

**Von der Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften
der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
angenommene Dissertation zur Erlangung des Grades
und Titels einer Doktorin der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat.)**

**Bestimmung der spektralen Solarstrahlung
am Erdboden aus Satellitendaten
zur Bewertung des Leistungsverhaltens von
Dünnschicht-Solarzellen**

von Tanja Behrendt
geb. Kaminski
geboren am 15.05.1981 in Salzkotten

Erstgutachter: Prof. Dr. Jürgen Parisi
Zweitgutachter: Prof. Dr. Carsten Agert

Tag der Disputation: 28.10.2011

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Zusammenfassung | 5 |
| Summary | 8 |
| 1 Einleitung | 11 |
| 2 Grundlagen | 15 |
| 2.1 Spektrale Empfindlichkeit von Dünnschicht-Solarzellen | 15 |
| 2.2 Strahlungstransport in der Atmosphäre | 20 |
| 2.3 Verfahren zur Bestimmung der spektralen Einstrahlung | 23 |
| 2.3.1 Überblick | 23 |
| 2.3.2 Clear-Sky Modelle | 23 |
| 2.3.3 Die Heliosat-Methode | 31 |
| 2.3.4 Berechnung der Einstrahlung auf die geneigte Fläche | 34 |
| 3 Sensitivitätsstudien | 38 |
| 3.1 Atmosphärische und geometrische Einflüsse auf die spektrale Solarstrahlung und die Energieerzeugung von Dünnschicht-Solarzellen | 39 |
| 3.2 Spektrale Einstrahlung aus dem SOLIS-Verfahren unter Berücksichtigung des Bewölkungsgrads | 45 |
| 3.3 Spektrale Einstrahlung auf die geneigte Fläche | 51 |
| 3.3.1 Untersuchung des Clearsky-Falls | 51 |
| 3.3.2 Untersuchung in Bezug auf den Bewölkungsgrad | 52 |
| 4 Datenbasis | 58 |
| 4.1 Zusammenstellung der zur Auswertung verfügbaren spektralen Messungen | 58 |
| 4.1.1 Eigene Messungen | 60 |
| 4.1.2 Messunsicherheiten und Qualitätskontrolle | 62 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.1.3 | Charakterisierung der Strahlungssituation an den untersuchten Standorten | 64 |
| 4.2 | Datensätze der Atmosphärenparameter | 68 |
| 5 | Auswertungskonzept | 70 |
| 5.1 | Auswertung der spektralen Einstrahlung | 71 |
| 5.1.1 | Fehlermaße | 71 |
| 5.1.2 | Wetterabhängige Analyse | 72 |
| 5.1.3 | Validierung des MAGIC-Verfahrens | 73 |
| 5.2 | Auswertungen anhand des spektralen Mismatches | 73 |
| 6 | Auswertung anhand von Bodendaten | 75 |
| 6.1 | Validierung des SOLIS-Verfahrens | 75 |
| 6.1.1 | Auswertung der mittleren spektralen Einstrahlung bei wolkenlosem Himmel | 76 |
| 6.1.2 | Auswertung der mittleren spektralen Einstrahlung für alle Bewölkungssituationen | 80 |
| 6.1.3 | Auswertung des Spektralen Mismatch-Faktors | 82 |
| 6.1.4 | Auswertung der gewichteten Einstrahlung | 86 |
| 6.1.5 | Auswertung anhand gemessener Kurzschlussströme | 88 |
| 6.2 | Validierung des MAGIC-Verfahrens | 90 |
| 6.2.1 | Auswertung der mittleren spektralen Einstrahlung | 90 |
| 6.2.2 | Auswertung der normierten Einstrahlung bei ausgewählten Wellenlängen | 91 |
| 7 | Schlussfolgerungen und Ausblick | 97 |
| | Anhang | 100 |
| | Danksagung | 113 |
| | Lebenslauf | 114 |
| | Erklärung | 115 |
| | Literatur | 116 |

Zusammenfassung

Zur Planung und Überwachung von Photovoltaikanlagen ist es entscheidend, den zu erwartenden Ertrag möglichst genau abzuschätzen. Dieser ist maßgeblich durch die Einstrahlungssituation bestimmt, die im Betrieb durch die Sonnengeometrie, Bewölkung und die atmosphärische Zusammensetzung stark variiert. Neben der Gesamteinstrahlung ändert sich unter diesen verschiedenen Bedingungen auch die spektrale Zusammensetzung der Einstrahlung. Eingesetzte Halbleitermaterialien, wie z.B. kristallines Silizium, amorphes Silizium, Cadmium-Tellurid und Chalkopyrite, nutzen jeweils nur einen bestimmten Teil des solaren Spektrums zur Ladungsträgergeneration, was durch die Quantenausbeute, bzw. die spektrale Empfindlichkeit beschrieben wird. Die unterschiedlichen Materialien weisen, aufgrund unterschiedlicher Bandlücken, verschiedene spektrale Empfindlichkeiten auf und reagieren somit auch unterschiedlich stark auf Variationen in der spektralen Einstrahlung. Aus diesem Grund werden die Modulparameter zur Charakterisierung bei Standard-Test-Bedingungen auch bei einem vorgegebenen Spektrum der Einstrahlung, dem ASTM-Standardspektrum, bestimmt.

Diese Arbeit behandelt verschiedene Aspekte der spektralen Solarstrahlung, sowie ihrer Berechnung aus Satellitendaten und ihres Einflusses auf Photovoltaik-Materialien. In Sensitivitätsstudien wird gezeigt, unter welchen atmosphärischen Bedingungen das Spektrum sich ändert und wie die Änderungen im Spektrum mit möglichst nur einem Parameter beschrieben werden können. Hierzu werden die mittlere Photonenenergie, die nutzbare Einstrahlung und der spektrale Mismatch-Faktor ausgewertet.

Zur Berechnung der spektralen Einstrahlung an einem Standort wird der Bewölkungsgrad aus Satellitendaten ermittelt und mit zwei Clearsky-Modellen zur Bestimmung der spektralen Einstrahlung bei wolkenlosem Himmel kombiniert. Dazu wird mit der Heliosat-Methode der Cloud-Index aus Satellitendaten abgeleitet und in den Clearsky-Index überführt. Die wellenlängenabhängige Transmissivität der Wolken wird durch eine spektrale Wolkenkorrektur des Clearsky-Index parametrisiert. Die zwei verwendeten Clearsky-Modelle SOLIS und MAGIC basieren auf dem Strahlungstrans-

portmodell libRadtran. Sie beinhalten beide die Modified-Lambert-Beer-Parametrisierung des Tagesgangs der Einstrahlung. In SOLIS werden die Modified-Lambert-Beer-Parameter für eine festgelegte atmosphärische Zusammensetzung neu berechnet, während sie im MAGIC-Verfahren aus einer aerosolgehalts- und sonnenstandsabhängigen Look-up-Tabelle ausgelesen werden und anschließend die Änderung der Einstrahlung aufgrund des Ozon- und Wasserdampfgehalts parametrisiert wird. Das SOLIS-Verfahren, d.h. die Heliosat-Methode mit SOLIS-Clearsky, berechnet die spektrale Einstrahlung auf eine horizontale Fläche.

Zur Bestimmung der Einstrahlung auf die Modulebene von Photovoltaikanlagen ist eine weitere Umrechnung nötig. Es gibt bereits verschiedene Modelle für Breitbandeinstrahlung, die unter Verwendung der Direkt- und Diffusstrahlung auf die horizontale Ebene die Einstrahlung auf eine geneigte Fläche liefern. In dieser Arbeit wurde das Modell von Klucher auf die spektralen Bänder aus SOLIS angewendet.

Zum bestehenden SOLIS-Verfahren wurden vorbereitende Studien zur Verfahrensverbesserung durchgeführt. Anhand von Vergleichen mit Strahlungstransportrechnungen wird eine neue spektrale Wolkenkorrektur vorgeschlagen. Es hat sich außerdem gezeigt, dass die verwendete Parametrisierung der Direktstrahlung in Abhängigkeit vom Bewölkungsgrad für spektral aufgelöste Einstrahlungen unzureichend ist. Es wurde der Bereich der Zirkumsolarstrahlung, der bei der Messung der Direktstrahlung im Öffnungswinkel des Pyrheliometers liegt, untersucht. Dafür wurde die spektrale Diffusstrahlung aus libRadtran richtungsaufgelöst gerechnet.

Diese Radianzen mit einer hohen Winkelauflösung wurden außerdem dazu verwendet die Umrechnung auf die geneigte Fläche mit der Klucher-Methode zu prüfen. Die über eine Beispielfläche mit einer Neigung von 37° integrierten Radianzen wurden mit der spektralen Einstrahlung, die die Klucher-Methode liefert, verglichen. Es zeigt sich insgesamt, dass die Klucher-Parametrisierung für die Umrechnung spektral aufgelöster Einstrahlung auf die geneigte Fläche gut geeignet ist. Nur im wolkenlosem Fall ist eine Überschätzung der Diffusstrahlung und somit eine Verschiebung der spektralen Verteilung zu kürzeren Wellenlängen zu beobachten. Voraussetzung für die Umrechnung ist, dass die Direkt- und Diffusstrahlung auf die horizontale Fläche für die einzelnen Wellenlängen richtig wiedergegeben wird.

Das vom Deutschen Wetterdienst entwickelte MAGIC-Verfahren wird bereits zur Bestimmung der Breitbandeinstrahlung am Erdboden verwendet. Im Rahmen dieser Arbeit wurde in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst an der Methodenentwicklung für die Erweiterung des Verfahrens für spektral aufgelöste Einstrahlung mitgewirkt. Es wurden die Look-up Tabellen erstellt, sowie die Fit-Parameter für den Einfluss von Ozon und

Wasserdampf bestimmt und ebenso tabelliert.

Die spektral aufgelöste Einstrahlung aus den beschriebenen Verfahren, SOLIS und MAGIC, wurde erstmals an drei verschiedenen Standorten - Oldenburg (nur SOLIS), Stuttgart und Loughborough - validiert. Hierzu wurden verschiedene Eingangsdatensätze für den Aerosolgehalt analysiert. In Oldenburg wurden eigene Messungen der spektralen Einstrahlung und in Zusammenarbeit mit Jan Kühnert synchron dazu Modulmessungen - u.a. Kurzschlussstrommessungen - über einen Zeitraum von 4 Monaten durchgeführt. In Loughborough und Stuttgart wurde die spektral aufgelöste Einstrahlung auf eine geneigte Fläche gemessen, somit wurde die Klucher-Methode zur Umrechnung auf die geneigte Fläche auch anhand von Bodendaten ausgewertet. Insgesamt findet sich eine sehr gute Übereinstimmung, wobei der gewählte Eingangsdatensatz eine wichtige Rolle spielt. Schwachstellen des SOLIS-Verfahrens, die in der Sensitivitätsstudie nachgewiesen wurden, finden sich auch bei der Validierung.

Zur Bestimmung des Einflusses der spektralen Verteilung der Einstrahlung auf verschiedene PV-Technologien wurden die gemessenen und berechneten Einstrahlungen zur Berechnung des spektralen Mismatches verwendet und ausgewertet. Dabei werden in den Bodenmessungen beobachtete Trends mit SOLIS gut wiedergegeben. Die spektrale Verteilung in bewölkten Situationen kann einen Mehrertrag von bis zu 20% gegenüber dem Standardpektrum bewirken. Auch der aus den Modulmessungen bestimmte spektrale Mismatch weist insgesamt ein ähnliches Verhalten auf. Ein quantitativer Vergleich mit den gemessenen oder berechneten Spektren erwies sich durch die Überlagerung mit anderen Effekten, z.B. Reflexionsverlust, Temperatureffekte, Unsicherheit in den Datenblattangaben als schwierig.

Insgesamt sind extreme Werte des spektralen Mismatch-Faktors bei niedrigen Einstrahlungsverhältnissen zu finden (niedriger Sonnenstand, starke Bewölkung), die für den mittleren Ertrag einer PV-Anlage eine untergeordnete Rolle spielen. Um den spektralen Effekt abschätzen zu können, wird an den untersuchten Standorten die gewichtete Einstrahlung untersucht. Daraus ergibt sich für amorphes Silizium (im Jahresmittel) ein Mehrertrag von 5% und für polykristallines Silizium ein Mehrertrag von 2% gegenüber einer Ertragsabschätzung mit konstantem Standardspektrum.

Summary

For planning and monitoring of photovoltaic devices it is important to estimate the expected yield accurately. It mainly depends on the incident irradiance, which varies with sun-earth geometry, cloudiness and atmospheric composition. With changing conditions both the total irradiance and the spectral distribution of the irradiance vary. Every semiconductor material such as cristalline silicon, amorphous silicon, cadmium-telluride or CIS uses a different fraction of the solar spectrum to generate charge carriers. This is described by the quantum efficiency or spectral response. Depending on the band gap the materials show different spectral responses and different behaviour with varying spectral irradiance. To have comparable module specifications the modules are characterised at a standard spectral distribution of the irradiance (ASTM standard spectrum).

This theses covers different aspects of the solar spectrum, its calculation from satellite data and its impact on different photovoltaic materials. Sensitivity studies demonstrate the influence of different atmospheric conditions on the spectral distribution of irradiance and how the spectral distribution can be described preferable with one parameter. Therefore the average photon energy, the useful fraction and the spectral mismatch factor are evaluated.

To calculate the spectrally resolved irradiance on a horizontal plane the Heliosat-method is used and combined with two models to calculate the spectrally resolved irradiance at cloudless skies. With the Heliosat-method the cloudiness is determined from satellite data which is parameterized by the cloud index. The cloud index is transfered to the clearsky index which describes the transmittivity of the clouds. Spectral changes of the transmittivity are considered by a spectral cloud correction. The clearsky-models SOLIS and MAGIC are based on the radiative transfer model libradtran. They use the modified-lambert-beer parametrization to account for diurnal variations of the irradiance. SOLIS calculated for each atmospheric condition the modified-lambert-beer parameter while MAGIC uses precalculated look-up tables.

The irradiance on a tilted plane has to be calculated using an additional

model. Different models exist for broadband irradiance using direct and diffuse irradiance on a horizontal surface. In this theses the use of Klucher-method for spectrally resolved irradiance is analysed.

Studies have been performed to investigate possible improvements of the existing SOLIS method. On the basis of radiative transfer calculations a new spectral cloud correction is suggested. Additionally, the parametrization of the direct irradiance depending on cloudiness seems to be insufficient for spectrally resolved irradiance. Spectrally resolved radiances were calculated using libRadtran to investigate the circumsolar irradiance sensed by a pyrheliometer.

These radiances have a high angular resolution and are used additionally to evaluate the Klucher-method. They have been integrated over a tilted surface and compared to the spectrally resolved irradiance calculated with Klucher. Overall the Klucher-method performs well. At clear skies an overestimation of the diffuse light was found with a shift of the spectrum to shorter wavelength. Spectrally resolved irradiance on a tilted surface can be calculated if the direct and diffuse irradiance are provided with a correct spectral distribution.

Germany's National Meteorological Service developed MAGIC for the retrieval of broadband surface irradiance. In cooperation with Germany's National Meteorological Service this method was extended to spectrally resolved irradiance contributed within this theses. The look-up tables were calculated and fit parameter to account for the influence of ozone and water vapor were found.

Spectrally resolved irradiance derived from both methods, MAGIC and SOLIS, were evaluated with ground measurements at three sites - Oldenburg, Stuttgart and Loughborough. Therefore different datasets to describe the atmospheric composition were analysed. In Oldenburg a measurement setup was realized in cooperation with Jan Kühnert to measure simultaneously the spectral irradiance and the performance of different photovoltaic modules. In Loughborough and Stuttgart the spectrally resolved irradiance was measured on a tilted plane. Thus the Klucher-method was also evaluated using ground measurements. There is overall a good agreement between calculated and measured spectral irradiance. The input datasets have a great impact. Weaknesses of SOLIS found within the sensitivity studies were also found within this evaluation.

Measured and calculated spectra were used to calculate the spectral mismatch of different photovoltaic materials. Tendencies found in the ground measurements were reproduced with SOLIS. The spectral distribution of the irradiance at cloudy skies can cause a surplus of about 20% compared to ASTM standard spectrum. The spectral mismatch factor derived from short circuit measurements shows the same tendency. A quantitative comparison

is difficult due to overlapping effects as reflection losses, temperature effects or uncertainties of the data sheet specifications.

Extreme values of the spectral mismatch factor were found for situations with low irradiance caused by clouds or low sun elevations. For the yield estimate these situations are less important. The overall spectral effect was evaluated using the weighted irradiance. From this a surplus, compared to an estimate using a constant spectrum, of 5% for amorphous silicon and for 2% for polycrystalline silicon was found.

Kapitel 1

Einleitung

Die gelieferte Leistung aus Photovoltaikanlagen hängt primär von der vorhandenen Einstrahlung ab und unterliegt somit den starken Schwankungen der angebotenen Solarstrahlung. Zur Bewertung des Leistungsverhaltens von Photovoltaikanlagen sowohl zur Planung neuer als auch zur Überwachung laufender Systeme ist die Information über die vorherrschende Einstrahlung entscheidend. Neben der Gesamteinstrahlung variiert die spektrale Verteilung der Einstrahlung stark durch verschiedene Sonnenzenithwinkel und Bewölkungsgrade sowie unterschiedliche Konzentrationen der atmosphärischen Bestandteile, wie Aerosole und Wasserdampf. Neben kristallinem Silizium werden mittlerweile verschiedene Halbleiter-Materialien (wie z.B. amorphes Silizium - a-Si, Cadmium-Tellurid - CdTe oder Chalkopyrite wie CIS) verwendet, jedes davon mit einem anderen Bandabstand und somit einer anderen spektralen Empfindlichkeit. Die verschiedenen Solarzellen nutzen also unterschiedliche spektrale Bereiche der Einstrahlung zur Energieerzeugung und reagieren auf Veränderung der spektralen Verteilung unterschiedlich stark, je nach verwendetem Material. Amorphes Silizium nutzt z.B. nur einen sehr schmalen Spektralbereich der Sonneneinstrahlung zur Energieumwandlung und ist daher sehr empfindlich gegenüber Veränderungen der spektralen Verteilung, CIS hingegen deckt einen wesentlich breiteren Bereich ab und reagiert daher weniger empfindlich auf Variationen des Sonnenspektrums.

Die Modulparameter dieser verschiedenen Solarzellen werden unter Standard-Test-Bedingungen (STC) mit dem AM1.5-Standardspektrum bestimmt [IEC, 2008],[ASTM, 2003]. Da im Betrieb die spektrale Verteilung der Einstrahlung selten dem Standardspektrum entspricht, ist es zur Berechnung des zu erwartenden Ertrags einer Anlage wichtig, die genaue spektrale Zusammensetzung der Einstrahlung zu kennen. Wie stark das Spektrum an einem bestimmten Ort, zu einer bestimmten Zeit oder im Jahresmittel

vom Standardspektrum abweicht und wie sehr sich das jeweilig verwendete Photovoltaik-System dadurch von seinen STC-Parametern entfernt, lässt sich nur bestimmen, wenn die spektrale Empfindlichkeit der verwendeten Module bekannt ist und die spektrale Einstrahlung entweder vor Ort gemessen oder modelliert wird.

Die spektrale Empfindlichkeit kann auch innerhalb eines bestimmten Materials, durch z.B. unterschiedliche Herstellungsprozesse variieren. So kann man zwar den Spektralbereich angeben, in dem ein bestimmtes Material empfindlich ist, die genaue absolute spektrale Empfindlichkeit von einem speziellen Modul ist aber häufig nicht bekannt. Hinzu kommen andere Einflussgrößen, wie z.B. Reflexionsverluste, die abhängig vom Einfallswinkel der Einstrahlung sind und ebenfalls mit der betrachteten Wellenlänge variieren.

In der Literatur findet man verschiedene Ansätze, den Einfluss der variierenden spektralen Verteilung der Solarstrahlung auf verschiedene Solarzellentypen zu bestimmen. Häufig werden Messungen der Modulparameter verschiedener Technologien verglichen und deren Abhängigkeit von Sonnenstand bzw. der relativen Weglänge der Strahlung durch die Atmosphäre, der Airmass (AM), und dem Bewölkungsgrad untersucht und in entsprechenden Korrekturfaktoren parametrisiert [Huld et al., 2009], z.T. mit gleichzeitiger Messung der spektral aufgelösten Einstrahlung [Minemoto et al., 2009],[Simon and Meyer, 2011],[Kenny et al., 2004]. Ein anderer Ansatz ist, die Spektren zu messen und daraus theoretisch z.B. den Kurzschlussstrom I_{sc} oder die Leistung P_{mpp} herzuleiten [Houshyani Hassanzadeh et al., 2007],[King et al., 1997],[Perez-Lopez et al., 2007]. Der absolute Einfluss der spektralen Einstrahlung auf den Kurzschlussstrom oder die gelieferte Leistung variiert dabei stark in den einzelnen Publikationen. Einig sind sich die meisten Autoren darüber, dass sich die spektrale Verteilung in der Realität von dem Standardspektrum insofern unterscheidet, dass die meisten Solarzellen eine höhere Leistung als erwartet liefern. Hierbei ist a-Si die Technologie, die an den vielen verschiedenen Orten auf der Welt, an denen diese Vergleiche angestellt wurden, häufig den höchsten Ertragsgewinn aufweist. CdTe weist einen etwas geringeren Gewinn und polykristallines Silizium (pc-Si) und mikrokristallines Silizium (μ -Si) den geringsten [Kenny et al., 2004],[Houshyani Hassanzadeh et al., 2007] auf.

Es werden verschiedene Parameter publiziert, die einerseits die spektrale Verteilung der Einstrahlung charakterisieren, wie zum Beispiel die mittlere Energie der Photonen (Average Photon Energy: APE [Betts et al., 2005]) oder andererseits materialspezifisch die spektrale Empfindlichkeit der betrachteten Technologie beinhalten: Die "Useful Fraction" ist der Spektralbereich, der für die betrachtete Solarzelle nutzbar ist [Betts et al., 2005]. Weiterführende Ansätze falten die spektrale Empfindlichkeit mit der spek-

tralen Einstrahlung oder der normierten spektralen Einstrahlung und setzen sie mit dem Kurzschlussstrom bei Standard-Test-Bedingungen ins Verhältnis. Hier wird dann vom "spectral Mismatch Factor" sMMF) ([Behrendt et al., 2010], "Mismatch Factor" (MMF) [Houshyani Hassanzadeh et al., 2007] oder "Spectral Factor" (SF) [Perez-Lopez et al., 2007] gesprochen. Die genauen Definitionen dieser Parameter variieren leicht in den betrachteten Publikationen.

Die Kenntnis der spektralen Verteilung der Einstrahlung kann somit die Simulation des erwarteten Ertrags von Photovoltaikanlagen verbessern. Spektral aufgelöste Einstrahlungsmessungen zur Bestimmung dieses spektralen Effekts sind selten, häufig nur über einen kurzen Zeitraum aufgenommen und meist nicht in der Nähe des Untersuchungsgebietes vorhanden. Zur Planung und Überwachung von Photovoltaikanlagen reichen solche Messungen daher selten aus. Aus Satellitendaten kann die spektrale Einstrahlung für ein Untersuchungsgebiet über einen gewünschten Zeitraum modelliert werden.

Hierzu sind verschiedene Informationen über den Zustand der Atmosphäre auf dem Strahlungsweg der Solarstrahlung nötig. Zum einen muss der Bewölkungsgrad bekannt sein. Sind keine Wolken vorhanden, ist die Einstrahlung vorrangig von der Sonnengeometrie abhängig. Dazu gehört einerseits der im Jahresverlauf variierende Abstand zwischen Sonne und Erde und vor allem der an einem bestimmten Ort von Jahrestag und Tageszeit abhängige Sonnenstand. Diese Variation der Einstrahlung lässt sich mit entsprechenden geometrischen Funktionen genau bestimmen.

Die Atmosphäre besteht zum großen Teil aus den Gasen Stickstoff und Sauerstoff. Ihr Gehalt ist räumlich und zeitlich nahezu konstant. Wichtige variable Bestandteile, bei der Modellierung der spektralen Solarstrahlung sind Aerosole, Wasserdampf und Ozon. Ihre Konzentration in der Atmosphäre zeigt einen starken Jahresgang und sie sind nicht homogen über der Erde verteilt. Die optischen Eigenschaften der Aerosole verändern sich nicht nur in Abhängigkeit von der Konzentration in der Atmosphäre sondern auch sehr stark in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung und der Größenverteilung der Partikel.

