltagsgebrauch des Kalibrierlabors bewähren, sollte darüber nachgedacht werden, ob die Quelle bzgl. der Leistung verbessert werden kann, sofern LEDs mit höherer Leistung erhältlich sein sollten. Dieses würde eine Verbesserung

des Signal zu Rauschen Verhältnisses mit sich bringen und somit auch eine Verringerung der Unsicherheit der entsprechenden Kanäle.

Anhang

A. Spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeiten des Cimel #1270

Spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeiten für die Kanäle 340 nm - 1640 nm

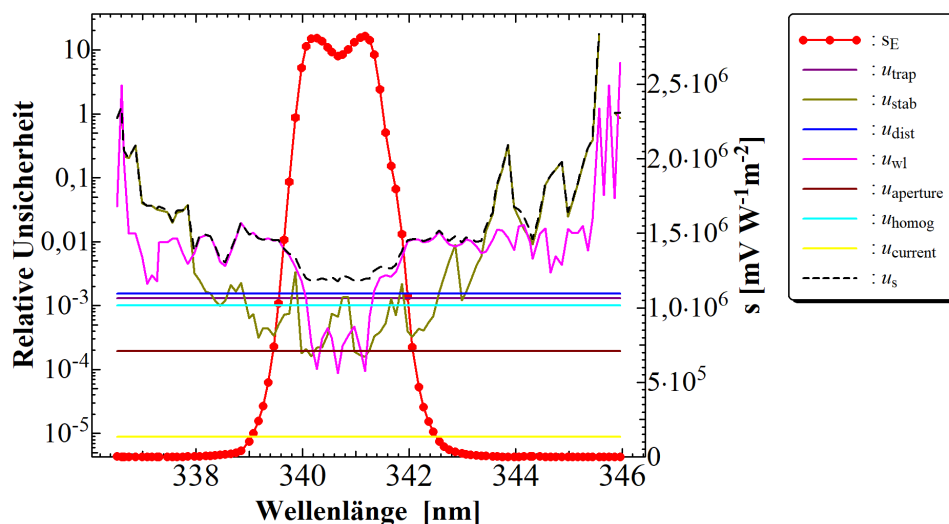


Abbildung A.1.: Spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit s_E des 340 nm-Kanals in Abhängigkeit der Wellenlänge im in-band-Bereich mit rel. Unsicherheiten.

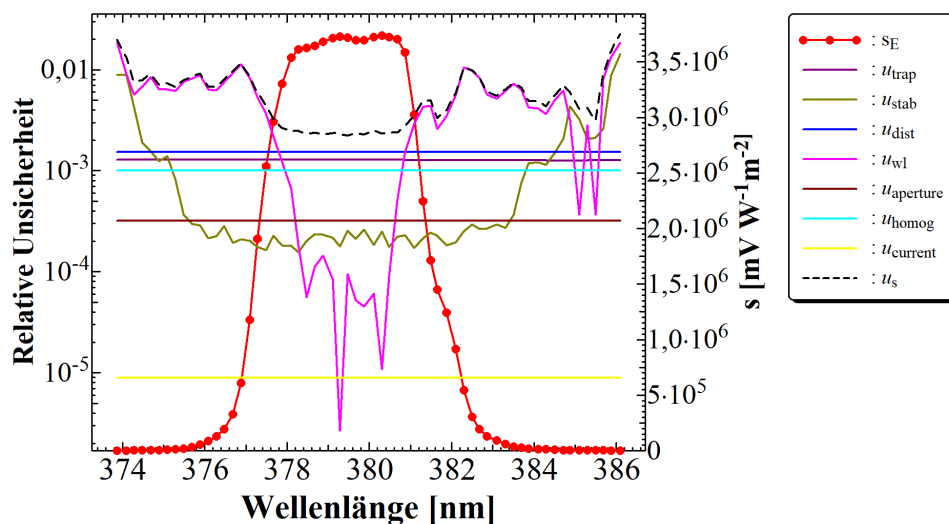


Abbildung A.2.: Spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit s_E des 380 nm-Kanals in Abhängigkeit der Wellenlänge im in-band-Bereich mit rel. Unsicherheiten.

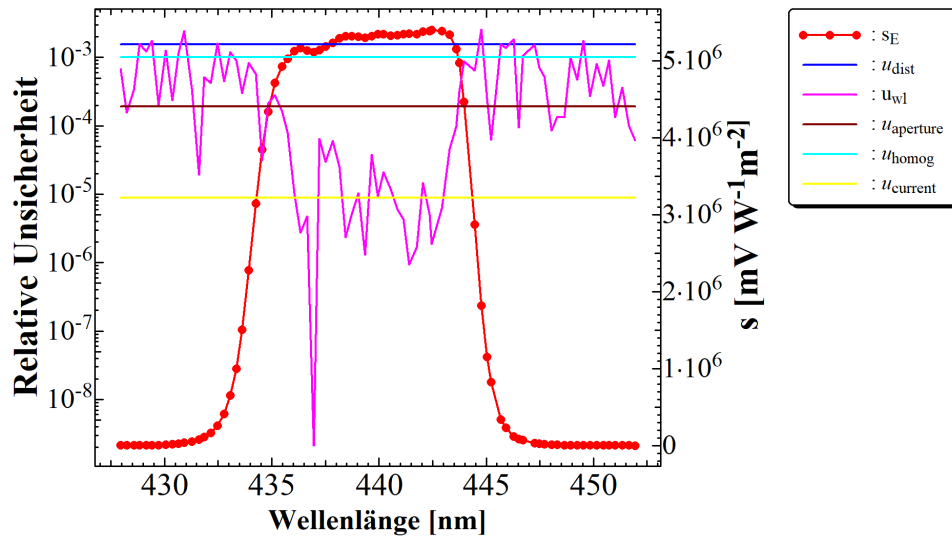


Abbildung A.3.: Spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit s_E des 440 nm-Kanals in Abhängigkeit der Wellenlänge im in-band-Bereich mit rel. Unsicherheiten.

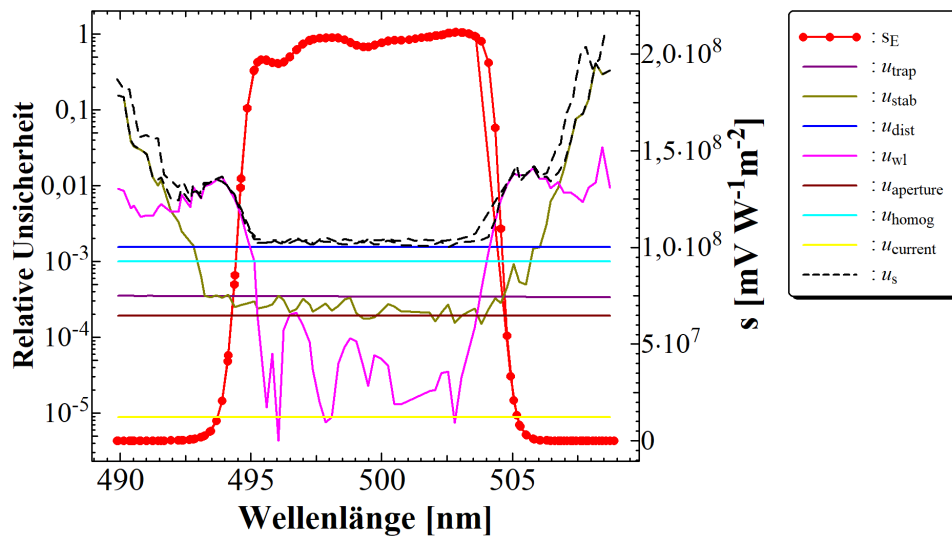


Abbildung A.4.: Spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit s_E des 500 nm-Kanals in Abhängigkeit der Wellenlänge im in-band-Bereich mit rel. Unsicherheiten.

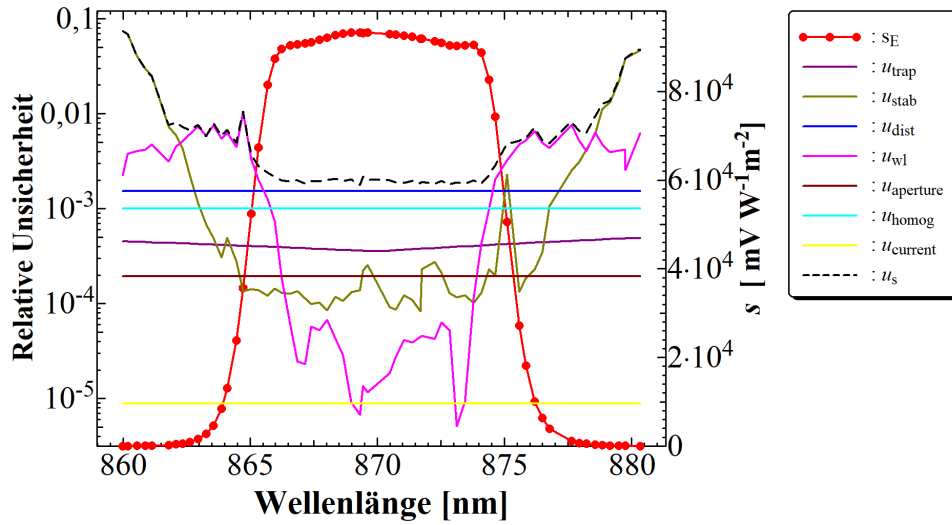


Abbildung A.5.: Spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit s_E des 870 nm-Kanals in Abhängigkeit der Wellenlänge im in-band-Bereich mit rel. Unsicherheiten.

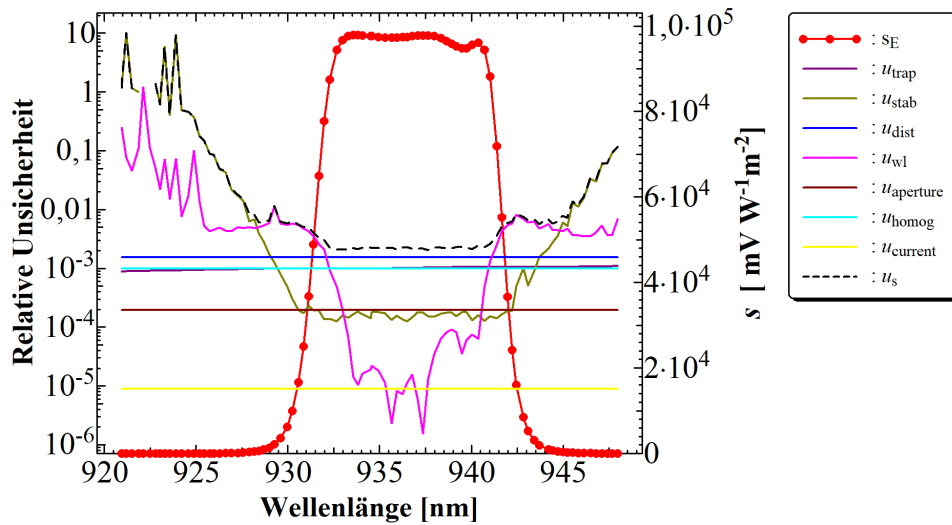


Abbildung A.6.: Spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit s_E des 937 nm-Kanals in Abhängigkeit der Wellenlänge im in-band-Bereich mit rel. Unsicherheiten.

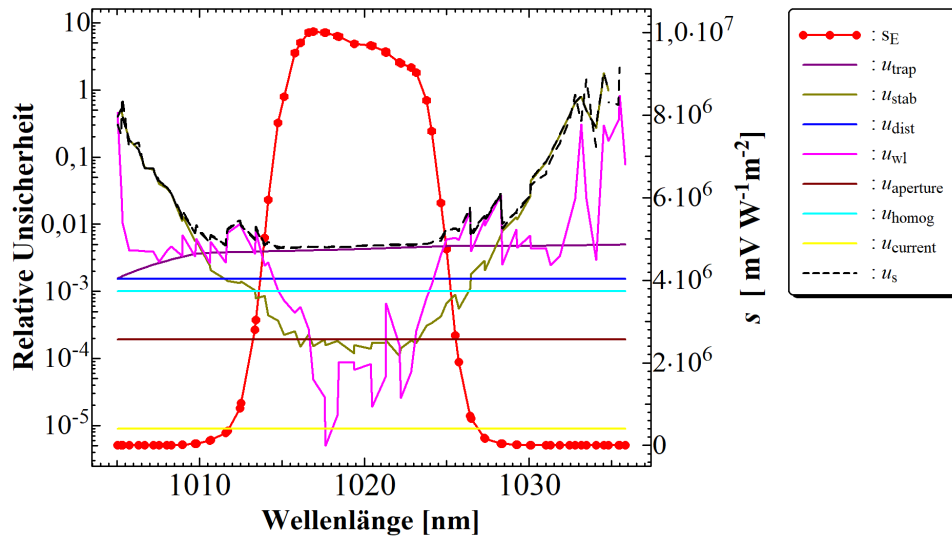


Abbildung A.7.: Spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit s_E des 1020 nm-Kanals in Abhängigkeit der Wellenlänge im in-band-Bereich mit rel. Unsicherheiten.

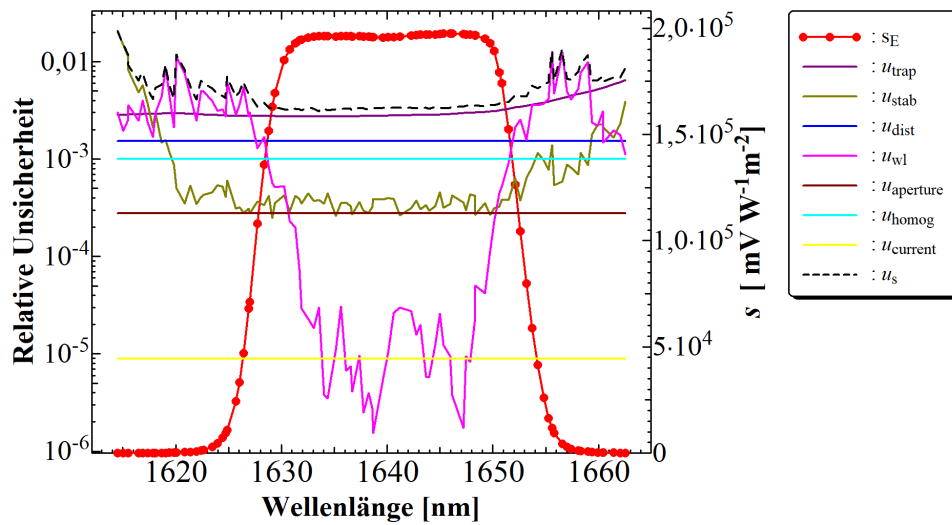


Abbildung A.8.: Spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit s_E des 1640 nm-Kanals in Abhängigkeit der Wellenlänge im in-band-Bereich mit rel. Unsicherheiten.