Das in dieser Arbeit verwendete Heliosat-Verfahren [Hammer et al., 2003] ermöglicht es, stündlich aufgelöste Zeitreihen der spektralen Global-, Direkt- und Diffusstrahlung zu berechnen. Die vorherrschende Bewölkung wird aus Satellitendaten bestimmt, ihr Einfluss auf das Spektrum mit einer spektralen Wolkenkorrektur einbezogen. Die Einstrahlung bei wolkenlosem Himmel wird spektral aufgelöst mit einem Clearsky-Modell berechnet. In dieser Arbeit werden zwei solcher Modelle verwendet, die auf dem Strahlungstransportmodell libRadtran [Mayer and Kylling, 2005a] basieren: SOLIS-Clearsky [Müller

et al., 2004] und MAGIC [Müller et al., 2012]. Hierbei werden die atmosphärischen Bestandteile aus Klimatologien bestimmt.

Diese Arbeit zielt darauf ab, das bestehende Verfahren hinsichtlich der Berechnung des Einflusses der spektralen Einstrahlung für verschiedene Photovoltaik- (PV) Technologien zu untersuchen. Hierfür wird die Sensitivität der damit berechneten, spektralen Einstrahlung im Vergleich mit Strahlungstransportrechnungen auf Änderungen der atmosphärischen Zusammensetzung analysiert. Neben der Berechnung auf eine horizontale Fläche wird dabei auch die Umrechnung auf die geneigte Modulebene untersucht. Zur Umrechnung bestehen bisher nur Modelle für Breitbandeinstrahlung, nicht für spektral aufgelöste Einstrahlung.

Im Weiteren wird die Qualität der berechneten Einstrahlung anhand von Bodenmessungen (auf eine horizontale und zwei geneigte Flächen) ausgewertet. Dazu wurden die Eingangsparameter im Clearsky-Modell für die atmosphärische Zusammensetzung variiert.

Zunächst werden die theoretischen Grundlagen zur spektralen Empfindlichkeit von verschiedenen Solarzellen im Kapitel 2.1, zum Strahlungstransport in Kapitel 2.2 und zur Modellierung der spektralen Einstrahlung in Kapitel 2.3 vorgestellt. In Kapitel 3 sind die Methoden und Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse dargestellt. Es folgen die verwendeten Datensätze (Kapitel 4) und Methoden zur Validierung der Verfahren (Kapitel 5) mit den entsprechenden Ergebnissen in Kapitel 6, aufgeteilt nach den verwendeten Modellen: SOLIS-Clearsky in 6.1 und MAGIC in 6.2.

Kapitel 2

Grundlagen

2.1 Spektrale Empfindlichkeit von Dünnschicht-Solarzellen

Die gelieferte Leistung von Solarmodulen hängt hauptsächlich von der Einstrahlung ab. Zusätzlich variiert sie mit der Modultemperatur. Im Betrieb ändert sich neben der Gesamteinstrahlung und der Modultemperatur auch die spektrale Verteilung der Solarstrahlung, wodurch sich der Kurzschlussstrom und dadurch auch der Betriebswirkungsgrad verändert. Diese Änderung ist abhängig vom verwendeten Material. Dünnschicht-Solarzellen aus z.B. amorphem Silizium (a-Si), Cadmiumtellurid (CdTe) und Galliumarsenid (GaAs) besitzen einen höheren Bandabstand als kristallines Silizium. Dadurch wird ein kleinerer Teil der eintreffenden Solarstrahlung zur Ladungsträgertrennung im Material genutzt, da Photonen mit längeren Wellenlängen nicht ausreichend Energie besitzen, um Elektronen in das Leitungsband anzuheben. Eine Veränderung der spektralen Zusammensetzung der Einstrahlung führt also zu einer Veränderung der generierten Elektronenzahl.

Um einen größeren Bereich des solaren Spektrums zur Energieerzeugung nutzen zu können werden mehrschichtige Solarzellen entwickelt, die meist aus zwei oder drei in Reihe geschalteten Schichten unterschiedlichen Materials bestehen. Jede Schicht absorbiert dabei einen anderen Bereich der Einstrahlung. Die der Sonne zugewandte Schicht nutzt Photonen mit hoher Energie, die spektralen Bereiche mit geringerer Energie werden in die nächste Schicht transmittiert, die typischerweise einen geringeren Bandabstand besitzt. Durch die Reihenschaltung wird die Gesamtleistung durch die Schicht, die den geringsten Strom liefert, begrenzt. Dadurch zeigen insbesondere diese Solarzellen einen starken spektralen Effekt.

Abbildung 2.1 vergleicht die spektralen Empfindlichkeitskurven von amor-

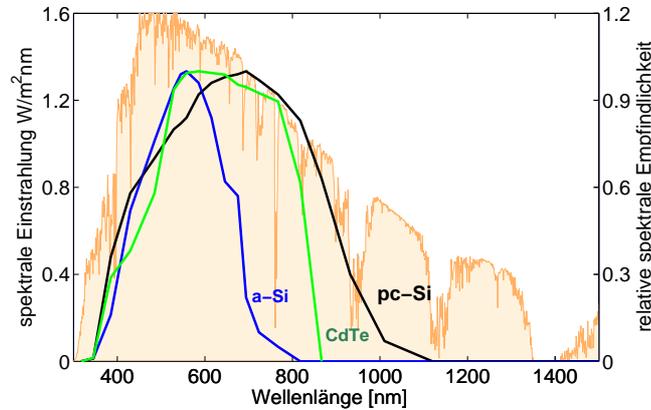


Abbildung 2.1: Spektrale Empfindlichkeitskurven von amorphem Silizium (a-Si)[Wilson and Hennes, 1989], polykristallinem Silizium (pc-Si)[Field, 1997] und Cadmium-Tellurid (CdTe)[Solar, 2005] verglichen mit dem AM1.5 Standardspektrum.

phem Silizium, polykristallinem Silizium (pc-Si) und Cadmium-Tellurid mit dem AM1.5 Standardspektrum.

Der Wirkungsgrad von Solarzellen wird unter Standard-Test-Bedingungen (STC) festgelegt [IEC, 2008]. Dies beinhaltet eine Gesamteinstrahlung von 1000 Wm^{-2} mit dem AM 1.5 - Standardspektrum und eine Modultemperatur von 25°C . Das Standardspektrum wurde zur Bewertung des Wirkungsgrades von Solarzellen von der American Society for Testing and Materials (ASTM) herausgegeben. Zur Bestimmung des Standardspektrums wurde die spektrale Einstrahlung auf eine 37° geneigte Fläche bei einem Sonnenstand von $48, 19^\circ$ (dies entspricht einer Airmass = 1,5) und festgelegter atmosphärischer Zusammensetzung (Aerosol-optische Dicke von 0,084, Wasserdampfgehalt von 14,2 mm, Ozongehalt von 340 DU) mit dem Modell SMARTS berechnet (<http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/>). Das verwendete extraterrestrische Spektrum und die berechnete, spektrale Direkt- und Globalstrahlung sind in Abb. 2.2 dargestellt.

Zur Bewertung des Einflusses der spektralen Zusammensetzung der Einstrahlung auf die Leistung der Solarzellen werden verschiedene Kriterien verwendet. Ein in dieser Arbeit untersuchtes Maß ist der für das entsprechende Material nutzbare Anteil des Spektrums (UF: useful fraction [Betts et al., 2005]), der sich nach

$$UF = \frac{\int_a^b G(\lambda)d\lambda}{\int_c^d G(\lambda)d\lambda} \quad (2.1)$$

berechnet, wobei $\int_c^d G(\lambda)d\lambda$ den kurzwelligen Spektralbereich der solaren Einstrahlung von 300 bis 3000 nm abdeckt. Die Grenzen der spektralen Emp-

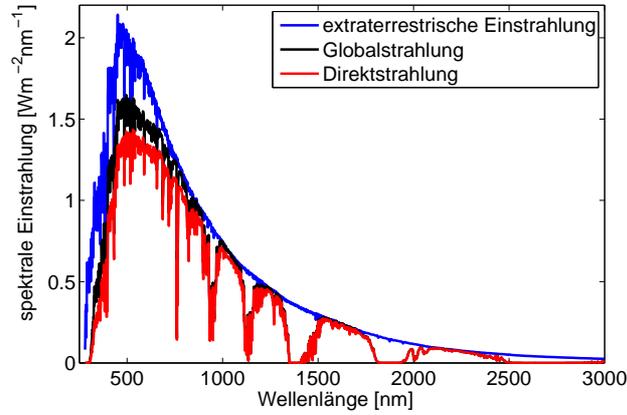


Abbildung 2.2: Standardspektren der extraterrestrischen Einstrahlung, der Global- und Direktstrahlung (ASTM).

findlichkeit der Solarzelle a und b variieren je nach verwendetem Material. So absorbiert z.B. amorphes Silizium im Bereich zwischen 350 und 800 nm, Cadmium-Tellurid zwischen 350 und 900 nm. Der Absorptionsbereich von kristallinem Silizium liegt zwischen 300 und 1100 nm (s. Abb. 2.1). Die UF behandelt allerdings die spektrale Empfindlichkeit als rechteckige Funktion, d.h. dass in dem nutzbaren Spektralbereich alle Wellenlängen gleichermaßen verwendet werden. Dies reicht bei Materialien mit einem sehr schmalen Empfindlichkeitsbereich aus, wird aber umso ungenauer, je breiter die Empfindlichkeitskurve wird. Allerdings wird hier der Effekt der variierenden spektralen Verteilung der Einstrahlung auch geringer.

Wird die spektrale Empfindlichkeit bei der Bewertung des Einflusses der spektralen Einstrahlung auf die Leistung der Solarzelle berücksichtigt, eignet sich die Betrachtung des Kurzschlussstroms. Veränderungen der Einstrahlung G , wie auch Veränderung der spektralen Zusammensetzung, beeinflussen den Kurzschlussstrom I_{SC} des PV-Moduls, in Abhängigkeit von der Modulfläche A und der spektralen Empfindlichkeit SR_{abs} :

$$I_{SC} = A \cdot \int G(\lambda) \cdot SR_{abs}(\lambda) d\lambda. \quad (2.2)$$

Ist die absolute spektrale Empfindlichkeit SR_{abs} nicht bekannt, sondern nur die relative SR_{rel} , lässt sich mit Hilfe einer Proportionalitätskonstante c mit dem Kurzschlussstrom bei Standardtestbedingungen I_{SC}^{STC} (Datenblattangaben)

$$c = \frac{I_{SC}^{STC}}{\int G^{STC}(\lambda) \cdot SR_{rel}(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{G_{BB}^{STC}}{G_{BB}} \quad (2.3)$$

der Kurzschlussstrom in Abhängigkeit von der spektralen Einstrahlung mit

$$I_{SC} = c \cdot \int G(\lambda) \cdot SR_{rel}(\lambda) d\lambda \quad (2.4)$$

berechnen. Die Proportionalitätskonstante beinhaltet somit die Modulfläche und den Wirkungsgrad des Moduls. Hierfür müssen die spektral aufgelösten Einstrahlungen $G(\lambda)$ und $G^{STC}(\lambda)$ mit der jeweiligen Breitbandeinstrahlung G_{BB} und G_{BB}^{STC} normiert werden. Die Abweichung des Kurzschlussstroms von I_{SC}^{STC} wird in [Behrendt et al., 2010] als spektraler Mismatch-Faktor (sMMF) bezeichnet:

$$sMMF = \frac{G_{BB}^{STC}}{G_{BB}} \cdot \frac{I_{SC}}{I_{SC}^{STC}} \quad (2.5)$$

$$sMMF = \frac{G_{BB}^{STC}}{G_{BB}} \cdot \frac{\int G(\lambda) \cdot SR_{rel}(\lambda) d\lambda}{\int G^{STC}(\lambda) \cdot SR_{rel}(\lambda) d\lambda}. \quad (2.6)$$

Dieser ist der Kehrwert des in [IEC, 2007] verwendeten spektralen Mismatch-Faktor (MM) oder dem in [Perez-Lopez et al., 2007] verwendeten Spektral Faktor (SF):

$$sMMF = \frac{1}{MM} = \frac{1}{SF}. \quad (2.7)$$

Bei der Kalibrierung einer Referenzsolarzelle muss die gemessene Bestrahlungsstärke um diesen Faktor (MM bzw. SF) korrigiert werden, um die tatsächliche, äquivalente Bestrahlungsstärke zu bestimmen. Es wird in dieser Arbeit der inverse Fall behandelt: Bei der Betrachtung des tatsächlichen Kurzschlussstroms eines PV-Moduls muss die vorherrschende Einstrahlung mit sMMF gewichtet werden:

$$G_w = G_{BB} \cdot sMMF. \quad (2.8)$$

Im Betrieb ist die Leistung des PV-Moduls im Maximum Power Point P_{MPP} abhängig vom Kurzschlussstrom:

$$P_{MPP} = I_{SC} \cdot U_{OC}(I_{SC}) \cdot FF(I_{SC}), \quad (2.9)$$

mit $U_{OC}(I_{SC})$, der Leerlaufspannung und dem Füllfaktor $FF(I_{SC})$. In erster Annäherung kann die Leerlaufspannung U_{OC} als unabhängig von der vorherrschenden Einstrahlung und somit die gewichtete Einstrahlung G_w als erste Näherung für die gelieferte Leistung aus dem PV-Modul betrachtet werden.

Um die spektrale Verteilung der Einstrahlung unabhängig von der verwendeten Photovoltaik-Technologie zu charakterisieren, eignet sich die Betrachtung der mittleren Energie der Photonen - APE [Betts, 2004]:

$$APE = \frac{\int_a^b G(\lambda) d\lambda}{q_e \int_a^b \Phi(\lambda) d\lambda}. \quad (2.10)$$

mit $q_e =$ Elementarladung $\Phi =$ Strahlungsflussdichte

Verschiebt sich das Spektrum zu größeren Wellenlängen, sinkt die mittlere Photonenenergie. Steigt der Anteil kurzwelliger Einstrahlung, steigt auch die APE. [Betts, 2004] zeigt anhand des Standardspektrums die Abhängigkeit der mittleren Photonenenergie von den Integrationsgrenzen a und b (s. Tab. 2.1).

Tabelle 2.1: Mittlere Photonenenergie des Standardspektrums bei unterschiedlichen Integrationsgrenzen [Betts, 2004]

| Wellenlängenbereich | APE [eV] |
|---------------------|----------|
| 300-4000 nm | 1,43 |
| 300-2500 nm | 1,48 |
| 300-1700 nm | 1,62 |
| 300-1100 nm | 1,86 |

2.2 Strahlungstransport in der Atmosphäre

Die Solarstrahlung und deren spektrale Zusammensetzung an der Erdoberfläche wird einerseits durch das Emissionsverhalten der Sonne beeinflusst (extraterrestrisches Spektrum), andererseits wird sie beim Durchgang durch die Atmosphäre durch verschiedene Prozesse entsprechend der Zusammensetzung der Atmosphäre verändert.

Die von der Sonne kommende Strahlung wird an Gasen, Aerosolen, d.h. flüssige und feste Partikel, und Wolken absorbiert oder in andere Richtungen gestreut, entsprechend der chemischen und physikalischen Eigenschaften der Bestandteile. Die direkt aus Richtung der Sonne auf die Erdoberfläche eintreffende Solarstrahlung wird als Direktstrahlung bezeichnet. In der Atmosphäre und am Boden gestreute Strahlung, die aus den anderen Richtungen eintrifft, nennt man Diffusstrahlung. Die aus allen Himmelsrichtungen auf den Boden treffende Globalstrahlung lässt sich also in ihren Direkt- und ihren Diffusanteil aufteilen.

Die Veränderung der Strahldichte L aus einem Raumwinkel aufgrund der atmosphärischen Extinktionsprozesse (Streuung und Absorption) auf einem Wegstück ds wird mit der Strahlungstransportgleichung beschrieben:

$$\frac{dL(\lambda)}{ds} = -\kappa(\lambda)(L(\lambda) - Q(\lambda)), \quad (2.11)$$

wobei der Extinktionskoeffizient κ alle Absorptions- und Streuprozesse zusammenfasst. Der Quellterm Q beinhaltet Eigenemissionen der wechselwirkenden Materie und Einstreuung aus anderen Raumrichtungen.

Die Extinktion der Einstrahlung, der erste Term der Strahlungstransportgleichung $-\kappa L ds$, integriert über den ganzen Strahlungsweg durch die Atmosphäre wird gemäß des Lambert-Beer-Gesetzes (2.12) durch die optische Dicke $\tau(\lambda)$ beschrieben:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot e^{-\tau(\lambda)} \quad (2.12)$$

mit $I(\lambda)$: Einstrahlung am Boden

$I_0(\lambda)$: extraterrestrische Einstrahlung

$\tau(\lambda)$: optische Dicke.

Die Streuung der Strahlung bei Wechselwirkung mit den atmosphärischen Inhaltstoffen hängt sehr stark von dem Verhältnis der Wellenlänge zur Größe

der Teilchen ab. Bei sehr kleinen Luftmolekülen (Stickstoff, Sauerstoff, Edelgase, Spurengase) kann das Streuverhalten aus den Maxwell-Gleichungen hergeleitet werden und durch die Rayleigh-Streuung beschrieben werden. Die auftreffende Strahlung wird in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung gleichermaßen, senkrecht zur Einstrahlungsrichtung jedoch weniger stark, gestreut. Der Streuquerschnitt ist dabei sehr stark von der Wellenlänge abhängig, kürzere Wellenlängen werden effektiver gestreut als längere.

Für im Vergleich zur Wellenlänge große Partikel, wie Aerosole und Wolkentropfen, liefert die Mie-Theorie über eine Näherung der Maxwell-Gleichungen eine Beschreibung der Streuung. Sie streuen bevorzugt in Vorwärtsrichtung mit einer wesentlich geringeren Abhängigkeit von der Wellenlänge. Die Betonung der Vorwärtsrichtung wird umso stärker, je größer das streuende Partikel ist. Die Phasenfunktion beschreibt die Richtungsverteilung der Streustrahlung und ist abhängig von der Partikelgröße.

Das Streuverhalten in der Mie-Theorie kann durch die Henyey-Greenstein-Funktion approximiert werden:

$$p(\Theta) = \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \Theta)}. \quad (2.13)$$

Die Wahrscheinlichkeit $p(\Theta)$, dass die eintreffende Strahlung um einen Winkel Θ gestreut wird, wird dabei mit Hilfe des Asymmetriefaktors g beschrieben. Liegt ausschließlich Vorwärtsstreuung vor, ist $g = 1$, bei isotroper Streuung wird $g = 0$.

Das Streuverhalten sehr großer Partikel, wie große Wolkentropfen, wird durch die geometrische Optik beschrieben.

Die Wellenlängenabhängigkeit der Streuung wird mit dem Angströmparameter α , der mit der Größenverteilung korreliert, beschrieben. Er gibt die spektrale Abhängigkeit der optischen Dicke in einem betrachteten Wellenlängenbereich an:

$$\tau(\lambda) = \beta \cdot \lambda^{-\alpha}. \quad (2.14)$$

Diese ist bei der Rayleigh-Streuung proportional zu λ^{-4} , bei Aerosolen mittlerer Größe typischerweise $\sim \lambda^{-1.3}$, bei Wüstenstaub (große Partikel) $\sim \lambda^{-0.05}$ und maximal $\sim \lambda^{-2}$ bei frischem Rauch (kleine Partikel). Angströms Trübungskoeffizient β entspricht der optische Dicke bei $\lambda = 1 \mu\text{m}$.

Die Absorption der atmosphärischen Gase findet in stoffspezifischen Banden statt. Im Bereich unter 2000 nm wird die Absorption der solaren Einstrahlung in der Atmosphäre vor allem durch Sauerstoff (O_2), Ozon (O_3) und Wasserdampf (H_2O) bestimmt. Ozon absorbiert vorrangig Strahlung mit

Wellenlängen, die kleiner als $0,35 \mu\text{m}$ sind, in den sogenannten Hartly- und Huggins-Banden. Weitere Absorptionsbanden, die Chappuis-Banden, liegen im sichtbaren Spektralbereich zwischen $0,45 \mu\text{m}$ und $0,75 \mu\text{m}$. Wasserdampf zeigt einige starke Absorptionsbanden, die hauptsächlich im Infrarot-Bereich liegen. Der Absorptionsquerschnitt bei einer bestimmten Wellenlänge hängt neben der Partikelzahl vom Druck und der Temperatur ab.

Die Absorption der Aerosole ist, da es sich um einen stoffspezifischen Prozess handelt, von der chemischen Zusammensetzung abhängig. Insgesamt wird die Strahlung durch Aerosole zu einem wesentlich größeren Teil gestreut und nur zu einem sehr kleinen Teil absorbiert. Das Verhältnis von Streuung zur Extinktion bei Aerosolen wird Einfachstreueralbedo (Single Scattering Albedo, SSA) genannt.

Zur Bestimmung der spektralen Einstrahlung am Boden ist die Kenntnis über die Zusammensetzung der Atmosphäre entscheidend. Der Anteil an Stickstoff, Sauerstoff und Edelgasen in der Atmosphäre ist räumlich und zeitlich konstant. Die für die Extinktion der Solarstrahlung, vor allem durch ihre Absorptionseigenschaften, relevanten Spurengase wie Wasserdampf und Ozon, sind inhomogen verteilt und unterliegen zum Teil starken zeitlichen Schwankungen. Auch Wolken und Aerosole zeigen eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität. Zur Bestimmung der optischen Eigenschaften der Wolken und Aerosole sind Kenntnisse über die Konzentration (Flüssig- oder Eiswaergehalt, bzw. Partikelzahl) und die Größenverteilung der Partikel notwendig. Im Fall der Eiswolken benötigt man zusätzlich Informationen über die Form der Kristalle und im Fall der Aerosole über die chemische Zusammensetzung.

2.3 Verfahren zur Bestimmung der spektralen Einstrahlung

2.3.1 Überblick

Zur Berechnung der spektralen Einstrahlung werden Informationen über die Sonnengeometrie sowie über die vorherrschende Bewölkung und die sonstige Zusammensetzung der Atmosphäre benötigt. In den verwendeten Verfahren wird die Bewölkungsinformation mit der Heliosat-Methode aus Satellitendaten ermittelt und über den Clearsky-Index mit der berechneten Einstrahlung bei wolkenlosem Himmel aus einem Clearsky-Modell kombiniert (s. Abb. 2.3). Das Clearsky-Modell enthält die Abhängigkeit der Einstrahlung von der Sonnengeometrie und der atmosphärischen Zusammensetzung. Hier werden zwei Modelle verwendet, die die Einstrahlung bei wolkenlosem Himmel spektral aufgelöst liefern: das in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD) entwickelte MAGIC-Verfahren und das an der Universität Oldenburg entwickelte Modell SOLIS-Clearsky. Bei beiden Methoden wird der Tagesgang der Einstrahlung über die Modified-Lambert-Beer-Relation (MLB) [Müller et al., 2004],[Müller et al., 2012] approximiert. Der Einfluss der atmosphärischen Parameter, wie Aerosolgehalt und Zusammensetzung, Wasserdampf- und Ozongehalt, wird durch Strahlungstransportrechnungen mit libRadtran [Mayer and Kylling, 2005a] ermittelt. In SOLIS-Clearsky wird der Strahlungstransport und die MLB-Parametrisierung jeweils neu berechnet, wobei für MAGIC die MLB-Parameter für verschiedene Atmosphärenzustände berechnet und anschließend in Look-up Tabellen gespeichert wurden, die ausgelesen und interpoliert werden. In Kapitel 2.3.2 werden das den beiden Clearsky-Modellen zugrunde liegende Strahlungstransportmodell libRadtran, sowie die Modelle SOLIS-Clearsky und MAGIC beschrieben. Die Beschreibung der Heliosat-Methode folgt in Kapitel 2.3.3.

In Kapitel 2.3.4 werden die zwei in dieser Arbeit verwendeten Ansätze zur Berechnung der Einstrahlung auf die geneigte Fläche vorgestellt.