B. Anordnung der LEDs der LED-basierten Strahldichtequelle

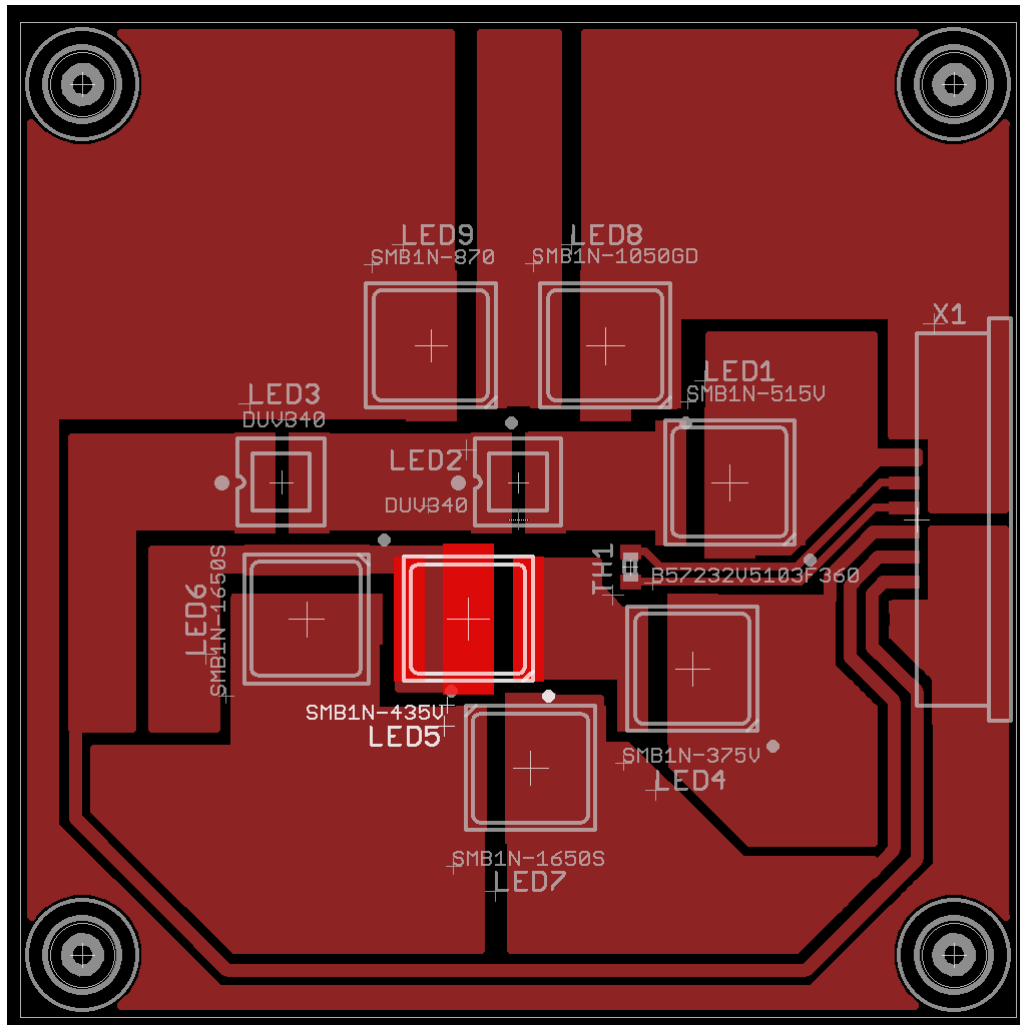


Abbildung B.1.: Anordnung der SMD LEDs auf der Platine 2 [90].

C. Homogenität der der LED-basierten Strahldichtequelle

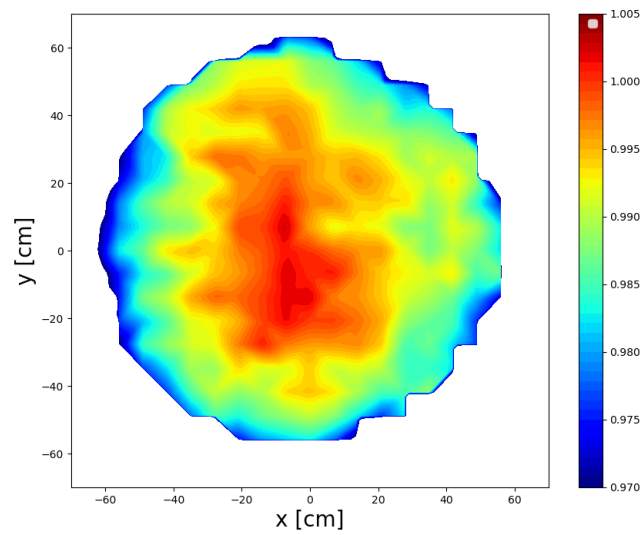


Abbildung C.1.: Homogenität für den Kanal um 340 nm.

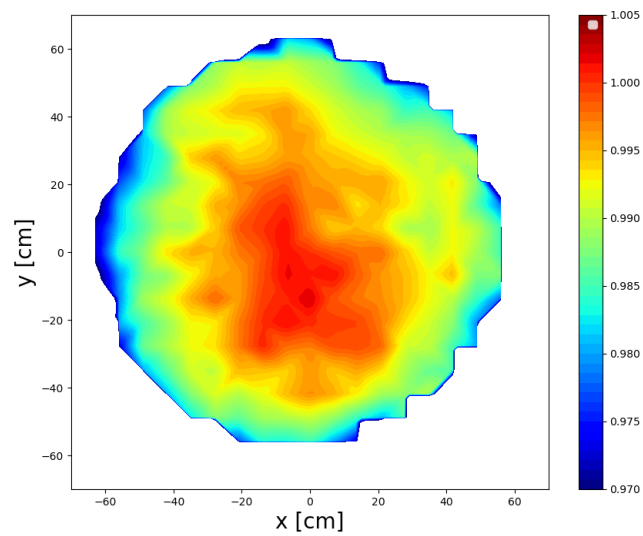


Abbildung C.2.: Homogenität für den Kanal um 380 nm.

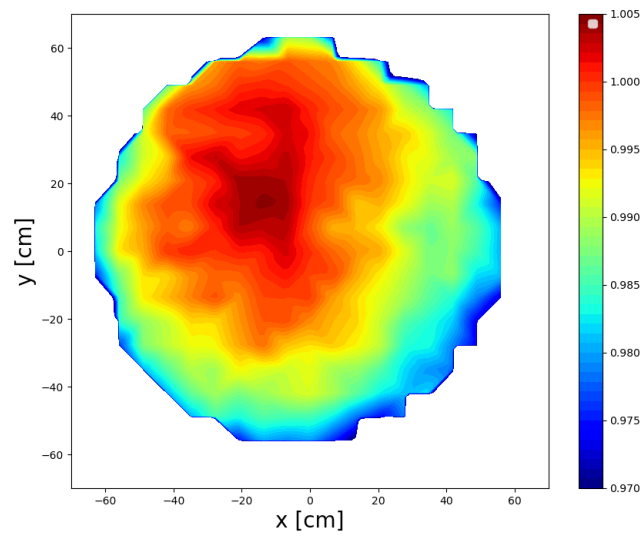


Abbildung C.3.: Homogenität für den Kanal um 440 nm.

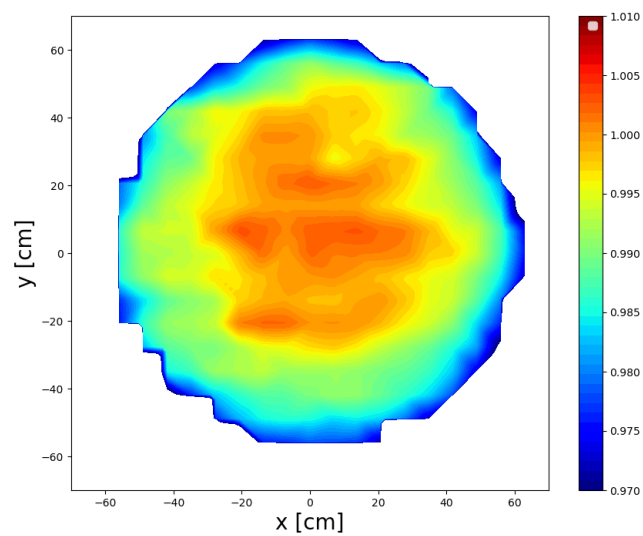


Abbildung C.4.: Homogenität für den Kanal um 870 nm.

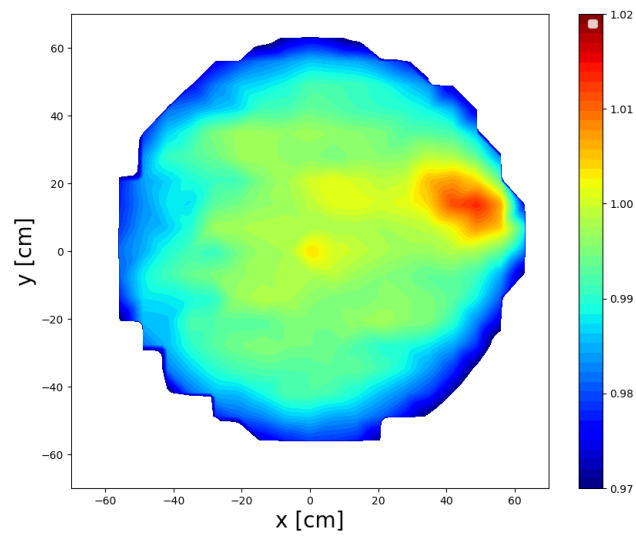


Abbildung C.5.: Homogenität für den Kanal um 937 nm.

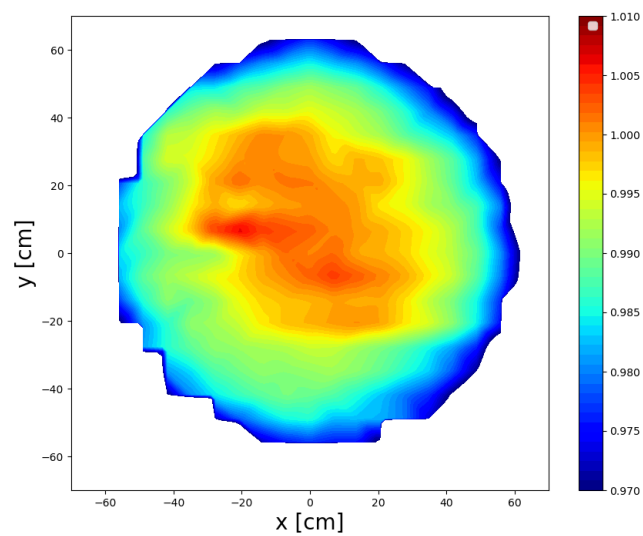


Abbildung C.6.: Homogenität für den Kanal um 1020 nm.

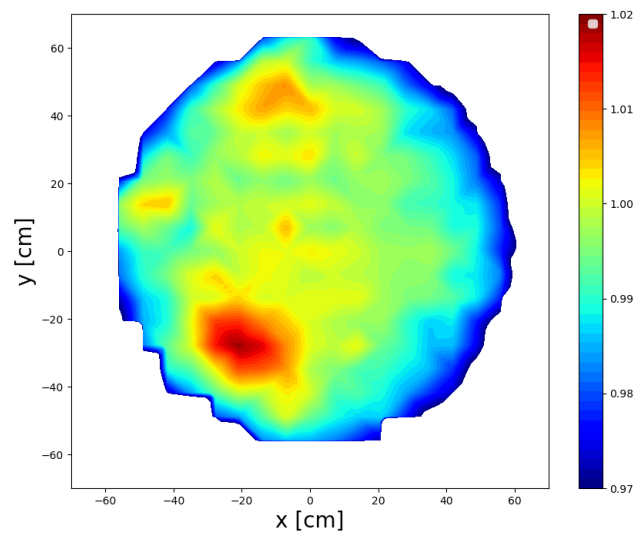


Abbildung C.7.: Homogenität für den Kanal um 1640 nm.

Literaturverzeichnis

- [1] G.E. Shaw et al. *Sun Photometry. Bulletin of the American Meteorological Society*, **64**, 1983.
- [2] J.Martins and M.Tabacniks. *Special Topics in Experimental Atmospheric Physics*, (2009). https://userpages.umbc.edu/~martins/PHYS650/Procedures_for_Sunphotometer_Calibration_Class_6.pdf, 01.10.2025.
- [3] C.Toledano et al. *Assessment of Sun photometer Langley calibration at the high-elevation sites Mauna Loa and Izaña. Atmospheric Chemistry and Physics*, **18**, 2018.
- [4] M.Campanelli et al. *Application of the SKYRAD Improved Langley plot method for the in situ calibration of CIMEL Sun-sky photometers. Applied Optics*, **46**, 2007.
- [5] B.N. Holben et al. *AERONET—A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. Remote Sensing of Environment*, **66**, 1998.
- [6] World Meteorological Organization. *WMO/GAW Aerosol Measurement Procedures, Guidelines and Recommendations. 2nd edition*, **227**, 2016.
- [7] World Meteorological Organization. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. WMO-No. 8*, **7**, 2006.
- [8] World Meteorological Organization. *Manual on the WMO Integrated Global Observing System. WMO-No. 1160, Annex VIII*, 2024.
- [9] World Meteorological Organization. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. WMO-No.*, **8**, 2023.
- [10] N. T. O'Neill and John R. Miller. *Combined solar aureole and solar beam extinction measurements. 2: Studies of the inferred aerosol size distributions. Appl. Opt.*, **23**, 1984.
- [11] G.E.Shaw et al. *Investigations of Atmospheric Extinction Using Direct Solar Radiation Measurements Made with a Multiple Wavelength Radiometer. Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **12**, 1973.
- [12] A.Ångström. *Apparent solar constant variations and their relation to the variability of atmospheric transmission. Tellus*, **22**, 1970.
- [13] P. W. Kiedron and J. J. Michalsky. *Non-parametric and least squares Langley plot methods. Atmospheric Measurement Techniques*, **10**, 2017.