2.3.2 Clear-Sky Modelle

libRadtran

Das Softwarepaket zur Strahlungstransportrechnung libRadtran enthält verschiedene Programme zur Berechnung der solaren Einstrahlung und der thermischen Abstrahlung der Erde [Mayer and Kylling, 2005a]. Kernstück ist das Strahlungstransportmodell uvspec, welches unterschiedliche Verfahren mit unterschiedlich hohem Approximationsgrad zur Lösung der Strahlungs-

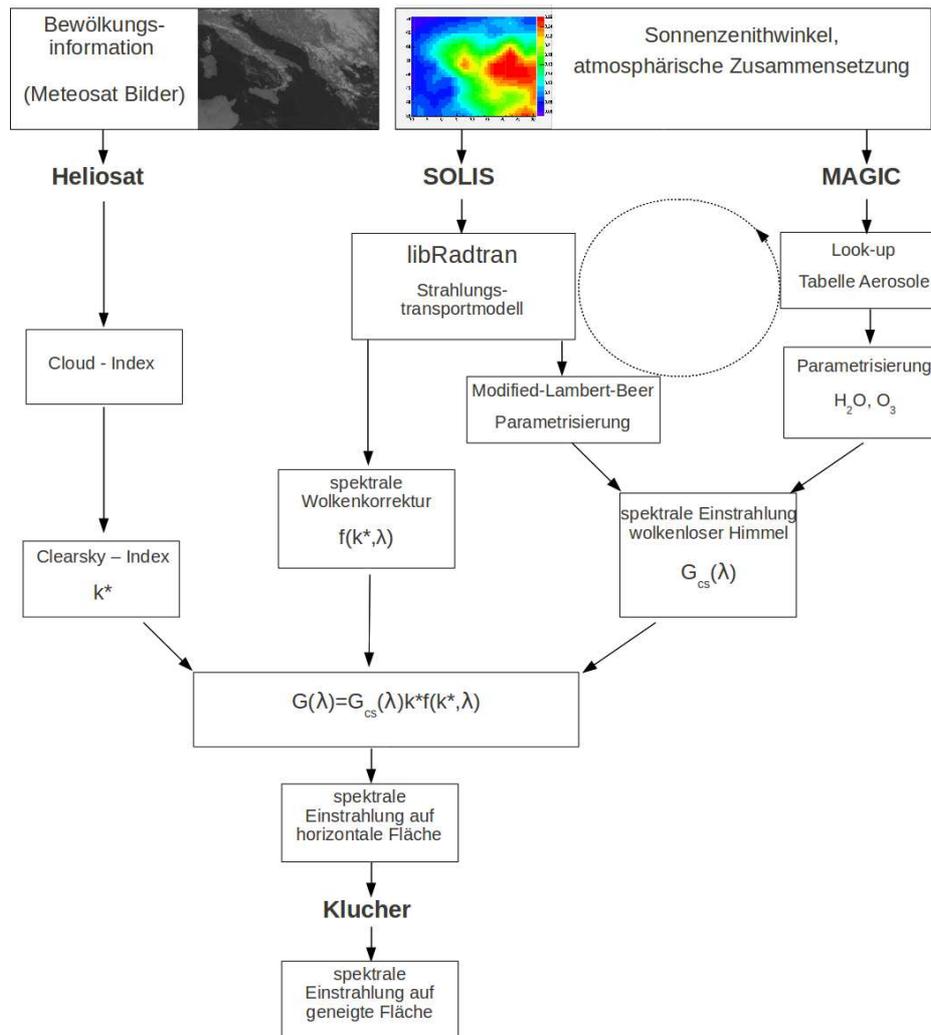


Abbildung 2.3: Übersicht über die verwendeten Schritte zur Berechnung der spektralen Einstrahlung mit der Heliosat-Methode in Kombination mit dem SOLIS- bzw. MAGIC-Clearsky-Modell.

transportgleichung anbietet. In Abbildung 2.4 ist die Struktur von uvspec skizziert.

Die Lösung der Strahlungstransportgleichung setzt eine möglichst genaue Beschreibung der Atmosphäre voraus. Diese umfasst die Bestandteile der Atmosphäre (Spurengase, Ozon, Wasserdampf, Aerosole, Eis- und Wasserwolken), sowie die Temperatur und Druckverhältnisse. Da diese Eigenschaften der Atmosphäre nicht homogen verteilt sind, wird häufig eine „planparallele Atmosphäre“ angenommen, d.h. dass eine begrenzte Anzahl an homogenen Schichten parallel übereinander liegen. Bei hohem Sonnenzenithwinkel, d.h. niedrigen Sonnenständen, führt dies zu größeren Ungenauigkeiten. Diese werden in den verwendeten Lösungsverfahren für die Strahlungstransportgleichung *sdisort* und *spsdisort* durch eine pseudosphärische Korrektur ausgeglichen. Die Direktstrahlung wird dabei unter Berücksichtigung der Erdkrümmung berechnet, und zur Berechnung der Diffusstrahlung wird eine plan-parallele Atmosphäre angenommen.

Die Beschreibung der atmosphärischen Zusammensetzung kann sowohl auf Basis von mikrophysikalischen Eigenschaften als auch auf Basis der entsprechenden optischen Eigenschaften geschehen:

- So können **molekulare Bestandteile** durch die Partikelkonzentration sowie vorherrschenden Druck und Temperatur oder durch die optische Dicke angegeben werden.
- **Wasserwolken** können durch die Größenverteilung der Tropfen, den Wassergehalt und den Brechungsindex von Wasser oder durch Extinktionskoeffizienten (bzw. Wolken-optische Dicke (COD)), Single Scattering Albedo und Phasenfunktion beschrieben werden und
- **Eiswolken** durch Größe und Form der Kristalle, sowie Eiswassergehalt und Brechungsindex von Eis oder ebenso wie die Wasserwolken durch Extinktionskoeffizienten, Single Scattering Albedo und Phasenfunktion.
- **Aerosole** können über Brechungsindex und Größenverteilung oder wie Wolken durch Extinktionskoeffizienten (z.B. durch die optische Dicke bei 550 nm und den Angströmkoefizienten), Einfachstreueralbedo und Phasenfunktion (bzw. Asymmetriefaktor g) beschrieben werden. Alternativ können die Aerosole durch sogenannte „Shettle-Typen“ charakterisiert werden, die typische optische Eigenschaften von ländlichen, städtischen oder maritimen Aerosolen zusammenfassen [Shettle, 1989].

Die physikalischen Eigenschaften wie Temperatur, Druck und Partikelkonzentration, werden im nächsten Schritt in wellenlängenabhängige Extink-

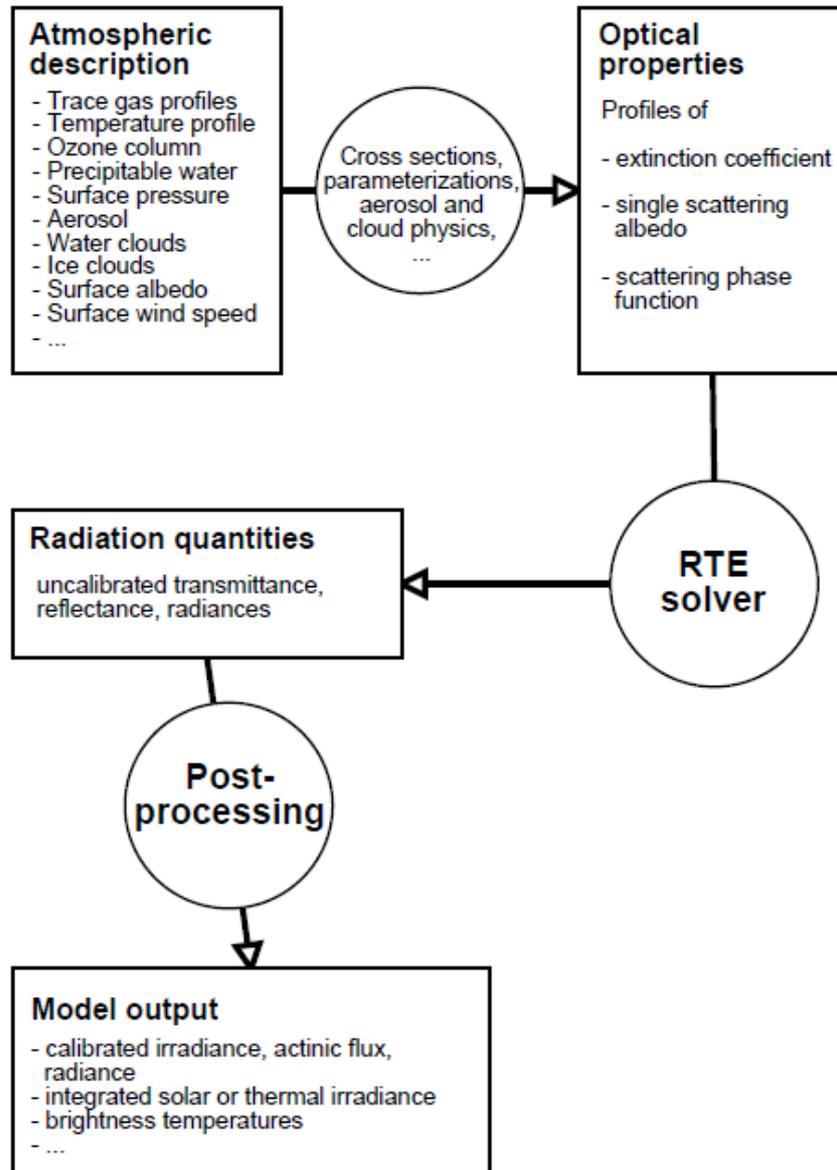


Abbildung 2.4: Struktur des Strahlungstransportmodells uvspec [Mayer and Kylling, 2005a]

tionsquerschnitte überführt (s. Abb. 2.4). Die Bestimmung der Streuquerschnitte erfolgt durch Anwendung der Rayleigh- und Mie-Theorie (bzw. geometrische Optik bei sehr großen Partikeln). Absorptionsquerschnitte sind in unterschiedlicher Wellenlängenauflösung in Look-up-Tabellen hinterlegt. Für die in dieser Arbeit verwendete correlated-k Methode sind für die 32 spektralen Bänder im Bereich zwischen 250 nm und 4600 nm (den sogenannten Kato-Bändern) in den entsprechenden Tabellen die Absorptionsquerschnitte in Abhängigkeit von Druck und Temperatur, sowie im Fall des Wasserdampfs Partikelkonzentration, hinterlegt. Die Bänder (s. Tabelle 2.2) unterschiedlicher Breite sind so festgelegt, dass in dem entsprechenden Wellenlängenintervall das extraterrestrische Spektrum annähernd konstant ist [Kato et al., 1999], dass die Absorptionsbanden von Wasserstoff, Kohlendioxid, molekularem Sauerstoff und Ozon jeweils in einem Wellenlängenintervall liegen und dass sich im sichtbaren Spektralbereich der Absorptionsquerschnitt des Ozons innerhalb eines Bands linear verhält.

Aus dem Extinktionsquerschnitt wird der Extinktionskoeffizient bestimmt, der zusammen mit der Einfachstreueralbedo und der Phasenfunktion in die Strahlungstransportgleichung eingesetzt wird. Diese wird wellenlängen- und richtungsabhängig gelöst, je nach gewünschter Optimierung von Rechenzeit und Genauigkeit mit entsprechend großer Approximation. LibRadtran bietet vier verschiedene Optionen für die wellenlängenabhängige Berechnung des Strahlungstransports, in dieser Arbeit wurde die am wenigsten aufgelöste correlated-k Methode verwendet. Die Richtungsauflösung in libRadtran reicht von dem sogenannten Two-Stream-Verfahren, in dem nur aufwärts- und abwärtsgerichtet gerechnet wird, über die Diskrete-Ordinaten-Methode, in dem vom Nutzer die Anzahl der verwendeten Ordinaten festgelegt wird, bis zum dreidimensionalen MYSTIC-Code.

Tabelle 2.2: Wellenlängenbänder der correlated-k-Methode - Werte in [nm]

| mittlere Wellenlänge | Anfangs- wellenlänge | End- wellenlänge | Breite |
|-------------------------|-------------------------|---------------------|--------|
| 256,30 | 240,12 | 272,48 | 32,36 |
| 277,95 | 272,48 | 283,41 | 10,93 |
| 295,13 | 283,41 | 306,84 | 23,43 |
| 317,31 | 306,84 | 327,77 | 20,93 |
| 345,14 | 327,77 | 362,50 | 34,73 |
| 385,00 | 362,50 | 407,50 | 45,00 |
| 429,77 | 407,50 | 452,05 | 44,55 |
| 484,86 | 452,05 | 517,68 | 65,63 |
| 528,84 | 517,68 | 540,00 | 22,32 |
| 544,80 | 540,00 | 549,50 | 9,50 |
| 558,05 | 549,50 | 566,60 | 17,10 |
| 585,80 | 566,60 | 605,00 | 38,40 |
| 615,00 | 605,00 | 625,00 | 20,00 |
| 645,85 | 625,00 | 666,70 | 41,70 |
| 675,44 | 666,70 | 684,18 | 17,48 |
| 694,31 | 684,18 | 704,45 | 20,27 |
| 723,53 | 704,45 | 742,61 | 38,17 |
| 767,05 | 742,61 | 791,48 | 48,86 |
| 817,97 | 791,48 | 844,46 | 52,98 |
| 866,71 | 844,46 | 888,97 | 44,51 |
| 931,94 | 888,97 | 974,91 | 85,94 |
| 1010,32 | 974,91 | 1045,74 | 70,84 |
| 1119,97 | 1045,74 | 1194,19 | 148,44 |
| 1355,06 | 1194,19 | 1515,94 | 321,75 |
| 1564,70 | 1515,94 | 1613,45 | 97,51 |
| 1789,12 | 1613,45 | 1964,80 | 351,35 |
| 2059,13 | 1964,80 | 2153,46 | 188,67 |
| 2214,33 | 2153,46 | 2275,19 | 121,73 |
| 2638,54 | 2275,19 | 3001,89 | 726,70 |
| 3318,66 | 3001,89 | 3635,42 | 633,52 |
| 3813,21 | 3635,42 | 3991,00 | 355,59 |
| 4298,32 | 3991,00 | 4605,65 | 614,65 |

SOLIS-ClearSky

Die spektrale Einstrahlung bei wolkenlosem Himmel $I_{cs}(\lambda)$ hängt von der atmosphärischen Zusammensetzung und den optischen Eigenschaften der atmosphärischen Bestandteile sowie der Weglänge durch die Atmosphäre ab. Das Programm SOLIS-ClearSky berechnet die Einstrahlung bei wolkenlosem Himmel mit Hilfe des Strahlungstransportmodells libRadtran. Um die Rechenzeit zu verringern, wird der Tagesgang, d.h. die Abhängigkeit der Einstrahlung von der Wegstrecke durch die Atmosphäre, über die Modified-Lambert-Beer-Beziehung (MLB) parametrisiert. Sie ergibt sich aus dem Lambert-Beer-Gesetz (Gl. 2.12), welches für einen Sonnenzenithwinkel von 0° die Direktstrahlung am Erdboden I_{dir} bei einer optischen Dicke der Atmosphäre τ mit I_0 , der extraterrestrischen Einstrahlung, bestimmt. Bei variierendem Sonnenzenithwinkel Θ_z verändert sich die Wegstrecke durch die Atmosphäre, wodurch die Extinktionsprozesse proportional zu $\cos(\Theta_z)$ zunehmen:

$$I_{dir}(\Theta_z, \lambda) = I_0 \cdot e^{\frac{\tau(\lambda)}{\cos \Theta_z}} \cdot \cos(\Theta_z). \quad (2.15)$$

Da diese Prozesse alle wellenlängenabhängig sind, ist der Quotient $\frac{\tau(\lambda)}{\cos \Theta_z}$ nicht konstant über alle Wellenlängen. Die Gleichung 2.15 gilt so nur für monochromatische Berechnungen. Für die Berechnung mit spektralen Bändern ($\Lambda = [\lambda_1, \lambda_2]$) wie den Katobändern wird die Veränderung mit der Wellenlänge in der Modified-Lambert-Beer-Parametrisierung durch die optische Dicke $\tau_0(\Lambda)$ und dem Korrekturparameter $\alpha(\Lambda)$ angepasst:

$$I_{dir}(\Theta_z, \Lambda) = I_0(\Lambda) \cdot e^{\frac{\tau_0(\Lambda)}{\cos^{\alpha(\Lambda)} \Theta_z}} \cdot \cos(\Theta_z). \quad (2.16)$$

$\tau_0(\Lambda)$ wird durch eine Strahlungstransportrechnung bei einem Sonnenzenithwinkel von 0° bestimmt, $\alpha(\Lambda)$ bei einer weiteren Strahlungstransportrechnung mit einem Sonnenzenithwinkel von 60° . Das Lambert-Beer-Gesetz gilt in dieser Form nur für die Direktstrahlung. In [Müller et al., 2004] wird gezeigt, dass sich diese Beziehung mit guter Genauigkeit auch auf die Globalstrahlung I_{glob} (und Diffusstrahlung I_{diff}) übertragen lässt, wenn I_0 durch $I_{0,enh}$ ersetzt wird:

$$I_{0,enh}(\Lambda) = \left(1 + I_0(\Lambda) \frac{I_{diff}(\Lambda)}{I_{glob}(\Lambda) \cdot I_{dir}(\Lambda)} \right) I_0(\Lambda), \quad (2.17)$$

so dass sich Direkt- und Globalstrahlung wie folgt berechnen lassen:

$$I_{dir}(\Theta_z, \Lambda) = I_{0,enh}(\Lambda) \cdot e^{\frac{\tau_{0,dir}(\Lambda)}{\cos^{\alpha_{dir}(\Lambda)} \Theta_z}} \cdot \cos(\Theta_z)$$

$$I_{glob}(\Theta_z, \Lambda) = I_{0,enh}(\Lambda) \cdot e^{\frac{\tau_{0,glob}(\Lambda)}{\cos^{\alpha_{glob}(\Lambda)} \Theta_z}} \cdot \cos(\Theta_z). \quad (2.18)$$

$$(2.19)$$

Als Input für die Strahlungstransportrechnung wird in SOLIS der Wasserdampfgehalt und die Aerosol-optische Dicke aus Klimatologien mit Monatsmittelwerten bestimmt, zur weiteren Beschreibung der Aerosole werden die Shettle-Typen verwendet. Die spektrale Auflösung der berechneten Einstrahlung wird durch die in libRadtran gewählte "correlated-k"-Methode bestimmt. Diese Einstellungen können bei Bedarf je nach vorhandener Information variiert werden.

Berechnung der spektralen Einstrahlung mit MAGIC

Das Verfahren MAGIC ("Mesoscale Atmospheric Global Irradiance Code" [Müller et al., 2012]) liefert spektral aufgelöste Direkt-, Diffus- und Globalstrahlung bei wolkenlosem Himmel für die verschiedenen atmosphärischen Bestandteile unter Verwendung von Look-up Tabellen. Somit wird die Einstrahlung durch Auslesen und Interpolieren der Tabellen, statt durch rechenzeitintensive Strahlungstransportrechnungen ermittelt, die nur einmalig zur Erstellung der Look-up Tabellen (LUTs) verwendet werden müssen.

Die Parameter zur Beschreibung der wolkenlosen Atmosphäre (Aerosol-, Wasserdampf- und Ozongehalt) wurden im Vorfeld auf ihre lineare Unabhängigkeit untersucht, um ihren Einfluss auf die Strahlung jeweils einzeln zu behandeln. Linear unabhängige Parameter, wie die Aerosoleigenschaften (Aerosol-optische Dicke, Einfachstreueralbedo und Asymmetriefaktor g), wurden innerhalb der Basis-LUT berücksichtigt. Die Basis-LUT ist eine dreidimensionale Tabelle, die für 23 Werte der Aerosol-optischen Dicke, drei Einfachstreueralbedo-Werte und zwei Asymmetriefaktor-Werte MLB-Parameter enthält, zwischen denen interpoliert wird. Über die Modified-Lambert-Beer-Beziehung (Gl. 2.19) wird I^b unter Berücksichtigung der vorherrschenden Aerosole aber unabhängig vom Wasserdampf- und Ozongehalt bestimmt. Die weiteren Tabellen für den Einfluss von Wasserdampf und Ozon enthalten entsprechende wellenlängenabhängige Korrekturwerte ΔI_{H_2O} und ΔI_{O_3} , sowie die Parameter a_{H_2O} und a_{O_3} , die wie folgt zur Berechnung eingesetzt werden:

$$I_{H_2O,O_3}^b(\lambda) = I^b(\lambda) + \Delta I_{H_2O}(\lambda) \cdot \cos \Theta_z^{a_{H_2O}(\lambda)} + \Delta I_{O_3}(\lambda) \cdot \cos \Theta_z^{a_{O_3}(\lambda)}. \quad (2.20)$$

Der Einfluss der Bodenalbedo SAL wird mit

$$I(\lambda) = I_{H_2O,O_3}^b(\lambda) \cdot (0.98 + 0.1 \cdot SAL) \quad (2.21)$$

parametrisiert.

Erstellung der Look-up Tabellen

Die Berechnung und Erstellung der Look-up Tabellen für das MAGIC-Verfahren wurde im Rahmen dieser Arbeit in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst durchgeführt. Für variierende Aerosoleigenschaften und festgelegten Wasserdampf- bzw. Ozongehalt (bei einem Wasserdampfgehalt von 15 mm und Ozongehalt von 245 DU), sowie einer festgelegten Bodenalbedo von 0,2 wurde bei zwei Sonnenzenithwinkeln die Einstrahlung berechnet, um daraus die Modified-Lambert-Beer-Parameter zu bestimmen und in der Basis-LUT zu speichern.

Der Einfluss des Wasserdampf- und Ozongehalts wird entsprechend Gl. 2.20 parametrisiert. Die entsprechenden Korrekturwerte ΔI_{H_2O} wurden für 18 Wasserdampfwerte zwischen 0 und 70 mm, bei einem Ozongehalt von 245 DU, einer AOD von 0,2 (Verwendung des ländlichen Shettle Typs) und einer Bodenalbedo von 0,2 bestimmt. Zur Erstellung der Ozon-Tabelle wurden 8 Werte für den Ozongehalt zwischen 200 und 525 DU verwendet um ΔI_{O_3} zu bestimmen.

Die Abbildung 2.5 zeigt einen Vergleich der mit libRadtran berechneten ΔI_{H_2O} - bzw. ΔI_{O_3} -Werte mit dem Fit nach Gl. 2.20 für ausgewählte Katobänder in Abhängigkeit vom Wasserdampf- bzw. Ozongehalt bei verschiedenen Sonnenzenithwinkeln. Insgesamt ergibt sich eine gute Übereinstimmung, bei sehr hohem Sonnenzenithwinkel oder sehr geringem Gehalt an Wasserdampf bzw. Ozon sind deutliche Abweichungen erkennbar.

2.3.3 Die Heliosat-Methode

Das Heliosat-Verfahren wird zur Bestimmung der Globalstrahlung aus Meteosat-Daten genutzt. Die geostationären Meteosat-Satelliten decken im Wesentlichen Europa und Afrika mit einer räumlichen Auflösung von bis zu 1 km x 1 km direkt unterhalb des Satelliten ab. Die zum Satelliten zurückgestreute Solarstrahlung ist im sichtbaren Bereich weitgehend proportional zum Bewölkungsgrad. Dieser wird durch den Cloud-Index n charakterisiert, wodurch sich der Clearsky-Index k^* ableiten lässt, der die Transmission der solaren Strahlung durch die Wolken beschreibt. So lässt sich die Globalstrahlung I_{glob} mit dem Clearsky-Index und $I_{glob,cs}$, der Einstrahlung bei wolkenlosem Himmel, mit

$$I_{glob} = k^* \cdot I_{glob,cs} \quad (2.22)$$

berechnen.