- [14] S. Studer et al. *A climatology of the diurnal variations in stratospheric and mesospheric ozone over Bern, Switzerland. Atmospheric Measurement Techniques*, **14**, 2014.
- [15] S. Studer et al. *General method for calibrating Sun photometers. Applied Optics*, **33**, 1994.
- [16] J. Gröbner et al. *Spectral Aerosol Optical Depth from traceable spectral solar irradiance measurements to the SI. Atmospheric Measurement Techniques*, **16**, 2023.
- [17] Joint Committee for guides in metrology. *International vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms*, 2007.
- [18] Bureau international des poids et mesures. *Le Système international d'unités The International System of Units*, 2006.
- [19] EinZeitG. *Gesetz über die Einheiten im Messwesen und die Zeitbestimmung*, 1986.
- [20] Physikalisch-Technische Bundesanstalt. *Hoheitliche Aufgaben der PTB*. <https://www.ptb.de/karriere/arbeiten-in-der-ptb/ueber-uns>, 6.10.2025.
- [21] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. *Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)*. <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Artikel/Ministerium/Geschaeftsbereich/physikalisch-technische-bundesanstalt-ptb.html>, 6.10.2025.
- [22] Joint Committee for guides in metrology. *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*, 2008.
- [23] Dariusz Kacprzak Reza Abbasinejad. *The probable error of a mean. Biometrika*, **6**, 1908.
- [24] J.Metzdorf et al. *Broadband-filter detector for measuring blackbody temperature*, 1987.
- [25] L.Werner et al. *Accurate determination of the spectral responsivity of silicon trap detectors between 238nm and 1015nm using a laser-based cryogenic radiometer. Metrologia*, **37**, 2000.
- [26] P.Sperfeld. *Entwicklung einer empfängergestützten spektralen Temperaturskala. Dissertation*, 1999.
- [27] H.J. Kostkowski. *Reliable Spectroradiometry*. Spectroradiometry Consulting, 1997.
- [28] Bergmann Schäfer. *Lehrbuch der Experimentalphysik Bd. 3, Optik*. 10. Auflage. de Gruyter, 2004.
- [29] Deutsches Institut für Normung e.V. *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Größen, Formelzeichen und Einheiten der Strahlungsphysik. Normung, DIN 5031*, 1982.

- [30] W.Erb (Hrsg.). *Leitfaden der Spektroradiometrie*. Band 6. Springer-Verlag, (1989).
- [31] Labsphere. *Integrating Sphere Theory and Applications*, (2017). <https://www.labsphere.com/wp-content/uploads/2021/09/Integrating-Sphere-Theory-and-Applications.pdf>, 8.12.2022.
- [32] Gigahertz-Optik. *Grundlagen der Lichtmesstechnik*, (November 2020). <https://www.gigahertz-optik.com/de-de/service-und-support/informationsportal/grundlagen-lichtmesstechnik/>, 8.12.2022.
- [33] Labsphere. *Integrating Sphere Theory, CALCON Workshop*, (2020). <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1365&context=calcon>, 19.12.2022.
- [34] OptoPolymer. *Integrating Spheres*, (2018). <https://optopolymer.de/wp-content/uploads/2018/07/Ulbrichtkugeln-eng-Kat-web.pdf>, 19.12.2022.
- [35] CI Systems. *Coating Materials and Ports of Integrating Spheres*, (2018). <https://www.ci-systems.com/Integrating-Sphere-Coating-Materials-and-Ports>, 19.12.2022.
- [36] H.-J. Ebinger und A. Kurrek. *Reflexionseigenschaften von Anstrichstoffen für Ulbrichtsche Kugeln*. *Lichttechnik*, **9**, 1970.
- [37] Labsphere. *Reflectance Coatings and Materials*. <https://www.labsphere.com/wp-content/uploads/2024/05/ReflectanceCoatingsMaterialsTechGuideRev04.pdf>, 17.9.2025.
- [38] C. A. Sperati and H. W. Starkweather. *Fluorine-containing polymers. II. Polytetrafluoroethylene*. In *Fortschritte Der Hochpolymeren-Forschung*. Springer Berlin Heidelberg, 1961.
- [39] J. Wu et al. *The effect of temperature-induced phase transition of PTFE on the dynamic mechanical behavior and impact-induced initiation characteristics of Al/PTFE*. *Polymer Testing*, **91**, 2020.
- [40] Ball et al. *Effect of polytetrafluoroethylene (PTFE) phase transition at 19 °C on the use of Spectralon as a reference standard for reflectance*. *Appl. Opt.*, **52**, 2013.
- [41] Gigahertz-Optik. *ODM98 Synthetic White Diffuse Material*. <https://www.gigahertz-optik.com/en-us/products/cat/odm98%20synthetic%20white%20diffuse%20reflecting%20material/>, 13.12.2023.
- [42] A.E. Stiegmann et al. *Ultraviolet stability and contamination analysis of Spectralon diffuse reflectance material*. *Opt. Eng.*, **32**, 1993.
- [43] P.S. Shaw et al. *Ultraviolet characterization of integrating spheres*. *Applied optics*, 2007.

- [44] Umweltbundesamt. *Zu Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Haushaltslampen mit ungebündeltem Licht*, 2014.
- [45] T.Gerloff et al. *Luminous intensity comparison based on new standard lamps with LED reference spectrum. CIE Proceedings*, **29**, 2019.
- [46] S.Hunklinger. *Festkörperphysik*. 3. Auflage. De Gruyter Oldenbourg, 2011.
- [47] E. Fred Schubert. *Light-Emitting Diodes*. 4th Edition. Cambridge University Press, 2023.
- [48] S. Nakamura. *Present performance of InGaN-based blue/green/yellow LEDs*. In *Light-Emitting Diodes: Research, Manufacturing, and Applications*, volume 3002, 1997.
- [49] Y.Taniyasu et al. *An aluminium nitride light-emitting diode with a wavelength of 210nm. Nature*, **441**, 2006.
- [50] S. Fujikawa and K. Hirano. *Impurity-Diffusion of Copper in Aluminum*. In *Diffusion in Metals and Alloys (DIMETA 88)*, volume **66**, 1990.
- [51] J.D. Robson. *Deformation Enhanced Diffusion in Aluminium Alloys. Metall Mater Trans A*, **51**, 2020.
- [52] V. Rakovics et al. *Spectral characteristics of InGaAsP/InP infrared emitting diodes grown by LPE. Materials Science and Engineering: B*, **91-92**, 2002.
- [53] G. Venkatachalapathy. *Review on Light and Photoreception for crop development under in vitro culture. European Chemical Bulletin*, **12**, 2023.
- [54] S.M. Sze and Kwok K. Ng. *Physics of Semiconductor devices*. 3rd Edition. Wiley, 2007.
- [55] Y.P. Varshni. *Temperature dependence of the energy gap in semiconductors. Physica*, **34(1)**, 1967.
- [56] G. Zibordi et al. *Calibration and Characterization of Optical Radiometers. IOCCG Protocol Series*, **3**, 2019.
- [57] Commission Internationale de L'Eclairage. *Characterization and Calibration Methods of UV Radiometers. Technical Report, CIE 220*, 2016.
- [58] Commission Internationale de L'Eclairage. *Characterization, Calibration and use of Array Spectroradiometers. Technical Report, CIE 233*, 2019.
- [59] NASA Goddard Space Flight Center. *AERONET: Aerosol Robotic Network*. <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>, 12.1.2023.

- [60] P.Goloub et al. *PHOTONS/AERONET sunphotometer network overview: description, activities, results. Proceedings of SPIE, International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics/Atmospheric Physics*, **6936**, 2008.
- [61] Cimel Electronique. <https://www.cimel.fr>.
- [62] AERONET. *Announcements 2015*. https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/announce.html, 8.10.2025.
- [63] Cimel Electronique. *CE318-T Sun Sky Lunar Multispectral Photometer*. <https://www.cimel.fr/wp-content/uploads/2021/07/CE318-T-Sun-Sky-Lunar-Multispectral-Photometer-Datasheet-EN.pdf>, 3.4.2023.
- [64] G.Schuster et al. *Angstrom exponent and bimodal aerosol size distributions. Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **111**, 2006.
- [65] A.Barreto et al. *The new sun-sky-lunar Cimel CE318-T multiband photometer-a comprehensive performance evaluation. Atmospheric Measurement Technique*, **9**, 2016.
- [66] Almansa et al. *The Langley ratio method, a new approach for transferring photometer calibration from direct sun measurements. Atmospheric Measurement Techniques*, **17**, 2024.
- [67] Cimel Electronique. *CE318-T Photometer User´s Operation Manual*. https://www.cimel.fr/wp-content/uploads/2022/01/CE318_T_Photometer_UserManual_V4.10.pdf, 25.5.2023.
- [68] S. Victori (Cimel Electronique). *ENV04 MAPP Meeting*, (Februar 2021).
- [69] Hamamatsu. *Si photodiode S1336 series*, (2023). https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s1336_series_kspd1022e.pdf, 26.5.2025.
- [70] B.N. Holben et al. *AERONET Annual Review. Remote Sensing of Environment*, **66**, 2008.
- [71] A. Köhler. *Ein neues Beleuchtungsverfahren für mikrographische Zwecke. Zeitschrift für wissenschaftliche Mikroskopie und für mikroskopische Technik*, **10**, 1893.
- [72] S.Taylor et al. *Lunar Photometer Calibration for Lunar Spectral Irradiance Measurements*, 2018.
- [73] W. Demtröder. *Experimentalphysik 3: Atome, Moleküle und Festkörper*. 3. Auflage. Springer, 2005.

- [74] K.M. Schwind S. Nevas and P.Schneider. *Tuneable Laser-Based Calibration of Filter Radiometers from Surface-Based Aerosol Monitoring Networks in Europe*. *AIP Conference Proceedings*, **2988**, 2024.
- [75] S.Nevas. *Private Kommunikation*, (2024).
- [76] Julian Gröbner. *Private Kommunikation*, (August 2024).
- [77] A.Berjon et al. *Characterization of temperature sensitivity of sun photometers by field comparison with a reference instrument*. *Journal of Aerosol Science*, **59**, 2013.
- [78] K.M. Schwind et al. *Spectrally-resolved temperature dependencies of an AERONET sun photometer*. *AIP Conference Proceedings*, **2988**, 2024.
- [79] T. Kübarsepp et al. *Nonlinearity measurements of silicon photodetectors*. *Applied Optics*, **37**(13), 1998.
- [80] J. Fischer and L. Fu. *Photodiode nonlinearity measurement with an intensity stabilized laser as a radiation source*. *Applied Optics*, **32**(22), 1992.
- [81] C. Toledano et al. *LIME: Lunar Irradiance Model of ESA, a new tool for absolute radiometric calibration using the Moon*. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **24**, 2024.
- [82] E. Theocharous. *Absolute Linearity measurements of PV HgCdTe detector in the infrared*. *Applied Optics*, **43**, 2004.
- [83] M. Schöll et al. *Making of a solar spectral irradiance dataset I: observations, uncertainties, and methods*. *Journal of Space Weather and Space Climate*, **6**, 2016.
- [84] J. Gröbner et al. *The high-resolution extraterrestrial solar spectrum (QASUMEFTS) determined from ground-based solar irradiance measurements*. *Atmospheric Measurement Techniques*, **8**, 2015.
- [85] N.Kouremeti et al. *SI-traceable solar irradiance measurements for aerosol optical depth retrieval*. *Metrologia*, **59**, 2022.
- [86] M.Campanelli et al. *Evaluation of “on site” calibration procedures for sun-sky photometers*. *Atmospheric Measurement Techniques*, **165**, 2022.
- [87] Z.Wang et al. *Uncertainty Budget for detector-based absolute radiometric calibration with GLAMR*. *Applied Optics*, **63**, 2024.
- [88] Taubert et al. *Providing Radiometric Traceability for the Calibration Home Base of DLR by PTB*. *AIP Conference Proceedings*, **1531**, 2013.
- [89] K. Ishikawa. *What is total quality control? : the Japanese way*. *Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall; Inc*, 1985.

-
- [90] S.Pendsa. *Private Kommunikation*, (Juni 2022).
- [91] Commission Internationale de L'Eclairage. *Optical Measurement of High-Power LEDs. Technical Report, CIE 225*, 2017.
- [92] Instrument Systems. *Handbuch der LED-Messtechnik*. Instrument Systems GmbH.
- [93] Tao-Peng Chu Fu-Kwun Wang. *Lifetime predictions of LED-based light bars by accelerated degradation test. Microelectronics Reliability*, **52**, 2012.
- [94] Mitsuo Fukuda. *Reliability and Degradation of Semiconductor Lasers and Leds*. Artech House Publishers, 1995.
- [95] Hung Van Nguyen. *Private Kommunikation*, (Juni 2022).
- [96] Meerstetter Engineering. *TEC Service Software*. Version 5.00. Berndorf Group, 2022.
- [97] P.S. Shaw et al. *Measurement of the ultraviolet-induced fluorescence yield from integrating spheres. Metrologia*, **46**, 2009.
- [98] Jan Valenta. *Photoluminescence of the integrating sphere walls, its influence on the absolute quantum yield measurements and correction methods. AIP Advances*, **8**(10), 2018.
- [99] Franc Grum and George W. Luckey. *Optical sphere paint and a working standard of reflectance. Applied optics*, **7** (11), 1968.
- [100] Rudolf Gross und Achim Marx. *Festkörperphysik*. 2. Auflage. de Gruyter, 2014.
- [101] Halina Kaczmarek and Andrzej Podorski. *The effect of UV-irradiation on poly(vinyl alcohol) composites with montmorillonite. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, **191**, 2007.
- [102] Subhankar Pandit and Sarathi Kundu. *Optical and structural behaviors of crosslinked polyvinyl alcohol thin films. AIP Conference Proceedings*, **1942**, 2018.
- [103] A.Factor. *Mechanisms of thermal and photogradiation of bisphenol A polycarbonate. Advanced Chemistry Series*, **259**, 1996.
- [104] A.Rivaton et al. *e photo-chemistry of bisphenol-A polycarbonate reconsidered: Part 3 – Influence of water on polycarbonate photochemistry. Polymer Degradation and Stability*, **14**, 1986.
- [105] Hamamatsu. *LC8 Spot Light Source instruction manual*. Version 2007.07. Hamamatsu Photonics K.K., (2007).
- [106] Ping-Shine Shaw and Zhigang Li. *On the fluorescence from integrating spheres. Appl. Opt.*, **47**(21):3962–3967, 2008.