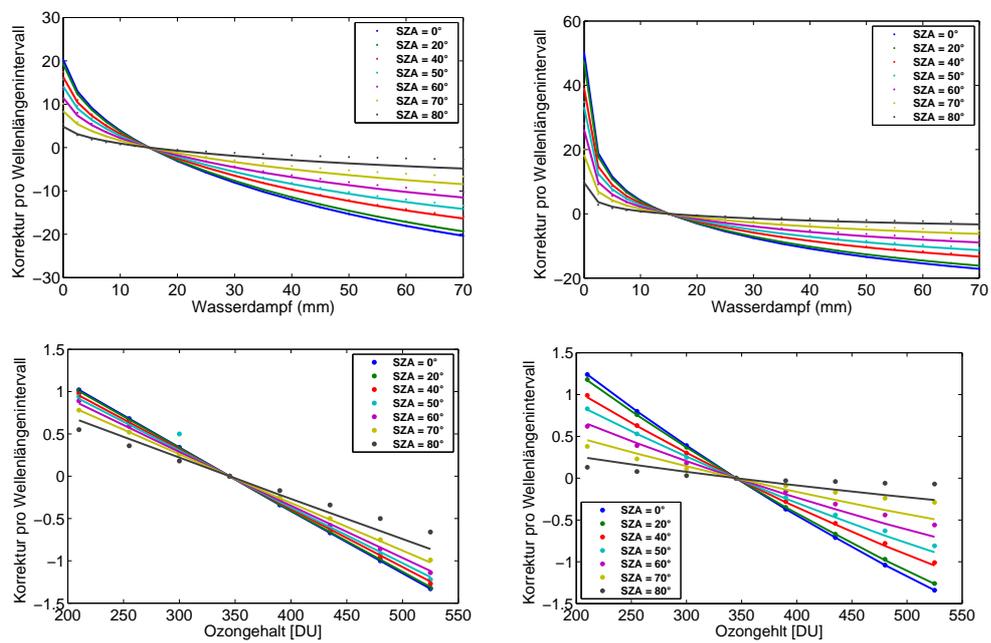


Abbildung 2.5: Wasserdampf-Korrektur (oben) und Ozon-Korrektur (unten) der Globalstrahlung im MAGIC-Verfahren für verschiedene Wellenlängenbereiche (oben links: 932 nm, oben rechts: 1355 nm, unten links: 586 nm, unten rechts: 315 nm) und verschiedene Sonnenzenithwinkel (Punkt: Aus libRadtran-Rechnung, durchgezogen: Parametrisierung nach Gl. 2.20)

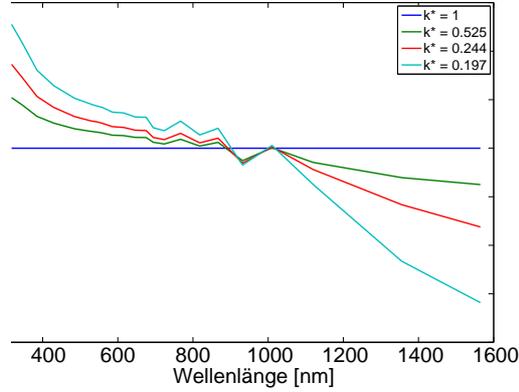


Abbildung 2.6: Spektrale Wolkenkorrektur im SOLIS-Verfahren

Zur Berücksichtigung der wellenlängenabhängigen Transmission der Wolken wird der Clearsky-Index spektral angepasst. Für einige diskrete wolkenoptische Dicken wurden der Clearsky-Index und die wellenlängenabhängige Korrekturfunktion mit libRadtran bestimmt. Abbildung 2.6 zeigt die daraus resultierenden Korrekturfunktionen $f_{wk}(k^*, \Lambda)$. Somit wird die berechnete spektrale Verteilung der Einstrahlung bei zunehmender Bewölkung zu kleineren Wellenlängen verschoben. Zwischen den vorgegebenen Clearsky-Index-Werten wird linear interpoliert. Bei Werten kleiner 0.197 wird dieselbe Korrekturfunktion verwendet wie für $k^*=0.197$.

Durch die Berechnung der spektral aufgelösten Einstrahlung $I_{glob,cs}(\Lambda)$ bei wolkenlosem Himmel in Kombination mit dem spektral korrigierten Clearsky-Index lässt sich die Globalstrahlung am Boden $I_{glob}(\Lambda)$ ebenfalls spektral aufgelöst bestimmen:

$$I_{glob}(\Lambda) = k^* \cdot f_{wk}(k^*, \Lambda) \cdot I_{glob,cs}(\Lambda) \quad (2.23)$$

Die Direktstrahlung wird abhängig vom Breitband-Clearsky-Index bestimmt:

$$I_{dir}(\lambda) = \begin{cases} 1,05 \cdot I_{dir,cs} \cdot k^* & k^* \geq 1 \\ 1,05 \cdot I_{dir,cs} \cdot (k^* - 0,38 \cdot (1 - k^*))^{2,5} & 1 > k^* > 0,3 \\ 0 & k^* \leq 0,3. \end{cases} \quad (2.24)$$

Die Diffusstrahlung wird aus der Differenz von Global- und Direktstrahlung berechnet.

2.3.4 Berechnung der Einstrahlung auf die geneigte Fläche

Da Photovoltaikanlagen meist auf einer geneigten Fläche angebracht sind, ist für die Bestimmung ihrer Leistung eine Umrechnung der berechneten horizontalen Einstrahlung auf die geneigte Modulebene nötig. Aus der Heliosat-Methode in Verbindung mit dem SOLIS- oder MAGIC-Verfahren ist die spektrale Einstrahlung auf die geneigte Fläche nicht verfügbar. Im folgenden werden die in dieser Arbeit verwendeten Ansätze zur Berechnung der Einstrahlung auf die geneigte Fläche vorgestellt. Die Einstrahlung auf eine geneigte Fläche ergibt sich aus der Summe der Direkt-, der Diffusstrahlung und der vom Boden auf die geneigte Fläche reflektierten Strahlung.

Direktstrahlung

Die Direktstrahlung auf die geneigte Fläche I_{dir}^{tilt} berechnet sich aus der Direktstrahlung auf die horizontale Fläche I_{dir}^{hor} nach:

$$I_{dir}^{tilt} = I_{dir}^{hor} \cdot \frac{\cos(\delta_s)}{\cos(\delta_{s0})} \quad (2.25)$$

wobei die Direktstrahlung im Winkel δ_s auf die geneigte Fläche und im Winkel δ_{s0} auf eine horizontale Fläche trifft. Der $\cos(\delta_s)$ ergibt sich aus dem Skalarprodukt zwischen dem Normalenvektor \vec{e}_n auf der Fläche und der Richtung der Direktstrahlung \vec{e}_s . Der $\cos(\delta_{s0})$ ist das Skalarprodukt zwischen \vec{e}_s und dem Normalenvektor \vec{e}_{n0} auf die horizontale Fläche. Der Normalenvektor \vec{e}_n einer Fläche mit dem Neigungswinkel α und einer Ausrichtung von ϕ_n ist gegeben durch

$$\vec{e}_n = \begin{pmatrix} \sin(\alpha) \cos(\phi_n) \\ \sin(\alpha) \sin(\phi_n) \\ \cos(\alpha) \end{pmatrix} \quad |\vec{e}_n| = 1 \quad (2.26)$$

Mit dem Sonnen-Zenithwinkel θ_s und dem Sonnen-Azimuthwinkel ϕ_s ist

$$\vec{e}_s = \begin{pmatrix} \sin(\theta_s) \cos(\phi_s) \\ \sin(\theta_s) \sin(\phi_s) \\ \cos(\theta_s) \end{pmatrix} \quad |\vec{e}_s| = 1 \quad (2.27)$$

Somit ist

$$I_{dir}^{tilt}(\lambda) = I_{dir}^{hor}(\lambda) \cdot \frac{\vec{e}_n \vec{e}_s}{\vec{e}_{n0} \vec{e}_s} \quad (2.28)$$

Reflektierte Strahlung

Die vom Boden auf die geneigte Fläche reflektierte Strahlung berechnet sich unter der Annahme, dass die eintreffende Globalstrahlung I_{glob}^{hor} isotrop mit der Bodenalbedo ρ auf die geneigte Fläche reflektiert wird:

$$I_{refl}^{tilt}(\lambda) = I_{glob}^{hor}(\lambda) \cdot \rho \frac{1 - \cos(\alpha)}{2} \quad (2.29)$$

Diffusstrahlung

Die Diffusstrahlung auf die geneigte Fläche lässt sich durch die Integration von Radianzen aus libRadtran sehr genau aber auch sehr zeitaufwendig berechnen. Hierzu muss die atmosphärische Zusammensetzung und die vorherrschende Bewölkung bekannt sein. Alternativ dazu existieren bereits verschiedene Parametrisierungen, mit denen die Breitbandeinstrahlung auf eine horizontale Fläche zur Einstrahlung auf eine geneigte Fläche umgerechnet werden kann.

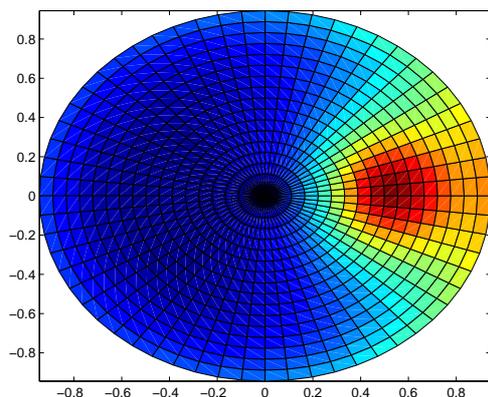


Abbildung 2.7: Mit libRadtran berechnete Radianzen (Breitband, 42° Sonnenzenith- und 0° Sonnenazimuthwinkel)

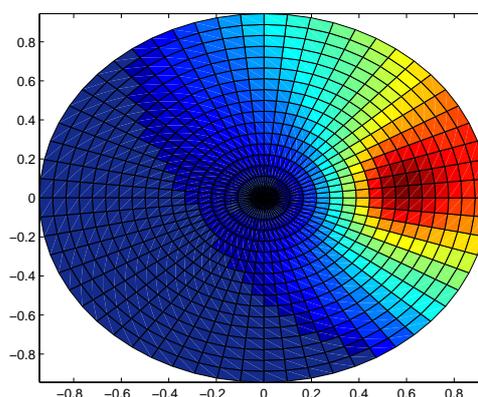


Abbildung 2.8: Radianzen multipliziert mit dem Cosinus des Einfallswinkels $\cos \delta_r$ und dem Sinus des Zenithwinkels der Radianz $\sin \theta_r$ (s. Gl. 2.30) für eine um 54° geneigte Fläche mit einer Orientierung von -15° gegenüber dem Sonnenazimuthwinkel

Integration von Radianzen

Die Diffusstrahlung I_{diff}^{tilt} berechnet sich durch die Integration der Radianzen aus dem Halbraum über der geneigten Fläche:

$$I_{diff}^{tilt}(\lambda) = \int_{\theta_r=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\phi_r=0}^{2\pi} \sin(\theta_r) L(\lambda, t, \theta_r \phi_r) \cdot \cos(\delta_r) d\theta_r d\phi_r, \quad (2.30)$$

wobei $L(\lambda, t, \theta_r \phi_r)$ die Radianz aus der Richtung mit dem Zenithwinkel θ_r und dem Azimutwinkel ϕ_r ist. Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 2.7 die berechneten Breitband-Radianzen für einen Sonnenzenithwinkel von 42° und einem Sonnenazimutwinkel von 0° dargestellt. Abbildung 2.8 zeigt die entsprechenden Radianzen multipliziert mit dem Cosinus des Einfallswinkels $\cos \delta_r$ und dem Sinus des Zenithwinkels der Radianz $\sin \theta_r$ (s. Gl. 2.30) für eine um 54° geneigte Fläche mit einer Orientierung von -15° gegenüber dem Sonnenazimutwinkel.

Der Cosinus des Einfallswinkels $\cos \delta_r$ ergibt sich aus dem Skalarprodukt des Normalenvektors und der Richtung \vec{e}_r der Radianz.

$$\vec{e}_r = \begin{pmatrix} \sin(\theta_r) \cos(\phi_r) \\ \sin(\theta_r) \sin(\phi_r) \\ \cos(\theta_r) \end{pmatrix} \quad |\vec{e}_r| = 1 \quad (2.31)$$

und somit

$$I_{diff}^{tilt}(\lambda) = \int_{\theta_r=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\phi_r=0}^{2\pi} \sin(\theta_r) L(\lambda, t, \theta_r \phi_r) \cdot \vec{e}_n \vec{e}_r d\theta_r d\phi_r \quad (2.32)$$

Anwendung der Breitbandparametrisierung nach Klucher auf die spektralen Bänder

Es existieren verschiedene Ansätze mit unterschiedlicher Genauigkeit um die Einstrahlung auf die geneigte Fläche zu parametrisieren, die alle nur die Breitbandeinstrahlung behandeln. Im einfachsten Fall wird die Diffusstrahlung als isotrop angenommen, wodurch sich die Diffusstrahlung auf die geneigte Fläche mit

$$I_{diff}^{tilt} = I_{diff}^{hor} \cdot \frac{1 - \cos(\alpha)}{2} \quad (2.33)$$

berechnet. Detailliertere Methoden beinhalten die erhöhte Intensität der zirkumsolaren Diffusstrahlung und der Diffusstrahlung entlang des Horizonts. [Klucher, 1979] führt zur Berechnung der Diffusstrahlung auf die geneigte

Fläche einen Anisotropieparameter F ein, der von dem Verhältnis der Diffusstrahlung zur Globalstrahlung abhängt

$$F = 1 - \left(\frac{I_{diff}^{hor}}{I_{glob}^{hor}} \right)^2 \quad (2.34)$$

und mit dessen Hilfe die Diffusstrahlung auf die geneigte Fläche parametrisiert wird. Die Diffusstrahlung setzt sich hierbei aus dem zirkumsolaren Anteil, dem Bereich entlang des Horizonts und dem isotropen Himmelsbereich zusammen:

$$I_{diff}^{tilt} = I_{diff}^{hor} \cdot (1 + F \cos^2 \delta_s \sin^3(\theta_s)) \left(1 + F \sin^3\left(\frac{\alpha}{2}\right) \left(\frac{1 + \cos(\alpha)}{2}\right) \right) \quad (2.35)$$

Der Parameter F nimmt für verschiedene Bewölkungsgrade unterschiedliche Werte an, bei vollständig bewölktem Himmel wird $F = 0$, sodass sich die Diffusstrahlung ausschließlich aus dem isotropen Anteil ergibt. Mit der Berechnung der Direktstrahlung (Gl. 2.28) und der am Boden reflektierten Einstrahlung auf die geneigte Fläche (Gl. 2.29) ergibt sich für die Einstrahlung I^{tilt} auf die geneigte Fläche

$$I^{tilt} = a \cdot I_{glob}^{hor} + b \cdot I_{diff}^{hor} \quad (2.36)$$

mit

$$a = \frac{\cos \delta_s}{\cos \theta_s} + (1 - \cos(\alpha)) \cdot \frac{\rho}{2} \quad (2.37)$$

und

$$b = -\frac{\cos \delta_s}{\cos \theta_s} + (1 + F \sin^3\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot (1 + F \cos^2 \delta_s \sin^3(\theta_s)) \cdot \left(\frac{1 + \cos(\alpha)}{2}\right)) \cdot \frac{\rho}{2} \quad (2.38)$$

Für Situationen in denen keine Direktstrahlung auf die geneigte Fläche trifft, da die Sonne hinter der Fläche steht oder noch nicht auf- bzw. schon untergegangen ist, werden die Parameter a und b in dieser Arbeit wie folgt angepasst:

$$a = (1 - \cos(\alpha)) \cdot \frac{\rho}{2} \quad (2.39)$$

und

$$b = (1 + F \sin^3\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \left(\frac{1 + \cos(\alpha)}{2}\right)) \cdot \frac{\rho}{2} \quad (2.40)$$

Kapitel 3

Sensitivitätsstudien

Die spektrale Einstrahlung am Boden hängt, wie im Kapitel 2.2 beschrieben, von der atmosphärischen Zusammensetzung und der Sonnengeometrie, also der Weglänge der Strahlung durch die Atmosphäre, ab. Zur Berechnung der spektralen Einstrahlung aus Satellitendaten und Strahlungstransportrechnungen werden im SOLIS-Verfahren eine Reihe von Parametrisierungen verwendet (s. Kap. 2.3.3).

Im folgenden Kapitel werden verschiedene Fragestellungen zur spektralen Einstrahlung auf die horizontale und geneigte Fläche untersucht.

- In Kapitel 3.1 wird der Einfluss der verschiedenen atmosphärischen Bestandteile (Wolken, Aerosole, Wasserdampf und Ozon) sowie des Sonnenstands auf die mit dem SOLIS-Verfahren berechnete, spektrale Verteilung der Global-, Direkt- und Diffusstrahlung gezeigt und die Auswirkungen auf den Energieertrag verschiedener PV-Materialien anhand der mittleren Photonenenergie, des nutzbaren Anteils der Einstrahlung und des spektralen Mismatch-Faktors ausgewertet.
- Im SOLIS-Verfahren werden verschiedene Parametrisierungen verwendet, um die spektrale Verteilung der Global- und Direktstrahlung in Abhängigkeit vom Bewölkungsgrad zu beschreiben. Anhand von Strahlungstransportrechnungen mit libRadtran werden diese in Kapitel 3.2 bei variierendem Bewölkungsgrad und Sonnenstand untersucht.
- Kapitel 3.3 behandelt die Berechnung der Einstrahlung auf die geneigte Fläche. Hier wird anhand von Strahlungstransportrechnungen das im Weiteren verwendete Klucher-Modell überprüft.

3.1 Atmosphärische und geometrische Einflüsse auf die spektrale Solarstrahlung und die Energieerzeugung von Dünnschicht-Solarzellen

Zur Bestimmung des Einflusses der atmosphärischen Zusammensetzung auf die spektrale Verteilung der am Boden eintreffenden Solarstrahlung wurden mit dem SOLIS-Verfahren Sensitivitätsstudien durchgeführt. Es wurden einige diskrete Atmosphärenzustände mit variierendem Aerosol-, Wasserdampf- und Ozongehalt ausgewählt und die spektrale Direkt-, Diffus- und Globalstrahlung auf die horizontale Fläche unter Berücksichtigung dieser atmosphärischen Parameter sowie des Bewölkungsgrads und des Sonnenstands untersucht.

Es wurden die Parametrisierungen im SOLIS-Verfahren verwendet. Dies umfasst, dass

- der Tagesgang der Einstrahlung mit der Modified-Lambert-Beer Parametrisierung (Gl. 2.19) bestimmt wurde,
- zur Untersuchung des Einflusses der Bewölkung der wellenlängenabhängige Clearsky-Index des SOLIS-Verfahrens verwendet wurde,
- die Direktstrahlung entsprechend der Gleichung 2.24 in Abhängigkeit vom Clearsky-Index parametrisiert wurde und
- die Diffusstrahlung aus der Differenz von Global- und Direktstrahlung berechnet wurde.

Es wurde jeweils ein Parameter variiert und sein Einfluss auf die spektrale Verteilung der Einstrahlung und die daraus resultierende mittlere Photonenenergie ausgewertet, während die weiteren Parameter konstant gehalten wurden. Als Ausgangssituation wurde der Sonnenzenithwinkel $SZA = 50^\circ$, k^* auf 1, die Aerosol-optische Dicke $AOD = 0.2$, der Wasserdampfgehalt auf 15 mm und der Ozongehalt auf 245 DU festgelegt. Weiterhin wurde die atmosphärische Zusammensetzung hinsichtlich ihres Einflusses auf zwei Dünnschicht-Materialien (amorphes Silizium (a-Si) und Cadmium-Tellurid (CdTe)) untersucht. Hierzu wurden der für diese Materialien nutzbare Anteil UF (Gl. 2.1) und der spektrale Mismatch-Faktor (Gl. 2.6) bestimmt und ausgewertet. Zum Vergleich wurden diese Auswertungen zusätzlich für polykristallines Silizium (pc-Si) durchgeführt.

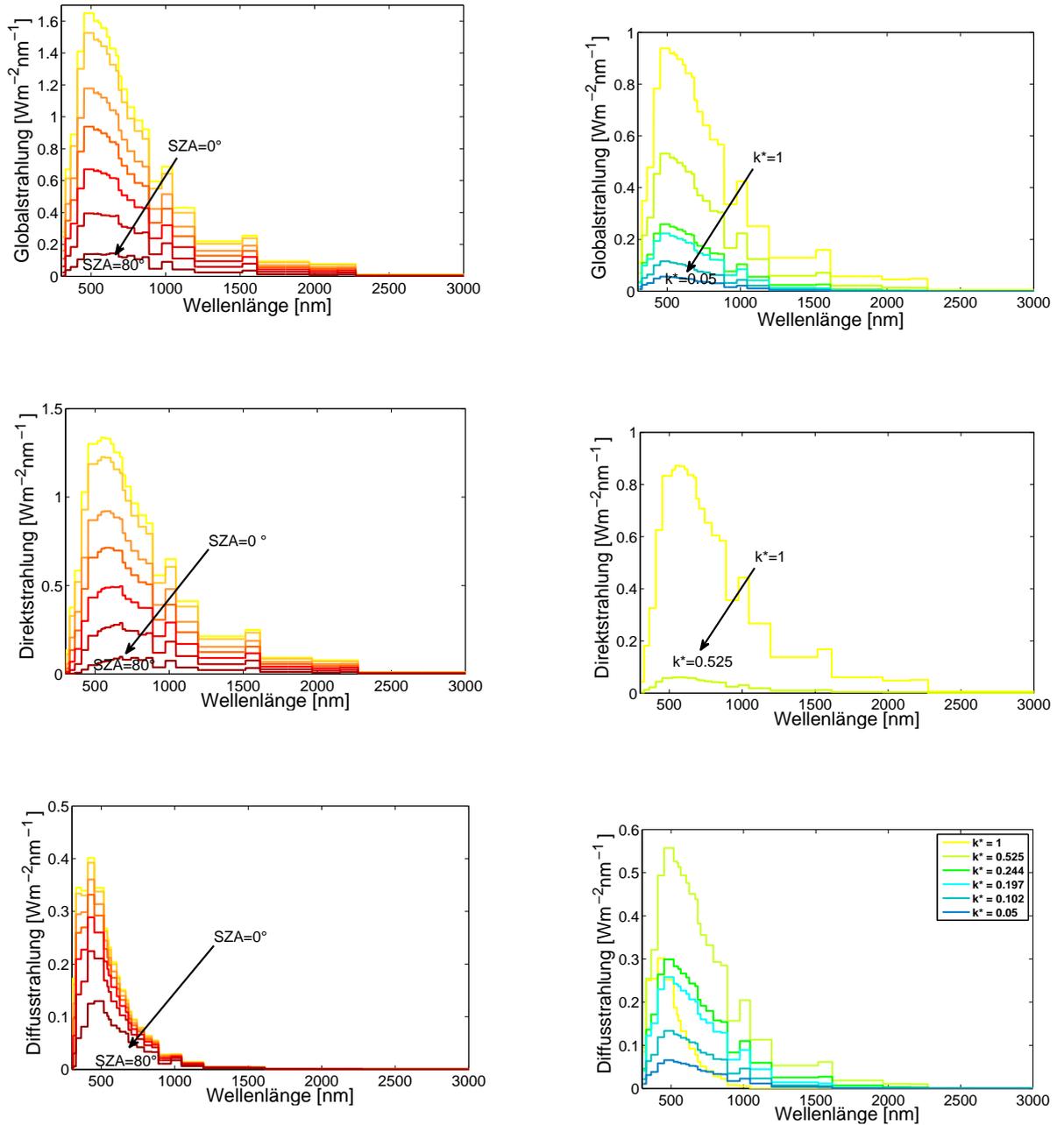


Abbildung 3.1: Spektrale Globalstrahlung (oben), Direktstrahlung (Mitte) und Diffusstrahlung (unten) bei verschiedenen Sonnenzenithwinkeln bei $k^* = 1$ (links) und in Abhängigkeit vom Clearsky-Index bei $\text{SZA} = 50^\circ$ (rechts) (AOD = 0.2, Wasserdampf: 15 mm, Ozon: 245 DU)

Zuerst wurde für unterschiedliche Sonnenzenithwinkel die spektrale Verteilung der Global-, Direkt- und Diffusstrahlung bei klarem Himmel untersucht. Die spektrale Globalstrahlung bei verschiedenen Sonnenzenithwinkeln ist in Abbildung 3.1 (oben links) dargestellt, Abbildung 3.1 (Mitte links) zeigt die entsprechende spektrale Direktstrahlung. Bei niedrigen Sonnenzenithwinkeln besteht ein großer Teil der Einstrahlung aus sichtbarem Licht. Dieser Anteil nimmt zu hohen Sonnenzenithwinkeln hin ab. Aufgrund des längeren Strahlungswegs durch die Atmosphäre nimmt die Streuung der Strahlung zu. Die starke Wellenlängenabhängigkeit der Rayleigh-Streuung ($\sim \lambda^{-4}$) und die leichte Wellenlängenabhängigkeit der Mie-Streuung ($\sim \lambda^{-\alpha}$) werden hier sehr deutlich. Somit steigt bei hohem SZA der Anteil der Direktstrahlung aus dem nahen Infrarot. Der Anteil des sichtbaren Lichts in der Diffusstrahlung bleibt durch die erhöhte Streuung der kurzwelligen Strahlung auch bei hohem Sonnenzenithwinkel groß (s. Abbildung 3.1 unten links). Die spektrale Globalstrahlung weist daher nur eine geringe Reduzierung im kurzwelligen Spektralbereich auf.

Als nächstes wurde die in SOLIS verwendete Parametrisierung für die spektrale Verteilung der Global-, Direkt- und Diffusstrahlung in Abhängigkeit vom Bewölkungsgrad untersucht. Bei starker Bewölkung ist neben der Reduktion im sichtbaren Bereich ein großer Einfluss auf den Infrarot-Bereich (IR) der Globalstrahlung zu erkennen (Abb. 3.1 oben rechts). Abbildung 3.1 (Mitte rechts) zeigt die spektrale Direktstrahlung bei einem Clearsky-Index $k^*=1$ und $k^*=0.525$. Bei stärkerer Bewölkung ($k^*<0.3$) wird die Direktstrahlung in SOLIS gleich Null gesetzt (s. Gl. 2.24). Die in SOLIS verwendete Parametrisierung für die Direktstrahlung in Abhängigkeit von k^* führt zu einer Verringerung dieser bei gleicher spektraler Verteilung. Die Diffusstrahlung, die sich aus der Differenz von Global- und Direktstrahlung berechnet, weist einen starken Anstieg von $k^*=1$ zu $k^*=0.5$ auf (Abbildung 3.1 unten rechts). Auch die spektrale Verteilung der Diffusstrahlung ändert sich stark. Während bei wolkenlosem Himmel durch die wellenlängenabhängige Rayleigh-Streuung der Anteil an kurzwelligem Licht sehr hoch ist, wird bei zunehmender Bewölkung auch Licht des roten und infraroten Spektralbereichs gestreut (Mie-Streuung), wodurch der Anteil dieses Bereichs steigt.

Der Einfluss der weiteren atmosphärischen Bestandteile (Aerosole, Wasserdampf und Ozon) auf die spektrale Verteilung der Global-, Direkt- und Diffusstrahlung ist in Abb. 3.2 sowie im Anhang (Abb. 7.1 - Abb. 7.3) dargestellt. Abbildung 3.2 zeigt die spektrale Verteilung der Globalstrahlung (oben links), der Direkt- (oben rechts) und Diffusstrahlung (unten links) bei einem Sonnenzenithwinkel von 50° für verschiedene atmosphärische Zusammensetzungen. Es ist jeweils das Spektrum ohne Extinktion durch Aerosole, Wasserdampf und Ozon dargestellt, der Einfluss durch Streuung und Absorp-

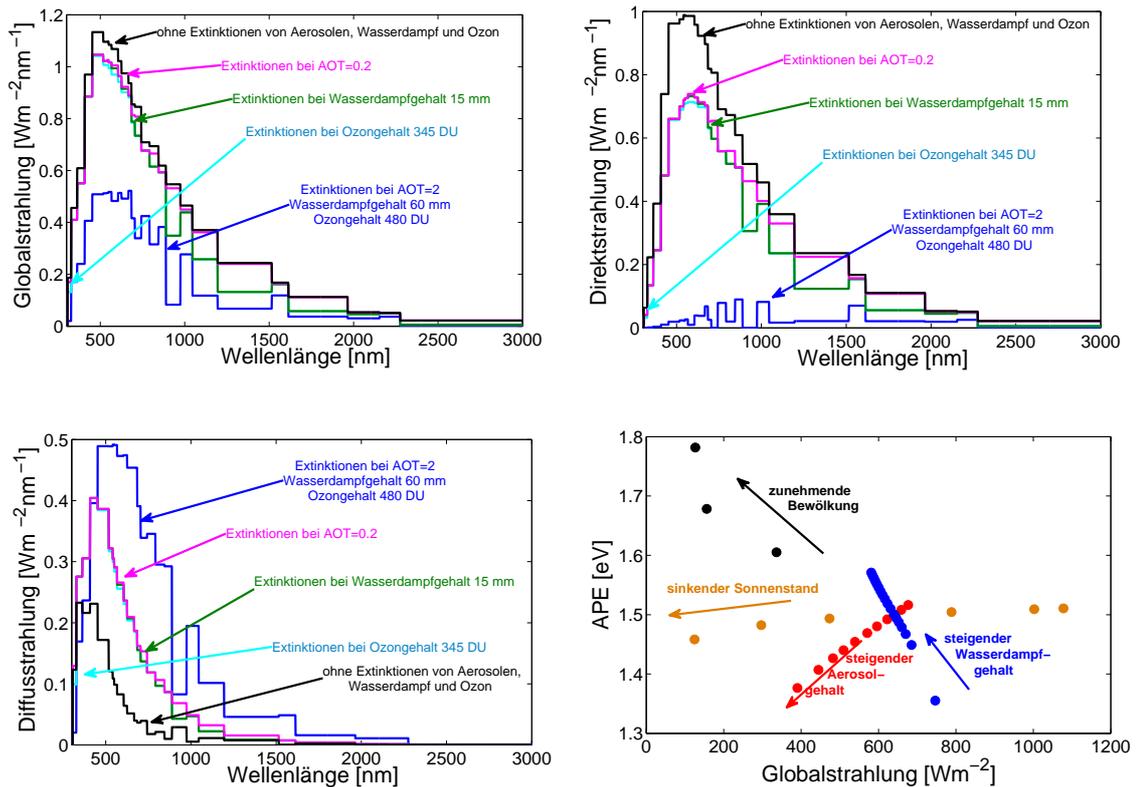


Abbildung 3.2: Spektrale Verteilung der Global- (oben links), Direkt- (oben rechts) und Diffusstrahlung (unten links) durch Extinktionsprozesse in der Atmosphäre bei einem $\text{SZA} = 50^\circ$ und wolkenlosem Himmel (ohne Streuung und Absorption an Aerosolen, Wasserdampf und Ozon (schwarz), bei einer Aerosol-optischen Dicke von 0.2 (magenta), neben Aerosolgehalt zusätzlich einem Wasserdampfgehalt von 15 mm (grün), neben Wasserdampf und Aerosolen einem Ozongehalt von 345 DU (hellblau), sowie bei einer AOD von 2, 70 mm Wasserdampf und 480 DU Ozon (dunkelblau)). Unten rechts: Mittlere Photonenergie der Globalstrahlung bei unterschiedlichem Sonnenzenithwinkel, Bewölkungsgrad und unterschiedlicher atmosphärischer Zusammensetzung (Integrationsbereich: 300 bis 3000 nm).

tion der Aerosole bei einer AOD=0,2, die spektrale Verteilung bei derselben AOD und einem zusätzlichen Wasserdampfgehalt von 15 mm, das Spektrum bei einem zusätzlichen Ozongehalt von 345 DU, sowie ein Spektrum bei extremen atmosphärischen Bedingungen (AOD=2, Wasserdampfgehalt: 60 mm und Ozongehalt: 480 DU). Die Abbildung zeigt deutlich, dass die spektrale Verteilung der Clearsky-Einstrahlung bei einem bestimmten Sonnenstand stark variieren kann.

Die Extinktion durch Aerosole ist besonders groß im sichtbaren Bereich (Mie-Streuung $\sim \lambda^{-\alpha}$), wobei die Direktstrahlung besonders stark beeinflusst wird (siehe hierzu auch Abb. 7.1 im Anhang). Durch die erhöhte Streuung der Einstrahlung wird die Diffusstrahlung mit steigender AOD erhöht.

Absorption durch Wasserdampf im IR-Bereich und Ozon im sichtbaren (Chappuis-Banden) und UV-Bereich (Hartly- und Huggins-Banden) (Abb. 7.2 und 7.3 im Anhang) führt zu einer Reduzierung der Global-, Direkt- und z.T. auch der Diffusstrahlung in den Absorptionsbanden. Der Einfluss von Ozon auf die Direkt-, Diffus- und Globalstrahlung ist dabei insgesamt gering und beschränkt sich auf wenige, schmale Wellenlängenbereiche.

Abbildung 3.2 (unten rechts) fasst die Änderung der spektralen Verteilung durch die untersuchten Parameter anhand der mittleren Photonenenergie (APE) in Abhängigkeit von der integrierten Globalstrahlung quantitativ zusammen. In der Abbildung 3.3 werden Änderungen im Spektrum in Bezug auf die Energieerzeugung verschiedener PV-Materialien (a-Si, CdTe und pc-Si) anhand der in Kap. 2.1 beschriebenen Parameter UF (Gl. 2.1) und sMMF (Gl. 2.6) quantifiziert.

Beide beinhalten die spektrale Empfindlichkeit der verwendeten Materialien, wobei diese bei Betrachtung der UF im Absorptionsbereich konstant angenommen wird und beim spektralen Mismatch-Faktor mit ihrem spektralen Verlauf einbezogen wird. Verringert sich die Einstrahlung in dem Bereich der spektralen Empfindlichkeit, verringert sich die UF und der sMMF nimmt Werte <1 an. Wird die Einstrahlung in dem Bereich des Spektrums reduziert, der nicht von den untersuchten Materialien genutzt werden kann, steigt der Anteil der nutzbaren Einstrahlung und der sMMF nimmt Werte über 1 an. Die Grenzen der spektralen Empfindlichkeit variieren je nach verwendetem Material, befinden sich aber bei allen untersuchten Materialien im kurzwelligen Spektralbereich. Daher weisen der nutzbare Anteil der Einstrahlung und der spektrale Mismatch-Faktor qualitativ einen ähnlichen Verlauf in Abhängigkeit von den untersuchten Atmosphärenparametern auf wie die mittlere Photonenenergie. Amorphes Silizium absorbiert z.B. im Bereich zwischen 350 und 800 nm, Cadmium-Tellurid zwischen 350 und 900nm. Der Absorptionsbereich von kristallinem Silizium liegt zwischen 300 und 1100 nm. Dadurch ist die UF für a-Si im Mittel geringer als für CdTe und pc-Si (Abb.

3.3 oben). Der Vergleich der sMMF-Werte für die drei untersuchten Materialien macht zusätzlich eine besonders starke Abhängigkeit des a-Si-sMMF von der Atmosphärensituation deutlich.

Sinkender Sonnenstand führt zu einer starken Reduzierung der Gesamteinstrahlung und einer leichten Veränderung der spektralen Verteilung der Einstrahlung (Abb. 3.1). Die mittlere Photonenergie und die UF (für alle Materialien) bleiben annähernd konstant, der sMMF für a-Si zeigt eine Verringerung bei sinkendem Sonnenstand, für c-Si einen leichten Anstieg. Ein Anstieg der Aerosol-optischen Dicke führt durch die erhöhte Streuung und Absorption des kurzwelligen Lichts (Abb. 3.2) zu einer sinkenden APE, UF und einem sinkendem sMMF, für a-Si auf bis zu 0.9. Die Absorption im langwelligeren Infrarot-Bereich durch Wolken und Wasserdampf (Abb. 3.1 und 3.2) führt zu einem Anstieg der mittleren Photonenergie sowie des nutzbaren Anteils der Einstrahlung und somit auch des spektralen Mismatch-Faktors, auf über 1.1 (Wasserdampf) und über 1.2 (Bewölkung) für a-Si. Polykristallines Silizium und CdTe zeigen die gleiche Tendenz, allerdings bei geringerer Steigung.

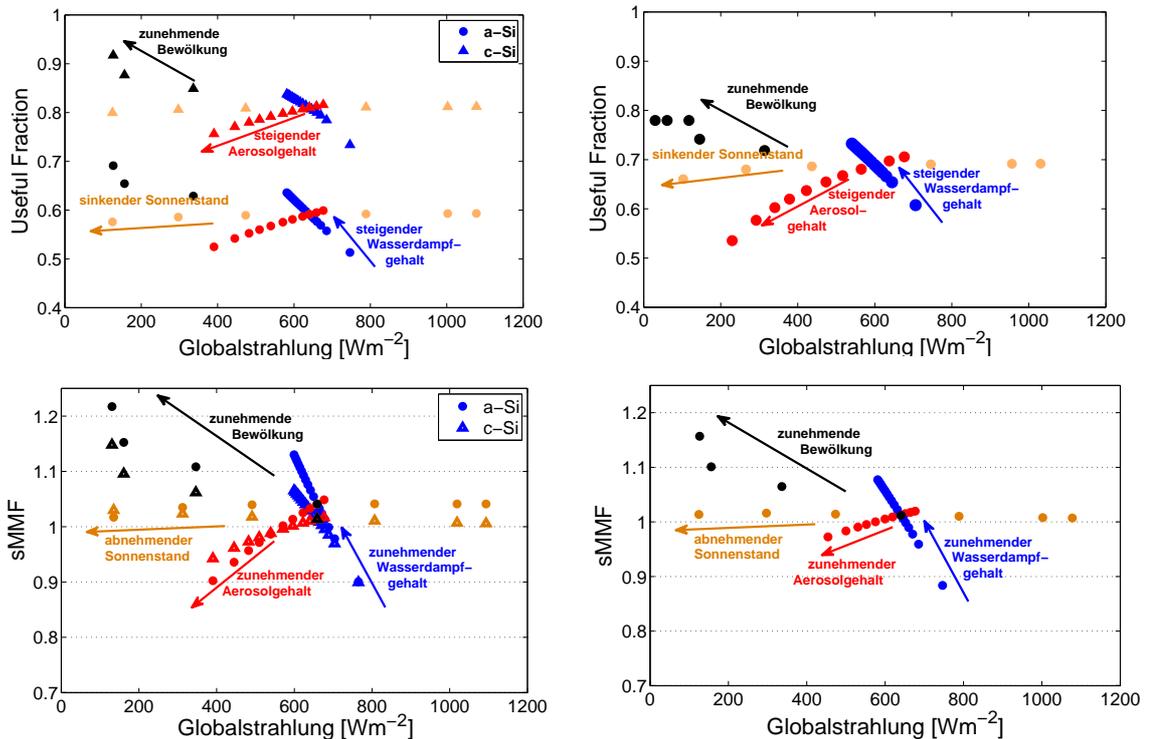


Abbildung 3.3: Nutzbarer Anteil der Einstrahlung (oben) und spektraler Mismatch-Faktor (unten) in Abhängigkeit von Sonnenzenithwinkel, Bewölkungsgrad und atmosphärischer Zusammensetzung. Links: für a-Si und c-Si, rechts: für CdTe.

In diesem Kapitel wurde der Einfluss der atmosphärischen Parameter, sowie des Sonnenstands und des Bewölkungsgrads auf die berechnete, spektrale Verteilung der Global-, Direkt- und Diffusstrahlung gezeigt. Die Änderung der spektralen Verteilung aufgrund der untersuchten Parameter wurde anhand der mittleren Photonenenergie, dem nutzbaren Anteil der Einstrahlung und dem spektralen Mismatch-Faktor von drei verschiedenen PV-Materialien quantifiziert. Hierbei entspricht der Verlauf der Technologie-spezifischen Parameter (UF und sMMF) dem der mittleren Photonenenergie. Aus diesem Grund wird in den weiteren Sensitivitätsstudien die Änderung im Spektrum nur noch in Bezug auf die APE untersucht.

3.2 Spektrale Einstrahlung aus dem SOLIS-Verfahren unter Berücksichtigung des Bewölkungsgrads

Zur Berechnung der spektralen Einstrahlung in Abhängigkeit vom Bewölkungsgrad werden im SOLIS-Verfahren verschiedene Näherungen und Parametrisierungen verwendet, die im folgenden überprüft werden. Die spektrale Wolkenkorrektur für die Globalstrahlung wurde für Werte der Wolkenoptischen Dicke (COD) zwischen 0 und 40 und einem Sonnenzenithwinkel (50°) erstellt. Die Zustände werden im folgenden erweitert, d.h. es wird die spektrale Verteilung der Einstrahlung zusätzlich für variierende Sonnenzenithwinkel und sehr starke Bewölkung, d.h. COD-Werte bis 160, untersucht.

Die spektral aufgelöste Direktstrahlung in SOLIS leitet sich aus einer Breitbandparametrisierung in Abhängigkeit vom Clearsky-index ab, die keine spektrale Korrektur beinhaltet (s. hierzu Kapitel 2.3.3 und auch Kap. 3.1). Hierbei wird die berechnete Direktstrahlung auf den 5° -Öffnungswinkel eines Pyrheliometers zur Erfassung der Direktstrahlung angepasst.

Um den Einfluss der SOLIS-Parametrisierungen auf die Genauigkeit des Verfahrens auszuwerten, wurde die daraus berechnete, spektrale Einstrahlung mit Strahlungstransportrechnungen aus libRadtran mit variierenden Werten der Wolken-optischen Dicke und des Sonnenzenithwinkels verglichen. Aus der berechneten, spektral integrierten Einstrahlung wurde der Clearsky-index k^* bestimmt. Die resultierenden k^* -Werte liegen zwischen 1 und 0.05. Zum Vergleich der Direktstrahlung aus SOLIS und libRadtran wurde aus den in libRadtran berechneten Radianzen noch die Diffusstrahlung aus dem Raumwinkelbereich von 5° um die Sonne hinzu genommen, der dem Öffnungswinkel eines Pyrheliometers entspricht.

In Abbildung 3.4 ist die spektrale Globalstrahlung bei Sonnenzenith-

winkeln von 30° (oben links) und 70° (oben rechts) und variierenden Bewölkungsgrad dargestellt, dabei einerseits die aus libRadtran mit variierender COD berechnete und andererseits die über k^* und der SOLIS-Wolkenkorrektur bestimmte Globalstrahlung. Bei einem Sonnenzenithwinkel von 30° wird bei Bewölkung die Globalstrahlung durch die SOLIS-Parametrisierung im sichtbaren Bereich und im nahen Infrarot-Bereich (bis etwa 1800 nm bei COD=10) unterschätzt, bei größeren Wellenlängen leicht überschätzt. Bei größeren COD-Werten verschiebt sich der Schnittpunkt zwischen SOLIS und libRadtran im IR-Bereich zu kürzeren Wellenlängen. Auch bei einem Sonnenzenithwinkel von 70° wird die spektrale Globalstrahlung bei Bewölkung im sichtbaren Spektralbereich deutlich unterschätzt. Entsprechend ist die aus SOLIS berechnete mittlere Photonenergie deutlich kleiner als nach libRadtran (s. Abb. 3.4 unten rechts). Sie wird insbesondere bei hohem Sonnenzenithwinkel oder hohem Bewölkungsgrad unterschätzt.

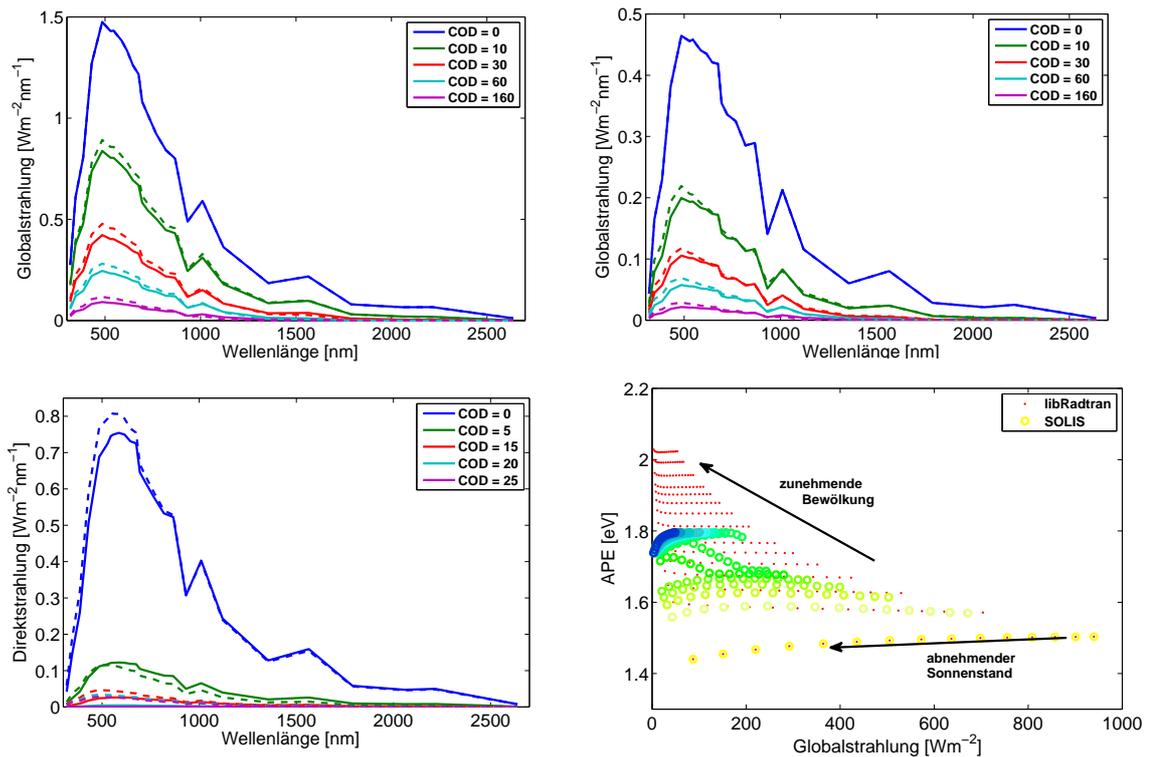


Abbildung 3.4: Spektrale Globalstrahlung in Abhängigkeit von COD bei einem Sonnenzenithwinkel von 30° (oben links) und 70° (oben rechts) und spektrale Direktstrahlung bei einem Sonnenzenithwinkel von 30° (unten links), (durchgezogen: SOLIS, gestrichelt: libRadtran). Unten rechts: mittlere Photonenergie der Globalstrahlung bei variierendem Sonnenstand und Bewölkungsgrad (gelb: Clearsky, von hellgrün zu dunkelgrün steigender Bewölkungsgrad)

Zur Umrechnung auf die geneigte Fläche benötigt man neben der spektral aufgelösten Globalstrahlung die Aufteilung in Direkt- und Diffusstrahlung. Daher wurden auch die spektrale Direkt- und Diffusstrahlung aus der SOLIS-Parametrisierung mit libRadtran-Rechnungen verglichen. Die spektrale Direktstrahlung aus libRadtran, die sich aus der Direktstrahlung und der Diffusstrahlung aus einem Raumwinkelbereich von 5° um die Sonne zusammensetzt, wird in Abbildung 3.4 (unten links) mit der Direktstrahlung aus SOLIS, die sich aus der Clearsky-Direktstrahlung aus libRadtran und k^* nach Gl. 2.24 berechnet, verglichen. Bei wolkenlosem Himmel und leichter Bewölkung ($COD = 5$) wird die Direktstrahlung durch die SOLIS-Parametrisierung im kurzwelligen Bereich unterschätzt und bei größeren Wellenlängen überschätzt.