- [107] S.Pape et al. *Analysis and reduction of fluorescence on PTFE-coated integrating spheres. Proceedings of NEWRAD*, 2011.
- [108] P.S.Shaw et al. *Incandescent lamp-based facility for measuring the long-term radiometric stability of spectrographs. Applied optics*, **60**, 2021.
- [109] Commission Internationale de L'Eclairage. *International Lighting Vocabulary. Technical Report, CIE 443*, 2019.
- [110] Bureau International de Poids et Mesures. *Final Report on the International Comparison of Luminous Responsivity*, 2004.
- [111] U.Grigull. *Das Newtonsche Abkühlungsgesetz: Bemerkungen zu einer Arbeit von Isaac Newton aus dem Jahre 1701*. bhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 29, 1978.
- [112] D.G.Thomas et al. *Kinetics of radiative recombination at randomly distributed donors and acceptors. Physical Review*, **140**, 1965.
- [113] D.G.Thomas et al. *Isoelectronic traps due to nitrogen in gallium phosphide. Physical Review Letters*, **15**, 1965.
- [114] W. G. Egan and T. Hilgeman. *Anomalous refractive index of submicron-sized particulates. Applied optics*, **19 (20)**, 1980.
- [115] M. B. Yurtseven et al. *The effects of temperature and driving current on the key parameters of commercially available, high-power, white LEDs. Lighting Research and Technology*, **48**, 2016.
- [116] Hrsg: W.D van Driel und X. J. Fan M. G. Pecht und M.-H. Chang. *Solid State Lighting Reliability: Components to Systems (Solid State Lighting Technology and Application Series, 1)*. Springer, 2013.
- [117] Dariusz Kacprzak Reza Abbasinejad. *A comprehensive detailed formula for LED degradation and lifetime estimation leading to reduce CO₂ emissions. Cleaner Engineering and Technology*, **9**, 2022.
- [118] Donald A. Neamen. *Semiconductor Physics and Devices*). McGraw-Hill, 2012.
- [119] Hamamatsu. *Si photodiode*, (July2015). https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/g17190-003k_etc_kird1153e.pdf, 6.5.2025.
- [120] M. Cerchez. *Semiconductor Devices and Applications (Script for the MSc Course for students of physics)*, 2016.
- [121] N. Bohr. *On the Constitution of Atoms and Molecules. Philosophical Magazine*, **26**, 1913.

Abbildungsverzeichnis

2.1. Messung in verschiedenen Zenitwinkeln Θ über den Tag verteilt.	12
3.1. Kalibrierkette für die Rückführung eines Radiometers auf das internationale Einheitensystem SI über die spektrale Bestrahlungsstärke (violett) und die Strahldichte (blau).	18
4.1. Abhängigkeiten der Bestrahlungsstärke vom Cosinus und des Abstandquadrates.	21
4.2. Strahldichte von einer Fläche A ausgehend.	22
4.3. Ulbricht-Kugel mit Einlassport A_i und Ausgangsport A_e	25
4.4. Strahlungsaustausch zwischen a) zwei diffusen Oberflächen und b) innerhalb einer Kugel mit diffuser Innenoberfläche.	27
4.5. 8/H-Reflexionsfaktor einer BaSO_4 -Beschichtung über die Wellenlänge [37].	29
4.6. Reflexionsgrad einer PTFE-Beschichtung über die Wellenlänge [41].	30
4.7. p-dotierte Kristalle und n-dotierte Kristalle am Beispiel von Silizium nach [47].	32
4.8. Funktionsprinzip eines Spektralradiometers.	36
4.9. Aufbau des Cimel 318-T Sensorkopfes sowie des inneren Aufbaus.	42
4.10. Optisches Design der Cimel-Radiometer. Das System ist eine vereinfachte Form des Köhler-Designs [68]. Die Farben repräsentieren dabei unterschiedliche Ausgangspunkte der Strahlungsquelle.	44
5.1. Schematischer Aufbau zur Bestimmung der Referenzebenen an der Photometerbank.	47
5.2. Gemessene Signalwerte in Abhängigkeit des Abstands am Beispiel des 440 nm-Kanals.	48
5.3. Auftragung des Abstands in Abhängigkeit der Quadratwurzel des gemessenen Signals am Beispiel des 440 nm-Kanals zur Bestimmung der Referenzebene.	48
5.4. Schematischer Aufbau zur Bestimmung der Referenzebenen am TULIP Setup.	50
5.5. Auftragung des Abstands in Abhängigkeit der Quadratwurzel des gemessenen Signals am Beispiel des 675 nm-Kanals.	51
5.6. Auftragung des Abstands in Abhängigkeit der Quadratwurzel des gemessenen Signals des Trap-Detektors.	51
5.7. Schematische Darstellung des TULIP-Aufbaus der PTB	54
5.8. Spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit s_E des 675 nm-Kanals im in-band-Bereich mit relativen Unsicherheiten.	56
5.9. Schematischer Aufbau für die Messung des FOV am PMOD.	57

5.10. FOV für den 500 nm Kanal.	58
5.11. Messaufbau zur Bestimmung des FOV des Cimel-Radiometers.	60
5.12. Auswirkungen der Verschiebung der Drehachse bei der Bestimmung des FOV am Beispiel des 675 nm-Kanals.	61
5.13. Veränderung des Drehwinkels bei Verschiebung der Drehachse.	61
5.14. Normierte Signale gegen die Temperatur des Cimels.	63
5.15. a) Montierte Heizwiderstände auf der Oberseite des Halters, b) Tempera- turbild des beheizten Filtradiometers.	65
5.16. Spektrale Empfindlichkeit des 675 nm-Kanals	65
5.17. Spektrale Empfindlichkeit des Si1020 nm-Kanals	66
5.18. Schematischer Aufbau der Linearitätsmessung am NPL.	67
5.19. Linearität des Si-Detektors des Cimel-Radiometers.	68
5.20. Linearität des InGaAs-Detektors des Cimel-Radiometers.	69
6.1. SI-rückgeführte Kalibriermethoden für die AERONET-Radiometer.	71
6.2. Spektrale Strahldichte des Strahldichtenormals <i>RedIS</i>	77
6.3. Schematischer Aufbau zur Strahldichtekalibrierung mit Hilfe eines Reflexi- onsnormals und einer Lampe.	78
6.4. Berechnete Strahldichte für die vom Reflexionsnormal ausgehende Strahldichte.	79
6.5. Einflussgrößen für die Messunsicherheitsbestimmung für Strahldichtekali- brierung mit Hilfe einer BaSO ₄ Tablette	81
7.1. Vergleich der Bandpassfunktionen mit LED Spektren	86
7.2. Anordnung der SMD LEDs auf der Platine 1 [90].	89
7.3. Einbrennverhalten der LEDs in einem Zeitraum von über 140 Stunden. Für die 340 nm LED ist eine Ausgleichsgerade für die letzten 20 Stunden in rot eingezeichnet.	91
7.4. Einhausung der LED-Quellen	93
7.5. Gesamtspektrum der LED-Quellen.	94
7.6. Integrierte und normierte Signale des Spektralradiometers bei einer zeitlichen Driftmessung der LED-Quelle gekoppelt mit einer BaSO ₄ beschichteten Ulbricht-Kugel.	95
7.7. Spektrum des verwendeten Hg-Xe-Strahlers (blau) [105].	97
7.8. Integrierte und normierte Signale der LED-Quelle unter Stickstoffspülung.	98
7.9. Vergleich der verschiedenen Baffels der verwendeten Kugeln.	100
7.10. Integrierte und normierte Signale des Spektralradiometers bei einer zeitlichen Driftmessung der LED-Quelle gekoppelt mit einer PTFE-basierten Ulbricht- Kugel.	101
7.11. Messungen mit einem Cimel-Radiometer an der PTFE-basierten Kugel	102
7.12. Homogenität für den Kanal um 500 nm und für den Kanal um 675 nm.	104
7.13. Sicht durch den Auslassport der PTFE-basierten Kugel auf die Zylinderbaffels.	105