Bei der Betrachtung der mittleren Photonenenergie der Direktstrahlung aus SOLIS und libRadtran zeigt sich somit immer eine Unterschätzung im Vergleich zur APE aus libRadtran (Abb. 3.5 links). Dies wird auch durch Abb. 3.7 (links) deutlich, in der die relative Abweichung der APE aus SOLIS zur APE aus libRadtran über dem Sonnenzenithwinkel für verschiedene COD-Werte aufgetragen ist. Die Unterschätzung der APE lässt sich durch die höhere APE der hinzugenommenen zirkumsolaren Diffusstrahlung erklären, die in SOLIS nicht behandelt wird. Die in SOLIS verwendete Parametrisierung beinhaltet keine Veränderung der spektralen Verteilung mit zunehmender Bewölkung - somit bleibt auch die mittlere Photonenenergie gleich. Sie ändert sich nur mit dem Sonnenzenithwinkel - nimmt mit sinkendem Sonnenstand ab. Im Clearsky-Fall nimmt auch die APE aus libRadtran mit sinkendem Sonnenstand ab, allerdings nimmt sie bei zunehmender Bewölkung mit sinkendem Sonnenstand zu. Die Abweichung zwischen SOLIS und libRadtran ist also am größten bei starker Bewölkung und niedrigem Sonnenstand (s. Abb. 3.5 und 3.7 links).

Die spektrale Diffusstrahlung in Abhängigkeit vom Bewölkungsgrad ist in Abbildung 3.6 bei einem Sonnenzenithwinkel von 30° (links) bei einem Sonnenzenithwinkel von 70° (rechts) dargestellt. Bei 30° Sonnenzenithwinkel trifft die aus der Differenz der wolkenkorrigierten Globalstrahlung und der über die k^* -Parametrisierung ermittelten Direktstrahlung berechnete Diffusstrahlung die spektrale Verteilung der Diffusstrahlung aus libRadtran (minus der zirkumsolaren Einstrahlung) insgesamt recht gut. Im wolkenlosen Fall ist allerdings eine starke Überschätzung im kurzwelligen Bereich für beide Sonnenzenithwinkel erkennbar. Bei Bewölkung wird die Diffusstrahlung durch SOLIS im sichtbaren Bereich unterschätzt, bei 70° Sonnenzenithwinkel ist dies besonders deutlich. Die beschriebenen Unterschiede in der spektralen Verteilung sind in Abb. 3.5 (rechts) anhand der mittleren Photonenenergie aus SOLIS und libRadtran, sowie in Abb. 3.7 (rechts) anhand

der Abweichung der APE aus SOLIS zur APE aus libRadtran quantifiziert. Im Clearsky-Fall stimmt die APE aus SOLIS kaum mit der aus libRadtran überein (nur bei hohem Sonnenzenithwinkel ist die Abweichung gering). Bei leichter Bewölkung wird die APE überschätzt, wobei die Abweichung zu größeren Sonnenzenithwinkel und zunehmender Bewölkung abnimmt. Bei starker Bewölkung wird die APE bei allen Sonnenzenithwinkeln unterschätzt.

Die Auswertung der mittleren Photonenergie der Global-, Direkt- und Diffusstrahlung aus SOLIS im Vergleich mit libRadtran ist in der Abbildung 3.8 mit Hilfe des relativen BIAS (zur Definition des BIAS s. Kap. 5.1) in Abhängigkeit vom Sonnenzenithwinkel (gemittelt über alle Bewölkungssituationen) und dem Clearsky-Index (gemittelt über alle Sonnenzenithwinkel) zusammengefasst: Die APE der Direktstrahlung wird mit SOLIS immer unterschätzt. Bei steigendem Sonnenzenithwinkel und Bewölkungsgrad, wenn der Einfluss der Zirkumsolaren Einstrahlung steigt, nimmt die Unterschätzung zu. Die APE der Diffusstrahlung wird bei geringer Bewölkung überschätzt, während sie bei starkem Bewölkungsgrad deutlich unterschätzt wird. Die APE der Globalstrahlung wird mit SOLIS bei geringer Bewölkung gut wiedergegeben, während bei kleinem Clearsky-Index eine Unterschätzung der APE zu erkennen ist. Im Mittel über alle Bewölkungssituationen zeigt sich daher immer eine Unterschätzung der APE - mit zunehmendem SZA nimmt die Unterschätzung auch zu.

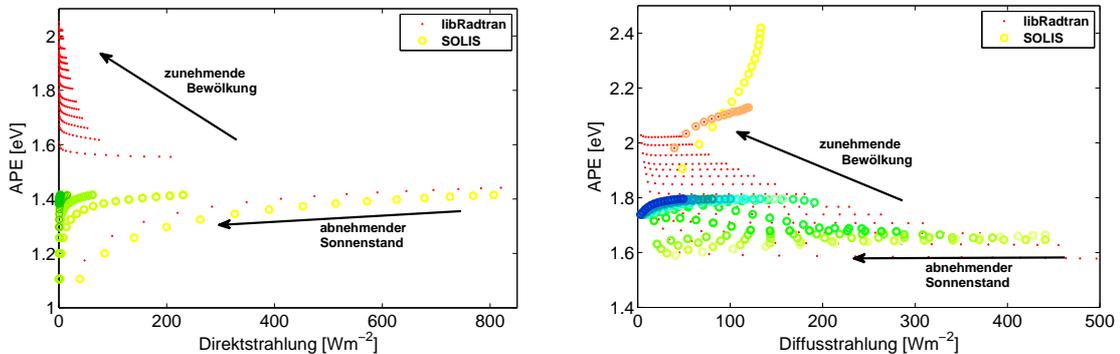


Abbildung 3.5: Mittlere Photonenergie der Direktstrahlung (links) und der Diffusstrahlung (rechts) bei variierenden Sonnenstand und Bewölkungsgrad (gelb und orange: Clearsky, von hellgrün über cyan zu dunkelblau: steigender Bewölkungsgrad)

Die Ergebnisse in diesem Kapitel haben gezeigt, dass die in SOLIS verwendeten Parametrisierungen vor allem bei hohen Sonnenzenithwinkeln und starker Bewölkung erweitert werden könnten, um die spektrale Verteilung der Einstrahlung richtig wieder zu geben. Die spektrale Wolkenkorrektur, die nur für eine begrenzte Zahl an COD-Werten und einem Sonnenzenithwinkel er-

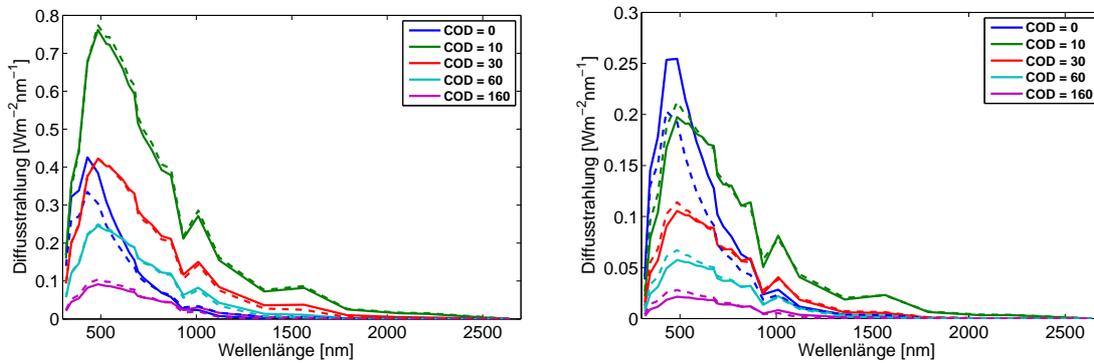


Abbildung 3.6: Spektrale Diffusstrahlung in Abhängigkeit von COD bei einem Sonnenzenithwinkel von 30° (links) 70° (rechts) (durchgezogen: SOLIS, gestrichelt: libRadtran)

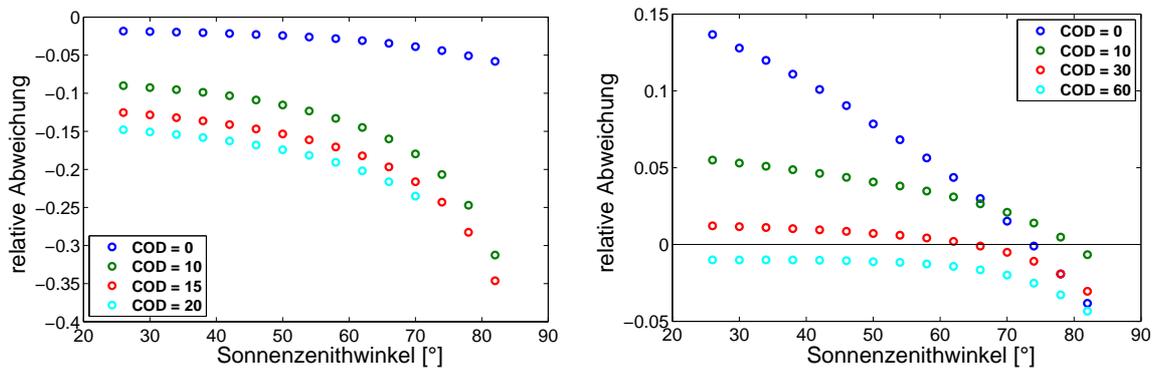


Abbildung 3.7: Abweichung der mittleren Photonenergie der Direktstrahlung (links) und Diffusstrahlung (rechts) aus SOLIS in Abhängigkeit vom Sonnenzenithwinkel für verschiedene Werte der Wolken-optischen Dicke (COD).

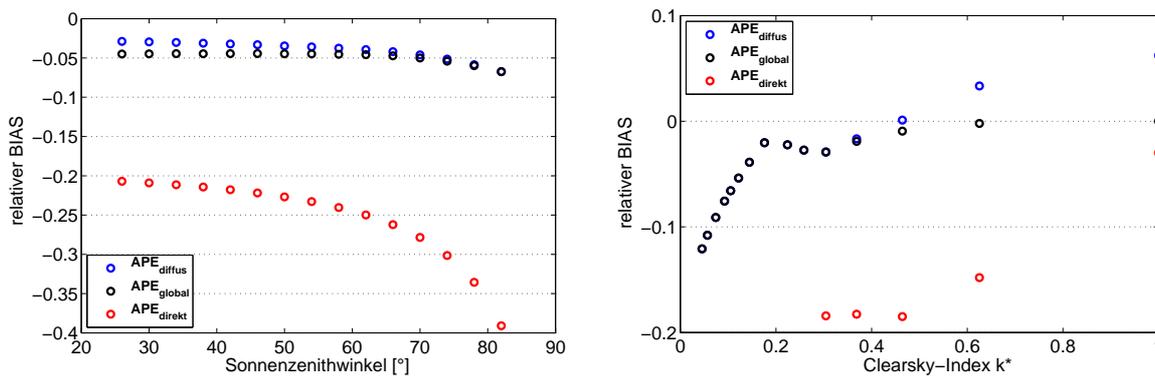


Abbildung 3.8: Relativer BIAS der mittleren Photonenergie der Global-, Direkt- und Diffusstrahlung aus SOLIS in Abhängigkeit vom Sonnenzenithwinkel, gemittelt über alle Bewölkungssituationen (links) und vom Clearsky-Index k^* gemittelt über alle Sonnenzenithwinkel (rechts).

stellt wurde, ist in der Abbildung 3.9 mit den entsprechenden Erweiterungen für sehr starke Bewölkung und beispielhaft für einen weiteren Sonnenzenithwinkel von 70° dargestellt. In beiden Fällen ergibt sich eine deutlich steilere Korrekturfunktion, als die bestehende.

Bei der Berechnung der spektral aufgelösten Direktstrahlung hat sich gezeigt, dass die spektrale Verteilung durch die verwendete Parametrisierung nicht ausreichend wiedergegeben wird. Es wird aufgrund der Ergebnisse die Einbeziehung der Zirkumsolarstrahlung im 5° -Bereich um die Sonne vorgeschlagen, eine neue Parametrisierung erscheint erforderlich.

Zur Bewertung des Spektrums wurde hier die mittlere Photonenenergie gewählt. Sie wird in Bezug auf die Direktstrahlung in allen untersuchten Situationen und in Bezug auf die Diffus- und die Globalstrahlung im Mittel unterschätzt. Aufgrund des qualitativ sehr ähnlichen Verlauf der PV-spezifischen Parameter UF und sMMF ist anzunehmen, dass auch die Bewertung des spektralen Effekts aufgrund der sich ändernden atmosphärischen Bedingungen unterschätzt wird.

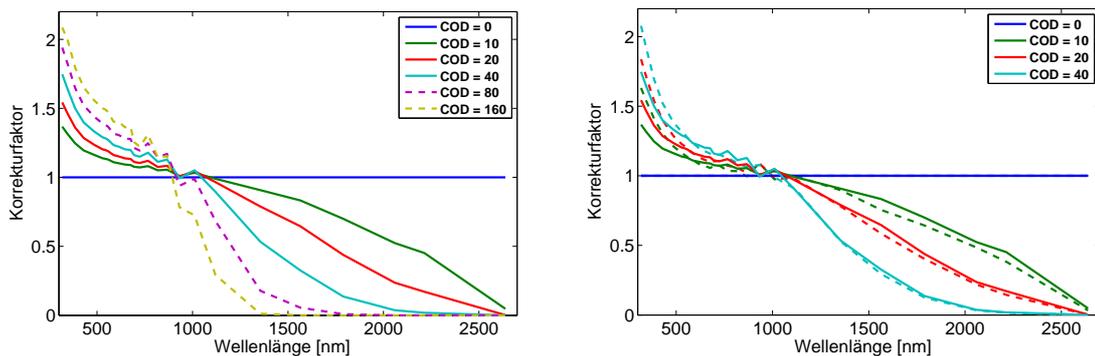


Abbildung 3.9: Spektrale Wolkenkorrektur im SOLIS-Verfahren (durchgezogen) und vorgeschlagene Korrekturen (gestrichelt) für stärkere Bewölkung (links) und für einen Sonnenzenithwinkel von 70° (rechts).

3.3 Spektrale Einstrahlung auf die geneigte Fläche

Im folgenden Kapitel soll einerseits die Anwendbarkeit der Breitbandparametrisierung von Klucher auf die spektralen Bänder aus SOLIS (siehe hierzu Kapitel 2.3.4) geprüft werden und andererseits der Einfluss der bereits beobachteten Ungenauigkeiten des SOLIS-Verfahrens bei Berechnung der spektral aufgelösten Direkt- und Diffusstrahlung auf die berechnete Einstrahlung auf die geneigte Fläche untersucht werden. Hierzu wird die spektral aufgelöste Einstrahlung auf eine 37° geneigte und der Sonne zugewandten Fläche¹ untersucht.

In 3.3.1 wird die auf die horizontale Fläche berechnete, spektrale Direkt- und Diffusstrahlung aus libRadtran (unter Berücksichtigung des 5° -Bereichs der Zirkumsolarstrahlung) nach Gl. 2.36 umgerechnet und mit den über den Halbraum über dieser Fläche integrierten Radianzen verglichen, um nur Änderungen der spektralen Einstrahlung durch die Klucher-Parametrisierung zu untersuchen. Hierbei wird der wolkenlose Fall mit variierenden atmosphärischen Bedingungen und Sonnenzenithwinkel betrachtet.

Die spektral aufgelöste Einstrahlung auf die geneigte Fläche aus der Direkt- und Diffusstrahlung aus SOLIS wird in 3.3.2 anhand der Radianzen aus libRadtran bei verschiedenen Bewölkungssituationen geprüft. Dabei wird auch die Einstrahlung auf die horizontale Fläche aus libRadtran nach Klucher auf die geneigte Fläche umgerechnet, um den Einfluss der SOLIS-Parametrisierungen von dem der Klucher-Methode zu trennen.

3.3.1 Untersuchung des Clearsky-Falls

Für den Clearsky-Fall wurde für verschiedene Aerosol-optische Dicken und Wasserdampfgehalte ebenfalls die spektrale Einstrahlung auf die geneigte Fläche durch Umrechnung der horizontalen Diffus- und Globalstrahlung aus libRadtran nach Klucher mit der Einstrahlung auf die geneigte Fläche durch Integration von Radianzen aus libRadtran verglichen. Hierzu wurde die Ausgangssituation, wie in Kapitel 3.1 beschrieben, verwendet (Sonnenzenithwinkel von 50° , AOD = 0.2, Wasserdampfgehalt 15 mm und Ozongehalt von 345 DU) und jeweils einer der zu untersuchenden Parameter variiert. Die Abbildung 3.10 (oben) zeigt die spektralen Einstrahlungen auf die geneigte Fläche in Abhängigkeit vom Aerosol- und Wasserdampfgehalt. Es findet sich eine Überschätzung der Einstrahlung auf die geneigte Fläche durch die Klucher-Umrechnung. Bei der Betrachtung der mit der

¹Die Neigung entspricht der des ASTM-Standardspektrums.

Breitband-Einstrahlung normierten spektralen Einstrahlung (Abb. 3.10 unten) wird deutlich, dass sich die spektrale Verteilung der Einstrahlung durch die Klucher-Methode ändert, sie wird zu kleineren Wellenlängen verschoben. Zusammen mit der Überschätzung der Breitband-Einstrahlung spricht dies für eine Überschätzung der Diffusstrahlung auf die geneigte Fläche. Dies stimmt mit der Beobachtung von [Harrison and Coombes, 1988] überein.

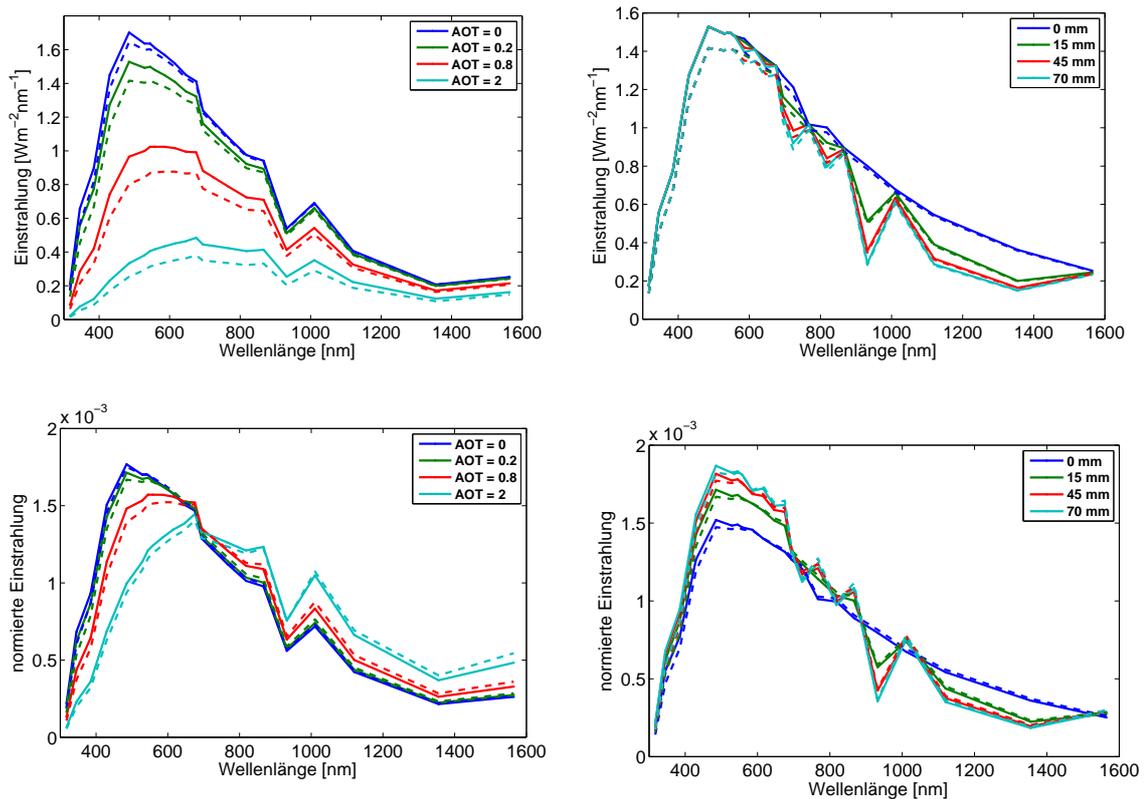


Abbildung 3.10: Spektrale Einstrahlung (oben) und normierte spektrale Einstrahlung (unten) auf die geneigte Fläche bei einem Sonnenzenithwinkel von 70° (durchgezogen: libRadtran mit Klucher, gestrichelt: libRadtran integrierte Radianzen) in Abhängigkeit von der AOD (links) und in Abhängigkeit vom Wasserdampfgehalt (rechts).

3.3.2 Untersuchung in Bezug auf den Bewölkungsgrad

Im Folgenden wird der Einfluss der SOLIS-Parametrisierungen für die spektral aufgelöste Global-, Direkt- und Diffusstrahlung auf die nach Klucher berechnete, spektral aufgelöste Einstrahlung auf eine geneigte Fläche untersucht. Dabei sollen die Einflüsse der Klucher-Methode von denen der SOLIS-Parametrisierung getrennt betrachtet werden. Hierzu wird die Direkt-

und Diffusstrahlung aus SOLIS und die auf die horizontale Fläche berechnete, spektrale Direkt- und Diffusstrahlung aus libRadtran auf eine geneigte Fläche umgerechnet und mit den über den Halbraum über dieser Fläche integrierten Radianzen verglichen.

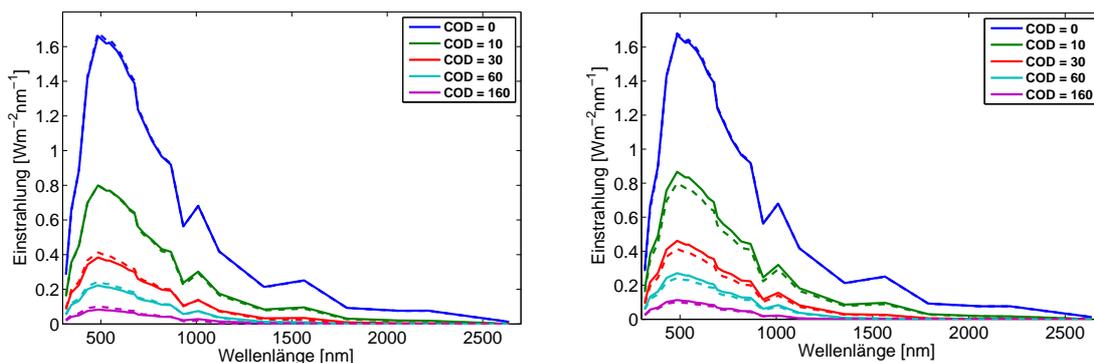


Abbildung 3.11: Spektrale Einstrahlung auf die geneigte Fläche in Abhängigkeit von COD bei einem Sonnenzenithwinkel von 30° unter Verwendung der Direkt- und Diffusstrahlung aus der SOLIS-Parametrisierung (links) und aus libRadtran unter Berücksichtigung des 5° -Bereichs der Zirkumsolarstrahlung (rechts) (durchgezogen: Klucher, gestrichelt: integrierte Radianzen)

Abbildungen 3.11 und 3.12 zeigen die Ergebnisse in Bezug auf den Bewölkungsgrad. Die spektrale Einstrahlung auf die geneigte Fläche in Abhängigkeit vom Bewölkungsgrad ist in Abbildung 3.11 bei einem Sonnenzenithwinkel von 30° dargestellt. Bei wolkenlosem Himmel ($COD = 0$) stimmt die spektrale Verteilung der mit Klucher umgerechneten Einstrahlung auf die geneigte Fläche gut mit den aus libRadtran integrierten Radianzen überein. Bei steigendem Bewölkungsgrad entsteht bei der Umrechnung der Einstrahlung auf die geneigte Fläche (Klucher aus libRadtran - Abb. 3.11 rechts) eine Überschätzung der Einstrahlung, die spektrale Verteilung wird allerdings gut wiedergegeben. Zur Verdeutlichung des Unterschieds ist in Abbildung 3.12 die normierte, spektrale Einstrahlung bei einem Sonnenzenithwinkel von 30° bzw. 70° sowie verschiedene Wolken-optischen Dicken dargestellt. Hier erkennt man, dass die Umrechnung auf die geneigte Fläche mit Klucher aus der horizontalen Einstrahlung aus libRadtran die spektrale Verteilung der integrierten Radianzen sehr genau wiedergibt (Abb. 3.12 rechts).

Die berechnete, spektrale Einstrahlung aus SOLIS zeigt bei einer $COD = 10$ eine leichte Überschätzung im infraroten Spektralbereich, bei steigendem Bewölkungsgrad wird zusätzlich die Einstrahlung im Bereich bis 1000 nm unterschätzt, wodurch die spektrale Verteilung sich insgesamt zu größeren Wellenlängen verschiebt (s. auch 3.12 links).