7.14. Messaufbau für die Kalibrierung dreier Cimel-Radiometer im Kalibrierlabor.	106
8.1. Aufbau für die Absolutkalibrierung der LED-Quelle.	109
8.2. Normierte Strahldichte gegen den Messabstand am Beispiel des 440 nm-Kanals.	110
8.3. Spektrale Strahldichte der LED-Quelle mit PTFE-basierter Kugel im Bereich von 300 nm bis 750 nm.	111
9.1. Ishikawa-Diagramm zur Darstellung der Einflussgrößen für die Messunsicherheitsbestimmung für die Strahldichteempfindlichkeitsmessung der PTFE-Kugel mit LED-Quellen.	113
9.2. Vergleich der nominellen Filterfunktion mit der gemessenen Bandpassfunktion.	115
10.1. Vergleich der Kalibriermethoden für den Kanal um 340 nm und um 380 nm.	119
10.2. Vergleich der Kalibriermethoden für den Kanal um 440 nm und um 500 nm.	120
10.3. Vergleich der Kalibriermethoden für den Kanal um 675 nm und um 870 nm.	120
10.4. Vergleich der Kalibriermethoden für den Kanal um 937 nm und für den Si-Kanal um 1020 nm.	121
10.5. Vergleich der Kalibriermethoden für den InGaAs-Kanal um 1020 nm und den InGaAs-Kanal um 1640 nm.	121
A.1. Spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit s_E des 340 nm-Kanals in Abhängigkeit der Wellenlänge im in-band-Bereich mit rel. Unsicherheiten. . . .	128
A.2. Spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit s_E des 380 nm-Kanals in Abhängigkeit der Wellenlänge im in-band-Bereich mit rel. Unsicherheiten. . . .	128
A.3. Spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit s_E des 440 nm-Kanals in Abhängigkeit der Wellenlänge im in-band-Bereich mit rel. Unsicherheiten. . . .	129
A.4. Spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit s_E des 500 nm-Kanals in Abhängigkeit der Wellenlänge im in-band-Bereich mit rel. Unsicherheiten. . . .	129
A.5. Spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit s_E des 870 nm-Kanals in Abhängigkeit der Wellenlänge im in-band-Bereich mit rel. Unsicherheiten. . . .	130
A.6. Spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit s_E des 937 nm-Kanals in Abhängigkeit der Wellenlänge im in-band-Bereich mit rel. Unsicherheiten. . . .	130
A.7. Spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit s_E des 1020 nm-Kanals in Abhängigkeit der Wellenlänge im in-band-Bereich mit rel. Unsicherheiten. . . .	131
A.8. Spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit s_E des 1640 nm-Kanals in Abhängigkeit der Wellenlänge im in-band-Bereich mit rel. Unsicherheiten. . . .	131
B.1. Anordnung der SMD LEDs auf der Platine 2 [90].	132
C.1. Homogenität für den Kanal um 340 nm.	133
C.2. Homogenität für den Kanal um 380 nm.	133
C.3. Homogenität für den Kanal um 440 nm.	134
C.4. Homogenität für den Kanal um 870 nm.	134

C.5. Homogenität für den Kanal um 937 nm.	135
C.6. Homogenität für den Kanal um 1020 nm.	135
C.7. Homogenität für den Kanal um 1640 nm.	136

Abkürzungsverzeichnis

AERONET Aerosol Robotic Network

AEROSPAN AErosol Remote Sensing Network

AOD Aerosol Optical Depth

BaSO₄ Bariumsulfat

BIPM bureau international des poids et mesures

CIPM *comité* international des poids et mesures

CNES Centrenational d'études spatiales

CNRS Centre national de la recherche scientifique

cts counts (Geräteeinheiten)

DUT Detektor under Test

ECV Essential Climate Variables

FOV Field of View

GAW Global Atmospheric Watch

GCOS Global Climate Observing System

GOA Group of Atmospheric Optics

GSFC Goddard Space Flight Center

GUM Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement

INSUCNRS L'institut national des sciences de l'Univers (INSU) du CNRS

IR Infrarot

LED Light emitting diode

LOA Laboratory of Atmospheric Optics

MAPP Metrology for aerosol optical properties (EMPIR Projekt)

NASA National Aeronautics and Space Administration

- NEON** National Ecological Observatory Network
- NMI** National Metrology Institute
- OoB** Out of Band
- PHOTONS** PHOtométrie pour le Traitement Opérationnel de Normalisation Satellitaire
- PMOD** Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos
- PTB** Physikalisch-Technische Bundesanstalt
- PTFE** Polytetrafluorethylen
- PVOH** Polyvinylalkohol
- REF** Referenzdetektor
- RIMA** Red Iberica de Medida fotometrica de Aerosoles
- SI** Système international d'unités
- SMD (LED)** Surface Mounted Device (LED)
- S/N** signal to noise ratio
- ToA** Top of Atmosphere
- TULIP** Tuneable Laser In Photometry
- UV** Ultraviolett
- VIM** Internationales Wörterbuch der Metrologie
- VIS** visible radiation, deutsch: Sichtbare Strahlung
- WMO** World Meteorological Organization
- WRC** World Radiation Center

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen beteiligten Personen danken, die mich währenddessen und auf meinem Weg bis hierhin unterstützt haben.

Zunächst gilt mein Dank Prof. Dr. Stefan Kück für die hervorragende Betreuung und hilfreiche Diskussionen, die mich stets vorangebracht haben, ebenso Prof. Dr. Andreas Hangleiter für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Darüber hinaus möchte ich Dr. Saulius Nevas dafür danken, dass er mein Mentor war und meine mathematischen Fragen stets mit großem Engagement beantwortet hat. Danke die Betreuung und Unterstützung bei der Arbeit!

Ich bedanke mich bei allen Mitgliedern des Fachbereichs 4.1 für die hervorragende Arbeitatmosphäre und die sehr angenehme Zeit. Danke an Bea, Yvonne, Johannes, Maic, Till, Maatje, Mario, Thorsten, Robert, Laura, Peter und Sven P.. Mein Dank geht aber auch an ehemalige Mitglieder des Fachbereichs 4.1, Detlef, Philipp, Christian und Felix. Eure Unterstützung in fachlicher und unterhaltungstechnischer Form haben deutlich zum Erfolg beigetragen. Sven T. und Kai danke ich für die Kalibrierungen, Irina für ihre Tipps rund um die Promotion. Auch alle nicht genannten haben mir bei der Arbeit auf die eine oder andere Art geholfen.

Ohne die Unterstützung der Techniker wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Danke an die Kollegen vom Laugenfrühstück, speziell an Hung und Stefan P., die meine Ideen technisch umgesetzt haben.

Natürlich möchte ich meine externen Kollegen nicht vergessen, die stets einen Tipp für mich hatten: Julian, Natalia, Ralph, Herr Werner Jordan, Carlos und Stephane. Die Diskussionen mit euch haben mich immer vorangebracht.

Mein größter Dank gilt meinen Freunden und meiner Familie. Meinem Bruder Thorsten, Julia, meinem Fuchsi Johan, Jörn, David, Jenny und Kathy. Ihr habt dran geglaubt, auch wenn ich manches Mal meine Zweifel hatte.

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit bestätige ich, Kerstin Maria Schwind, dass die vorliegende Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades Doktorin rer. nat. von mir selbstständig und unter der Verwendung der angegebenen Quellen und Materialien verfasst wurde.

Braunschweig, 26.1.26



Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, das nationale Metrologieinstitut, ist eine wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.



Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Nationales Metrologieinstitut
ISNI: 0000 0001 2186 1887

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Telefon: (0531) 592-93 21
Fax: (0531) 592-30 08
E-Mail: presse@ptb.de
www.ptb.de