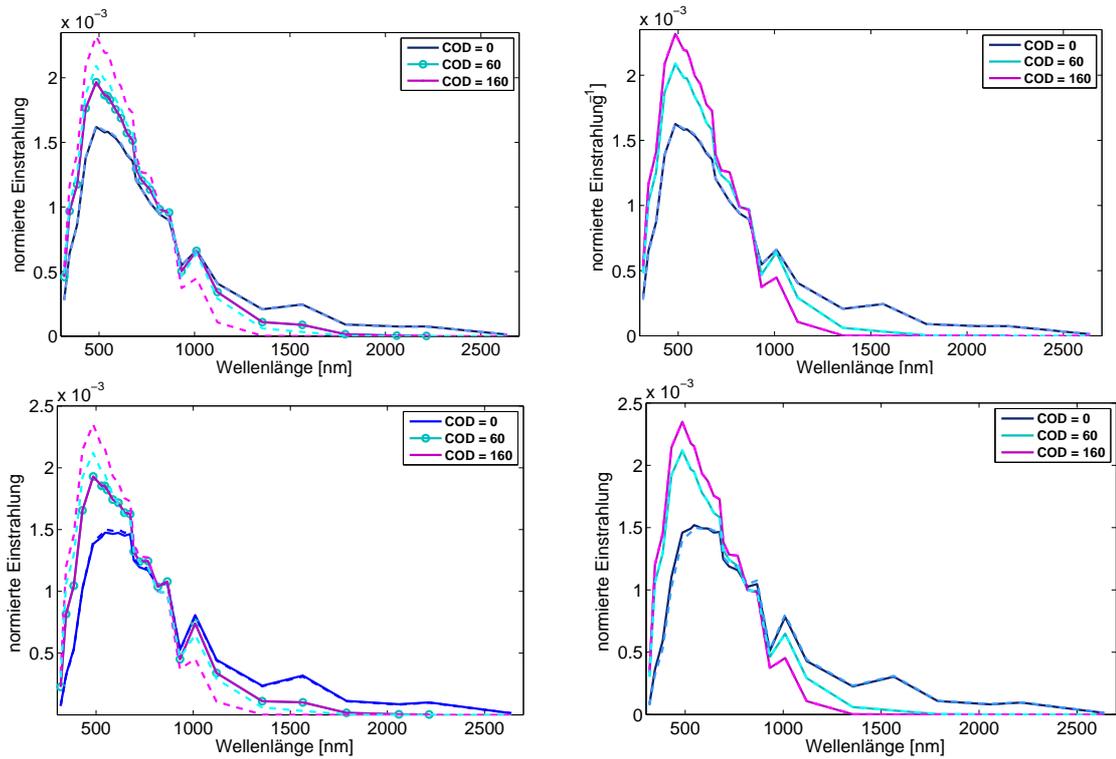


Abbildung 3.12: Spektrale Einstrahlung auf die geneigte Fläche in Abhängigkeit von COD bei einem Sonnenzenithwinkel von 30° (oben) und von 70° (unten) unter Verwendung der Direkt- und Diffusstrahlung aus der SOLIS-Parametrisierung (links) und aus libRadtran unter Berücksichtigung des 5°-Bereichs der Zirkumsolarstrahlung (rechts)(durchgezogen: Klucher, gestrichelt: integrierte Radianzen).

Bei einem Sonnenzenithwinkel von 70° zeigen sich bereits im Clearsky-Fall Abweichungen zwischen den mit Klucher umgerechneten spektralen Einstrahlungen (v.a. aus SOLIS) und den aus libRadtran integrierten Radianzen (Abb. 3.12 unten). Mit Klucher aus libRadtran wird der sichtbare Spektralbereich leicht überschätzt, aus SOLIS deutlich unterschätzt. Bei zunehmender Wolken-optischer Dicke stimmt die spektrale Verteilung der aus libRadtran mit Klucher umgerechneten Einstrahlung wieder mit den integrierten Radianzen überein (Abb. 3.12 unten links). Die aus SOLIS berechnete Einstrahlung auf die geneigte Fläche weist eine Verschiebung zu größeren Wellenlängen auf.

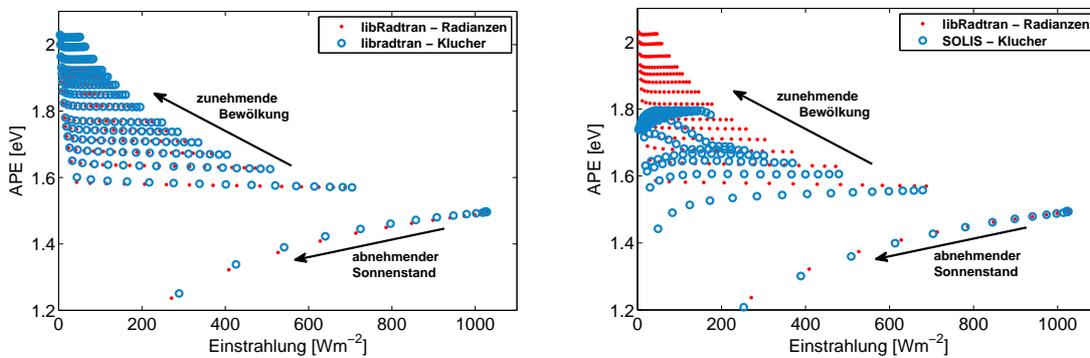


Abbildung 3.13: Mittlere Photonenergie der Einstrahlung auf die geneigte Fläche bei variierendem Sonnenstand und Bewölkungsgrad. Aus libRadtran unter Berücksichtigung des 5° -Bereichs der Zirkumsolarstrahlung (links) und der Direkt- und Diffusstrahlung aus der SOLIS-Parametrisierung (rechts) im Vergleich zur Integration der Radianzen aus libRadtran.

Die mittlere Photonenergie der Einstrahlung auf die geneigte Fläche ist in Abbildung 3.13 über der Breitbandeinstrahlung aufgetragen. Mit der spektralen Global- und Diffusstrahlung aus SOLIS wird die APE der Einstrahlung auf die geneigte Fläche zum Teil sehr stark unterschätzt (Abb. 3.13 rechts). Bei wolkenlosem Himmel und kleinem Sonnenzenithwinkel ist die Unterschätzung gering, bei zunehmender Bewölkung und abnehmendem Sonnenstand nimmt die Abweichung zu. Es zeigt sich, dass durch die Umrechnung der spektralen Einstrahlung auf die horizontale Fläche aus libRadtran mit Klucher die APE im Clearsky-Fall, vor allem bei hohem Sonnenzenithwinkel, überschätzt wird (3.13 links). Dies entspricht der in Kap. 3.3.1 für den wolkenlosen Fall gezeigten Überschätzung der Diffusstrahlung. Bei bewölktem Himmel wird die APE durch die Klucher-Umrechnung kaum beeinflusst.

In der Abbildung 3.14 (oben) werden die beschriebenen Beobachtungen

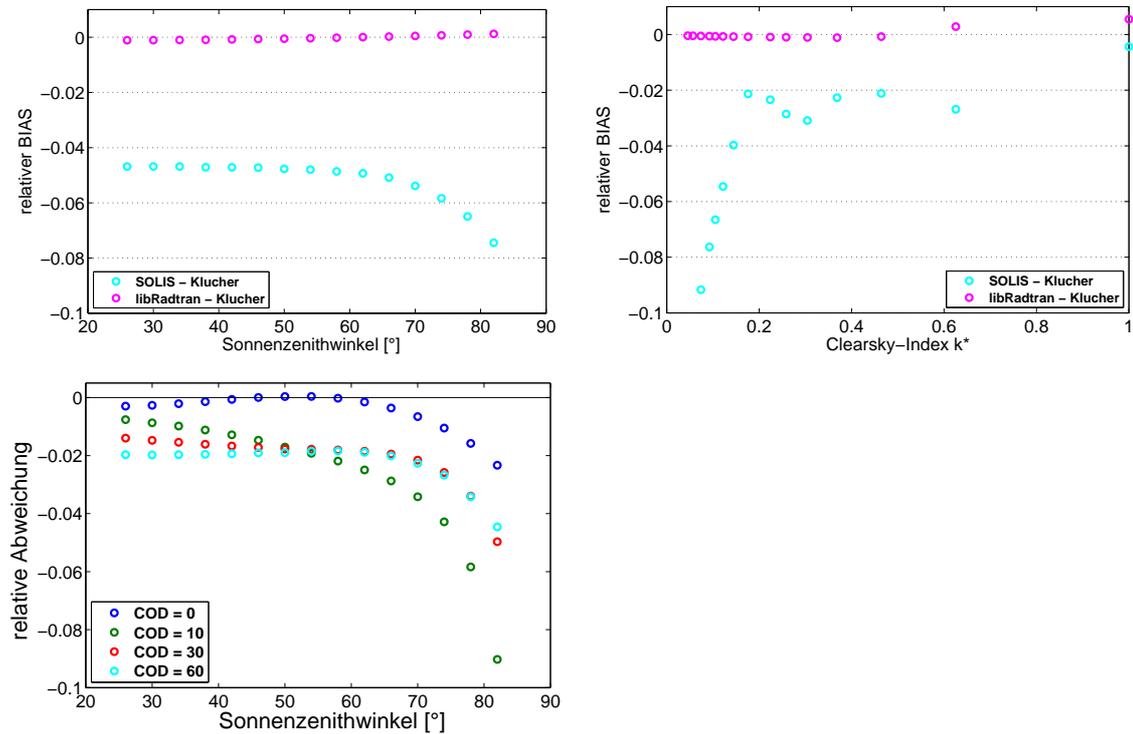


Abbildung 3.14: Relativer BIAS der mittleren Photonenergie durch die Umrechnung auf die geneigte Fläche nach Klucher mit Diffus- und Globalstrahlung aus SOLIS und aus libRadtran in Abhängigkeit vom Sonnenzenithwinkel (oben links) und vom Clearsky-Index (oben rechts), sowie relative Abweichung unter Verwendung der SOLIS-Parametrisierung in Abhängigkeit vom Sonnenzenithwinkel für verschiedene Werte der Wolken-optischen Dicke (COD) (unten links).

anhand des relativen BIAS der APE über den Sonnenzenithwinkel (alle Bewölkungssituationen gemittelt) bzw. über dem Clearsky-Index (alle Sonnenzenithwinkel gemittelt) zusammengefasst. Die APE der mit Klucher umgerechneten Einstrahlung aus libRadtran zeigt einen sehr geringen relativen BIAS ($\ll 1\%$), mit etwas schlechteren Werten bei wolkenlosem Himmel (relativer BIAS $\approx 0,5\%$ bei $k^* = 1$). Die APE der mit Klucher umgerechneten Einstrahlung aus SOLIS zeigt einen wesentlich deutlicheren BIAS bei großem Sonnenzenithwinkel ($-7,5\%$ bei 82° SZA) und bei starker Bewölkung (-9% bei $k^* = 0.05$). Der Verlauf der relativen Abweichung über den Sonnenzenithwinkel in Abbildung 3.14 (unten links) entspricht bei wolkenlosem Himmel dem, der sich bereits für die Direktstrahlung aus SOLIS auf die horizontale Fläche gezeigt hat (Kapitel 3.2, Abb. 3.7), mit einer leichten Überlagerung mit der Abweichung der APE der Diffusstrahlung. Bei zunehmender Bewölkung steigt der Einfluss der Diffusstrahlung, so dass die Abweichung der APE auch zunehmend durch die der APE aus der Diffusstrahlung in SOLIS bestimmt wird.

Die Ergebnisse dieses Kapitels haben gezeigt, dass die Klucher-Parametrisierung für die Umrechnung spektral aufgelöster Einstrahlung auf die geneigte Fläche gut geeignet ist. Nur im wolkenlosem Fall ist eine Überschätzung der Diffusstrahlung und somit eine Verschiebung der spektralen Verteilung zu kürzeren Wellenlängen zu beobachten. Voraussetzung für die Umrechnung ist, dass der Diffusanteil auf die horizontale Fläche für die einzelnen Wellenlängen richtig wiedergegeben wird. Da die APE des Direktanteils durch die SOLIS-Parametrisierung unterschätzt wird, wird diese auch bei der Einstrahlung auf die geneigte Fläche mit Klucher unterschätzt. Bei zunehmender Bewölkung findet sich bei der Einstrahlung auf die geneigte Fläche dieselbe Unterschätzung der APE, die bereits für die Diffusstrahlung auf die horizontale Fläche in solchen Situationen gezeigt wurde.

Kapitel 4

Datenbasis

Zur Bewertung der verwendeten Modelle wurde die berechnete, spektral aufgelöste Einstrahlung anhand von gemessenen Spektren validiert. Die hierfür zur Verfügung stehenden spektralen Bodenmessungen werden in Kapitel 4.1 zusammengestellt. Neben spektralen Einstrahlungsmessungen an anderen Standorten wurden eigene Messungen an der Universität Oldenburg durchgeführt, die neben der spektralen Einstrahlung auch Messungen des Kurzschlussstroms verschiedener PV-Technologien umfassen. Details zum Messaufbau werden in 4.1.1 beschrieben. Die untersuchten Standorte unterscheiden sich neben der unterschiedlichen Ausrichtung der Einstrahlungsmessung (horizontal oder geneigt) und dem zur Verfügung stehenden Messzeitraum (wenige Monate bis zu einem Jahr) in der vorherrschenden Strahlungssituation aufgrund ihrer geographischen Lage. Die Wettersituation an den einzelnen Standorten wird in 4.1.3 beschrieben.

Als Grundlage zur Berechnung der spektralen Einstrahlung werden Informationen über die atmosphärische Zusammensetzung benötigt, die z.B. aus Klimatologien oder Bodenmessungen erhalten werden. Die verwendeten Datenquellen werden in 4.2 aufgeführt.

4.1 Zusammenstellung der zur Auswertung verfügbaren spektralen Messungen

Die berechnete, spektrale Einstrahlung wurde anhand von Bodenmessungen in Loughborough (UK), Stuttgart und Oldenburg ausgewertet. Die verschiedenen Standorte, ihre geographische Lage, die Ausrichtung der Messeinrichtung und der jeweilige Messzeitraum sind in der Tabelle 4.1 zusammengefasst. Am Center for Renewable Energy Technologies (CREST) an der Universität **Loughborough** wurde die spektrale Einstrahlung auf eine

geneigte Fläche über einen Zeitraum von September 2003 bis August 2004 ca. alle 10 bis 20 min. gemessen. Es wurde ein scannendes Spektralradiometer (Monochromator mit zwei Detektoren) verwendet, das für einen Wellenlängenbereich von 300 bis 1700 nm eine Abscanzeit von etwa zwei Minuten benötigt. Die Wellenlängenauflösung bei diesem Datensatz beträgt 10 nm.

Am Institut für physikalische Elektronik (IPE) in **Stuttgart** wurde die spektrale Einstrahlung im Bereich 300 - 1700 nm mit einer Auflösung von 2 nm, ebenfalls auf eine geneigte Fläche über einen Zeitraum von einem Jahr (2008) gemessen. Hier wurden zwei Array-Spektralradiometer verwendet, eines mit einem Silizium-Detektor-Array, das den kurzwelligen Spektralbereich abdeckt, ein weiteres mit einem InGaAs-Detektor-Array für den langwelligen Spektralbereich.

An der Universität **Oldenburg** wurde 4 Monate die Einstrahlung auf die horizontale Fläche im Bereich 250 nm bis 1700 nm mit einer Auflösung von 1 nm gemessen (für Details über den Messaufbau siehe Kap. 4.1.1).

Tabelle 4.1: Übersicht über die zur Validierung verwendeten spektral aufgelösten Einstrahlungsmessungen

| Standort | Länge [°O] | Breite [°N] | Neigung [°] | Ausrichtung [°] | Zeitraum |
|--------------|---------------|----------------|----------------|--------------------|-----------------|
| Loughborough | -1.23 | 52.77 | 52.77 | 170 | Sep 03 - Aug 04 |
| Stuttgart | 9.11 | 48.75 | 33 | 180 | Jan - Dez 08 |
| Oldenburg | 8.17 | 53.15 | 0 | - | Jul 10 - Okt 10 |

Aus den vorliegenden spektralen Einstrahlungsmessungen wurden Stundenmittelwerte gebildet. Da die zeitliche Auflösung der Messung in Loughborough mit 20 Minuten gering ist, wurden zur Bildung der Stundenmittelwerte auch Messungen aus 10 Minuten vor und nach der betrachteten Stunde mit einbezogen. Dabei wurden diese Spektren entsprechend abhängig von der Minute t in der gemessen wurde schwächer gewichtet:

$$\overline{G(\lambda)} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i^w \cdot G(\lambda)}{n \sum_{i=1}^n f_i^w} \quad (4.1)$$

mit

$$\begin{aligned} f_i^w &= 10 \quad \forall \quad 10 < t \leq 50, \\ f_i^w &= t \quad \forall \quad t \leq 10, \\ f_i^w &= |60 - t| \quad \forall \quad t > 50. \end{aligned} \quad (4.2)$$

An den anderen Standorten wurden trotz höherer zeitlicher Auflösung die Stundenmittelwerte ebenfalls wie oben beschrieben berechnet.

4.1.1 Eigene Messungen

Die Messung der spektralen Einstrahlung in Oldenburg wurde mit dem Spektralradiometer SPECTRO320 der Firma Instrument Systems durchgeführt. Eine schematische Darstellung des Aufbaus innerhalb des Spektralradiometers ist in Abb. 4.1 gegeben. Es handelt sich um ein scannendes Gerät mit einem Monochromator und drei Detektoren mit jeweils verschiedenen Gittern (s. Tabelle 4.2): Einen Photomultiplier (PMT) mit einer GaAs-Kathode für den Bereich 190 nm bis 930 nm, einem Indium-Gallium-Arsenid-Detektor (InGaAs), der den Bereich 800-1700 nm abdeckt, und einem Blei-Selenid-Detektor (PbSe) für 1050 nm bis 5 μm . Das Sonnenlicht wird mit einer Ulbricht-Kugel eingekoppelt, die mit einer nahezu Cosinus-Charakteristik den gesamten Halbraum erfasst. Sie wurde für den Wellenlängenbereich 190 nm bis 1700 nm kalibriert. Daher werden zur Erfassung des Sonnenspektrums nur der PMT und der InGaAs-Detektor verwendet. Die Messungen erfolgen in Intervallen von ca. 1 Minute mit einer Auflösung von 1 nm. Aufgrund der nicht witterungsfesten Auslegung der Einkoppeloptik ist die Messung auf regenlose Situationen mit einer relativen Luftfeuchtigkeit unter 85% begrenzt.

Die Steuerung des Spektralradiometers erfolgt mit der vom Hersteller bereitgestellten Software SpecWin Pro. Dabei werden die Messparameter wie in Tabelle 4.3 aufgeführt festgelegt. Die Auswahl der Parameter erfolgte dabei zum Teil anhand der Empfehlungen des Herstellers, wie z.B. die PMT-Stufe 3, bei der auch die Kalibrierung durchgeführt wurde und die Schrittweite, die möglichst im Bereich $\frac{1}{5}$ des Bandpasses liegen soll. Innerhalb des Spektrometers ist die Wahl zwischen vier verschiedenbreiten Spalten möglich. Hier wurde der größte gewählt um eine ausreichende Aussteuerung zu gewährleisten. Bei einer Einstrahlung $<100 \text{ Wm}^{-2}$ kommt es zu Untersteuerung des InGaAs-Detektors, bei $>500 \text{ Wm}^{-2}$ wird der PMT übersteuert. In diesem Fall wird während der Messung mit dem Photomultiplier ein Dichtefilter in den Strahlengang durch das Spektrometer hinzugefügt. Die Scangeschwindigkeit (in ms/nm) wurde möglichst klein gewählt, da Voruntersuchungen ergaben, dass ihr Einfluss auf die Messung geringer ist als der Einfluss variierender Einstrahlungsverhältnisse während der Messung.

Vor Beginn einer Messreihe und bei Umschalten des Dichtefilters wurde der Dunkelstrom bestimmt. Dieser ist stark von der Betriebstemperatur des Spektralradiometers abhängig und kann innerhalb eines Tages um mehrere Größenordnungen variieren. Eine automatische Bestimmung des Dunkelstroms vor jeder Einzelmessung oder zumindest deutlich häufiger während einer Dauermessung ist mit der gegebenen Software nicht möglich.

Neben der spektral aufgelösten Einstrahlungsmessung wurde im Rahmen

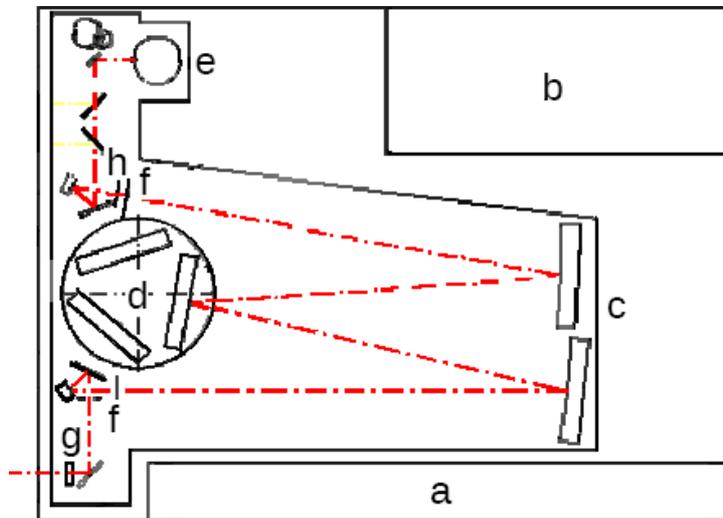


Abbildung 4.1: Aufbau des Spektralradiometers SPECTRO320: rot-gestrichelt: Strahlengang durch das Spektrometer, a) Netzteil, b) Platinen, c) Monochromator-Detektor-Einheit, d) Gitter, e) Detektoren, f) Eingangs- und Ausgangsspalt, g) Dichtefilter, h) Kantenfilter - nach: [GmbH, 2005]

Tabelle 4.2: Gitter und Detektoren im SPECTRO320

| Gitter | Detektor | Wellenlängenbereich |
|-------------------------|----------|---------------------|
| 1200 l mm ⁻¹ | PMT | 190 - 930 nm |
| 600 l mm ⁻¹ | InGaAs | 800 - 1700 nm |
| 325 l mm ⁻¹ | PbSe | 1050 - 5000 nm |

einer Diplomarbeit [Kühnert, 2011] ein Messaufbau entwickelt, der synchron dazu das Leistungsverhalten verschiedener Solarzellentypen unter natürlichen Strahlungsbedingungen erfasst. Zum Vergleich stehen hier Messungen des Kurzschlussstroms in Minutenaufösung von

- zwei polykristallinen Silizium-
- zwei amorphen Silizium-
- einem Kupfer-Indium-Diselenid- sowie
- einem Tandem-Modul aus amorphen und mikrokristallinen Silizium

zur Verfügung. Zusätzlich wurde die Globalstrahlung mit einem 'Kipp und Zonen CM-11'-Pyranometer erfasst. Das Pyranometer und die Einkoppeloptik des Spektralradiometers sind auf dem Modulrahmen in horizontaler

Tabelle 4.3: Festlegung der Messparameter zur Erfassung der spektralen Einstrahlung

| | |
|---------------------|---|
| Wellenlängenbereich | 250 - 1700 nm |
| Bandpass | 5 nm (PMT), 10 nm (InGaAs) |
| Schrittweite | 1 nm |
| Scangeschwindigkeit | 20 ms/nm |
| PMT-Stufe | 3 |
| Dichtefilter | OD1 (PMT) bei $G > 500 \text{ Wm}^{-2}$ |

Ebene angebracht. Ergebnisse dieser Messungen wurden verwendet, um den Einfluss der spektralen Einstrahlung auf den Kurzschlussstrom der verschiedenen PV-Materialien zu untersuchen.

4.1.2 Messunsicherheiten und Qualitätskontrolle

Voraussetzung für die Validierung ist eine hohe Qualität der Bodenmessungen. Dies setzt zum Einen eine regelmäßige Kalibrierung und Wartung des Messaufbaus und eine anschließende Qualitätskontrolle voraus. Die verwendeten Spektralradiometer wurden jeweils im Vorfeld inklusive der jeweiligen Einkoppeloptik und Glasfaser kalibriert. In **Loughborough** wurde das Spektralradiometer vor Ort kalibriert. Aus der Kalibrierung geht insgesamt eine Messunsicherheit von $\pm 5\%$ im Wellenlängenbereich 300 bis 1700 nm hervor (s. Abb. 4.3). Die Daten wurden nach der Messung einer dreistufigen Qualitätskontrolle unterzogen (Details hierzu in [Betts, 2004]). Die eingesetzten Geräte in **Oldenburg** und **Stuttgart** wurden jeweils vom Hersteller kalibriert aus [Zinßer, 2010], wobei nur für das Gerät in Oldenburg eine wellenlängenaufgelöste Messunsicherheit aus dem Kalibrierungszertifikat bekannt ist (s. Abb. 4.4). In **Stuttgart** sind die Messungen ebenfalls bereits vorweg qualitätskontrolliert worden.

Für die eigenen Messungen in **Oldenburg** wurden folgende Qualitätskriterien festgelegt: Es wurden nur die Spektren ausgewertet, bei denen

- die Aussteuerung beider Detektoren ausreichend ist, d.h. PMT-Aussteuerung > 500 counts und die InGaAs-Aussteuerung > 5 counts und
- die über den gesamten Spektralbereich integrierte Einstrahlung zwischen 0 und 2000 Wm^{-2} beträgt.

Aufgrund der geringen Empfindlichkeit der Detektoren am Rand des gemessenen Spektralbereichs zeigen die Spektren in den Bereichen < 290 nm



Abbildung 4.2: Messaufbau an der Universität Oldenburg. Das Spektrometer befindet sich in einem feuchtigkeitsgeregelten Schrank (a). Im Hintergrund (b) ist das Pyranometer und die Ulbricht-Kugel zur Einkoppelung des Sonnenlichts am Modulrahmen befestigt. Die Messtechnik zur synchronen Erfassung der Modulparameter [Kühnert, 2011] befindet sich in dem zweiten Schaltschrank (c).

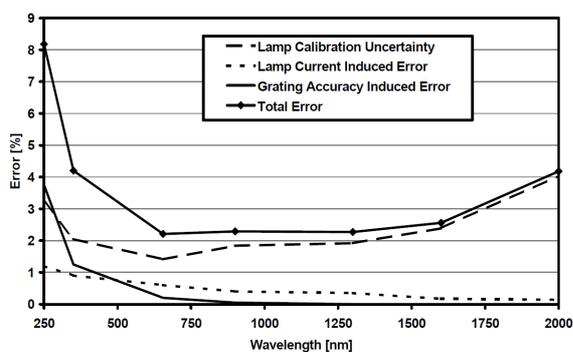


Abbildung 4.3: Spektral aufgelöste Messunsicherheit des in Loughborough eingesetzten Spektralradiometers [Betts, 2004].

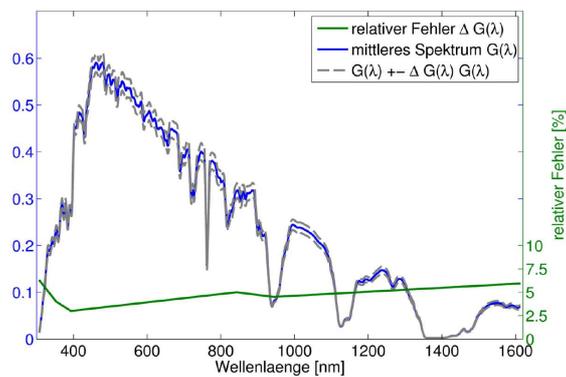


Abbildung 4.4: Spektral aufgelöste Messunsicherheit des in Oldenburg eingesetzten Spektrometers (aus dem Kalibrierungszertifikat). Anwendung dieses Fehlers per Größtfehlermethode auf das mittlere Spektrum der Messreihe von Juli bis Oktober 2010 [Kühnert, 2011].

und > 1630 nm stark ansteigende Werte. Daher wurde nur der Bereich zwischen diesen Grenzen als vertrauenswürdig eingeschätzt und ausgewertet. Des Weiteren wurden nur die Stundenmittelwerte verwendet, die aus mindestens 60 Spektren gebildet wurden. Zur Überprüfung der gemessenen Spektren wurden sie, wie auch die modellierten Spektren, integriert und mit den Pyranometermessungen verglichen. Da ein Pyranometer über einen wesentlich größeren Spektralbereich empfindlich ist, als der mit dem Spektralradiometer gemessene, ist eine Unterschätzung der Globalstrahlung durch die Integration der Spektren zu erwarten. Der Vergleich der integrierten, spektralen Einstrahlung zur Pyranometermessung am Standort Stuttgart ist in Abb. 4.5 gegeben. Hier liegt die Abweichung im Mittel bei 8%.

Um die erwartete Abweichung abzuschätzen wurden die modellierten Spektren zum einen über den Bereich 307-3002 nm (Empfindlichkeitsbereich eines Pyranometers) integriert, zum anderen über den Bereich 307-1613 nm (Integrationsbereich der gemessenen spektralen Einstrahlung). In Tabelle 4.4 ist die Auswertung der integrierten spektralen Einstrahlung zusammengefasst. Für den Integrationsbereich 307-3002 nm stimmt die mit SOLIS berechnete Einstrahlung gut mit den Pyranometermessungen überein, der BIAS ist kleiner als 1%, mit dem Shettle-Typ "rural" sogar kleiner als 0,1%. Durch die Verkleinerung des Integrationsbereich auf 307-1630 nm verringert sich die Breitband-Einstrahlung um ca. 7%. Die Abweichung der integrierten Spektrometermessungen beträgt mehr als 14% und ist somit wesentlich höher als durch den kleineren Integrationsbereich erwartet. In [Kühnert, 2011] wurde der Einfluss der spektralen Messunsicherheit auf die integrierte Einstrahlung mit 6% abgeschätzt. Es konnte kein zeitlicher Trend der Abweichung, der auf eine Dekalibrierung schließen ließe, festgestellt werden. Im Anhang (Abb. 7.4) sind die mittleren Spektren aus den Bodenmessungen und SOLIS (unter Verwendung des ländlichen Aerosoltyps) normiert und für verschiedene Bewölkungs- und Sonnenstandsklassen dargestellt. Es lässt sich keine systematische Abweichung für bestimmte Situationen feststellen. Die spektrale Verteilung der gemessenen Spektren erscheint, trotz der starken Abweichung zur Pyranometermessung, plausibel.

4.1.3 Charakterisierung der Strahlungssituation an den untersuchten Standorten

Zur Beschreibung der Strahlungssituation während des Auswertungszeitraums sind in Abbildung 4.6 die Häufigkeitsverteilungen der mit SOLIS berechneten Globalstrahlung, des Sonnenstands und des Bewölkungsgrads (anhand des Clearsky-Index k^*) an den untersuchten Standorten Loughborough,

Tabelle 4.4: Auswertung der Breitband-Einstrahlung am Standort Oldenburg. Vergleich zur Pyranometermessung (im Mittel $401,85 \text{ W m}^{-2}$).

| | Mittelwert $\int G(\lambda)d\lambda$ [W m^{-2}] | BIAS [W m^{-2}] | RMSE [W m^{-2}] | BIAS relativ [%] | RMSE relativ [%] |
|-------------------------|--|-------------------------------|-------------------------------|------------------------|------------------------|
| 307-1613 nm | | | | | |
| Messung Spektrometer | 342,90 | -58,94 | 84,4 | -14,67 | 21 |
| SOLIS maritim | 374,29 | -27,55 | 84,74 | -6,86 | 21,09 |
| SOLIS rural | 370,47 | -31,08 | 86,01 | -7,73 | 21,4 |
| 307-3002 nm | | | | | |
| SOLIS maritim | 405,53 | 3,68 | 80,23 | 0,92 | 19,97 |
| SOLIS rural | 402,22 | 0,37 | 80,08 | 0,09 | 19,93 |

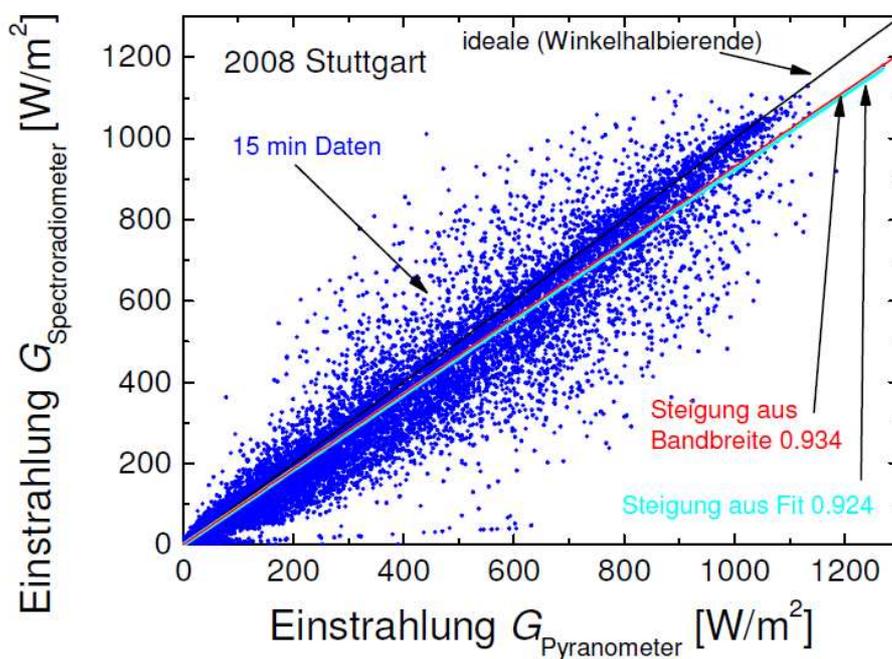


Abbildung 4.5: Vergleich der gemessenen, spektral integrierten Einstrahlung mit der Pyranometermessung in Stuttgart. Erstellt von Bastian Zinßer.

Stuttgart und Oldenburg dargestellt.

In Stuttgart und z.T. auch in Loughborough fließen überwiegend Situationen mit geringer Einstrahlung, vor allem verursacht durch mittlere und niedrige Sonnenstände, in die Auswertung ein. In Oldenburg sind durch die zu geringe Aussteuerung zumindest eines Detektors weniger Messungen bei geringer Einstrahlung verfügbar. Auch in Loughborough sind Situationen mit geringen Einstrahlungen ($<100 \text{ Wm}^{-2}$) etwas weniger häufig vertreten als Situationen mit Einstrahlungen im Bereich $100\text{-}150 \text{ Wm}^{-2}$.

Die Verteilung der Sonnenstände zeigt, dass in Stuttgart im Mittel die Häufigkeit der Situationen mit abnehmenden Sonnenstand zunimmt, in Loughborough und Oldenburg nimmt sie wiederum bei kleineren Sonnenständen ab.

Die Verteilung des Clearsky-Index k^* zeigt in Stuttgart einen typischen Verlauf: Es ist ein deutlicher Peak bei wolkenlosem Himmel ($k^* = 1$), sowie eine Häufung der Situationen mit vollständiger Bewölkung ($k^* \approx 0.2$) zu erkennen. Auch in Oldenburg und Loughborough zeigt sich der Clearsky-Peak, hier sind allerdings Situationen mit wechselnder Bewölkung ($k^* \approx 0.7$) häufig vertreten. Für kleine k^* -Werte stehen an diesen Standorten weniger Messungen zur Verfügung.

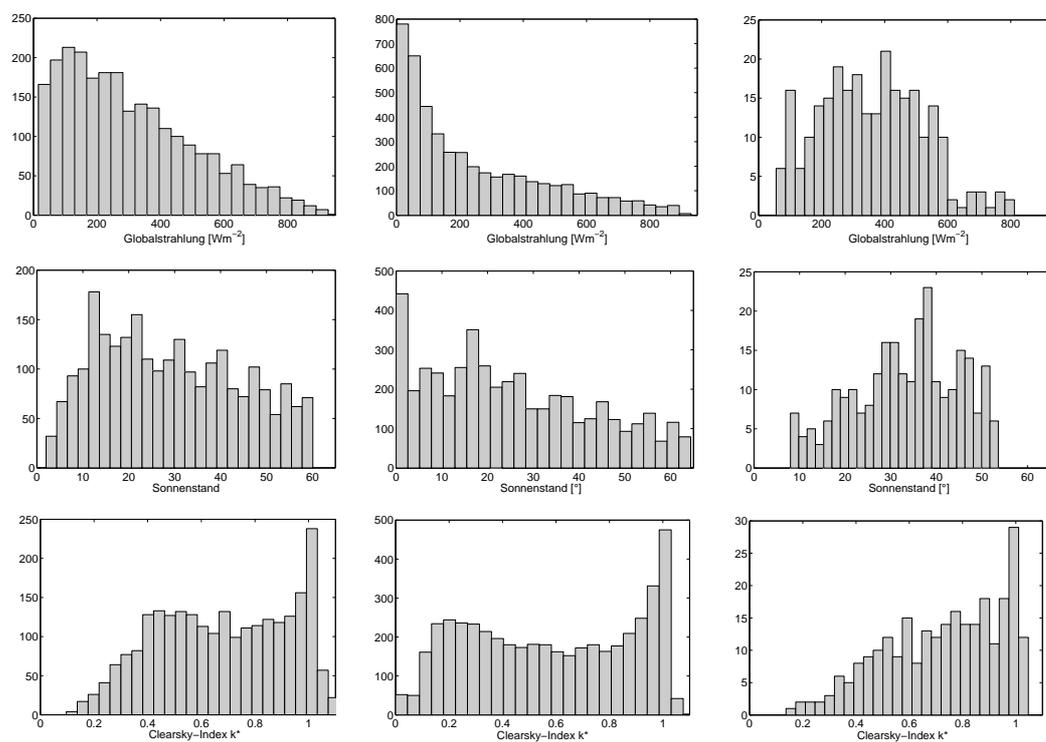


Abbildung 4.6: Charakterisierung der Strahlungssituation während des Auswertungszeitraums an den Standorten Loughborough (links), Stuttgart (Mitte) und Oldenburg (rechts): Histogramme der Globalstrahlung (oben), des Sonnenstands (Mitte) und des Clearsky-Index (unten) auf Basis der Stundenmittelwerte.

4.2 Datensätze der Atmosphärenparameter

Zur Bestimmung der atmosphärischen Zusammensetzung als Eingangsparameter für das Clearsky-Modell wird auf Klimatologien zurückgegriffen, wodurch mit einer globalen Abdeckung der Jahresgang der Parameter mittels Monatsmittelwerten beschrieben wird. Die Werte unterscheiden sich zwischen Klimatologien meist, da unterschiedliche Datensätze die Grundlage zur Erstellung der Klimatologien bilden. Daher wurden in dieser Arbeit verschiedene Datensätze verwendet und miteinander verglichen (s. Tab. 4.5).

Die zur Verfügung stehenden Aerosolklimatologien des NASA/GISSs (hervorgegangen aus dem Global Aerosol Climatology Project (im Weiteren: GACP-Klimatologie) und des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (AEROCOM-Klimatologie) liefern monatliche Werte der Aerosol-optische Dicke bei 550 nm.

Im Rahmen des Projekts AEROCOM [Kinne et al., 2003], [Kinne et al., 2005] wurden 16 verschiedene Modelle für Aerosoleigenschaften verglichen. Die Modelle wurden auf eine $1^\circ \times 1^\circ$ -Auflösung angepasst und aus den monatlichen Medianwerten der Aerosol-optischen Dicke, der Single-Scattering Albedo und des Angströmparameters Aerosolfelder entwickelt. Diese wurden mit Datensätzen von Bodenmessungen (AERONET) und Satellitenmessungen zu einer Klimatologie kombiniert [Kinne, 2005].

Das Global Aerosol Climatology Project (GACP) ist 1998 aus dem NASA Radiation Program und dem Global Energy Water cycle Experiment (GEWEX) hervorgegangen [Mishchenko et al., 2002]. Die Klimatologie basiert auf Satellitendaten (AVHRR, TOMS), die mit chemischen Transportmodellen kombiniert wurden. Die GACP-Klimatologie hat eine Auflösung von 4° Länge \times 5° Breite, die auf $1^\circ \times 1^\circ$ interpoliert wurde.

Neben den Klimatologien werden Bodenmessungen des AERONET (Aerosol RObotic NETwork) verwendet. AERONET ist ein Netzwerk an Bodenmessstationen mit standardisierten Instrumenten und Datenarchiv für optische Aerosoleigenschaften (unter anderem Aerosol-optische Dicke und Angströmparameter) und wird von der NASA unterstützt. Da Wolken das Signal zu stark überlagern sind die Messungen nur bei wolkenlosem Himmel möglich. Die Verfügbarkeit der Messwerte ist also durch Bewölkung eingeschränkt.

Der Wasserdampfgehalt wird aus der NVAP-Klimatologie (NASA Water Vapor Project) bestimmt [Randel et al., 1996]. Sie beruht auf Satelliten- und Radiosondenmessungen und weist ebenfalls eine $1^\circ \times 1^\circ$ -Auflösung auf. Der Ozongehalt wurde zum Teil konstant gehalten, während er bei der Auswertung des MAGIC-Verfahrens aus satellitenbasierten Messungen (TOMS-OMI) stammt, die online verfügbar sind.

Tabelle 4.5: Übersicht über verwendete Modelle und Datensätze für die atmosphärischen Parameter an den verschiedenen Standorten

| Standort | Clearsky Modell | geneigte Fläche | Atmosphäreninput: | | | | WV | O ₃ |
|--------------|-----------------|-----------------|-------------------|--------------|----------------|------|----------|----------------|
| | | | AOD | SSA, β | Shettle-Typen | | | |
| Oldenburg | SOLIS | - | GACP | - | rural, maritim | NVAP | 300 DU | |
| | MAGIC | Klucher | AEROCOM | AEROCOM | - | NVAP | TOMS-OMI | |
| | SOLIS | Klucher | AEROCOM | AEROCOM | - | NVAP | TOMS-OMI | |
| Stuttgart | SOLIS | Klucher | GACP | - | rural, urban | NVAP | 300 DU | |
| | MAGIC | Klucher | AEROCOM | AEROCOM | - | NVAP | TOMS-OMI | |
| | SOLIS | Klucher | AEROCOM | AEROCOM | - | NVAP | TOMS-OMI | |
| Loughborough | SOLIS | Klucher | AERONET | - | rural | NVAP | 275 DU | |
| | SOLIS | Klucher | AERONET | - | rural | NVAP | 275 DU | |
| | libRadtran* | Integration | AERONET | - | rural | NVAP | 275 DU | |

* nur Clearsky

Kapitel 5

Auswertungskonzept

Zur Modellierung des Kurzschlussstroms verschiedener Modultypen aus Satellitendaten sind mehrere Schritte nötig (s. Abb. 5.1). Die einzelnen Modellierungsschritte werden in dieser Arbeit überprüft. Das zu Grunde liegende Konzept der Auswertung wird im Folgenden beschrieben.

In einem ersten Schritt wird entsprechend der atmosphärischen Zusammensetzung, dem Sonnenstand und dem Bewölkungsgrad die spektrale Einstrahlung auf die horizontale Fläche bestimmt. Die verwendeten Clearsky-Modelle SOLIS-Clearsky und MAGIC basieren auf dem Strahlungstransportmodell libRadtran. Sie beinhalten beide die Modified-Lambert-Beer-Parametrisierung (MLB) des Tagesgangs der Einstrahlung sowie die Parametrisierung der Global- und Direktstrahlung in Abhängigkeit vom Clearsky-Index (s. Kap. 2.3).

Die Auswertung der berechneten, spektralen Einstrahlung unter Verwendung beider Clearsky-Modelle (MAGIC, SOLIS) erfolgt anhand der Einstrahlungsmessungen an den drei zur Verfügung stehenden Stationen (s. Kapitel 4.1) mit verschiedenen Eingangsoptionen (s. Kapitel 4.2) für die atmosphärische Zusammensetzung. In Kapitel 5.1 wird zunächst auf die verwendeten Fehlermaße eingegangen. Im Weiteren wird die Auswertung in Abhängigkeit von der Wettersituation erläutert.

Im letzten Schritt wird aus der spektralen Einstrahlung auf die (geneigte) Modulebene der erwartete Kurzschlussstrom für das verwendete Halbleitermaterial berechnet und (am Standort Oldenburg) mit gemessenen Kurzschlussströmen ausgewertet.

Die Validierung des MAGIC-Verfahrens bezieht sich nur auf die Auswertung der spektralen Einstrahlung. Hierfür wurden einige Details genauer untersucht und neben der Validierung anhand von Bodendaten ein direkter Vergleich zwischen MAGIC und SOLIS unter Verwendung des selben Eingangssatzes für die atmosphärische Zusammensetzung durchgeführt. Details

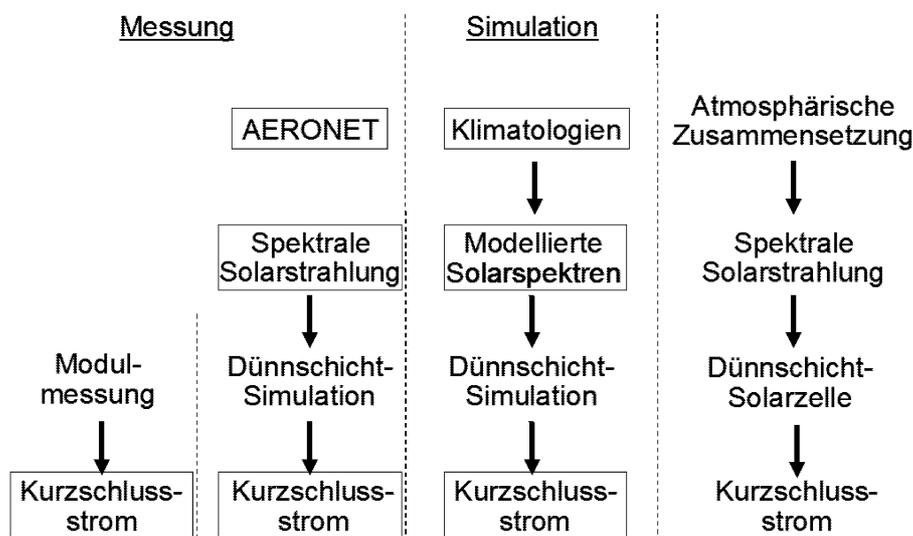


Abbildung 5.1: Übersicht über das Auswertungskonzept. Die verschiedenen Schritte, die zur Simulation des Kurzschlussstroms erforderlich sind, werden anhand von Messungen überprüft.

hierzu sind in Kapitel 5.1.3 zu finden.

5.1 Auswertung der spektralen Einstrahlung

Die Qualität der berechneten, spektral aufgelösten Einstrahlung wird in dieser Arbeit auf verschiedene Weise überprüft. Sie wird direkt anhand von Bodenmessungen validiert, wobei neben den mittleren Spektren über den gesamten Messzeitraum die mittleren Spektren der wolkenlosen Situationen untersucht werden.

Zur Auswertung werden aus den gemessenen Spektren Stundenmittelwerte gebildet, da dieses der Satellitenausgabe entspricht. Die spektrale Auflösung wird an die Katobänder der berechneten Spektren angepasst.

5.1.1 Fehlermaße

Die mittlere Abweichung der modellierten, spektralen Einstrahlung $G_{mod}(\lambda)$ von der gemessenen $G_{mess}(\lambda)$ wird mit dem wellenlängen-

abhängigen BIAS beschrieben:

$$\begin{aligned} BIAS_{abs}(\lambda) &= \overline{G_{mod}(\lambda) - G_{mess}(\lambda)}, \\ BIAS_{rel}(\lambda) &= \frac{\overline{G_{mod}(\lambda) - G_{mess}(\lambda)}}{G_{mess}(\lambda)}. \end{aligned} \quad (5.1)$$

Hiermit können systematische Abweichungen, wie Verschiebung zu längeren, bzw. kürzeren Wellenlängen detektiert werden. Der RMSE, die Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung, bewertet neben dem BIAS auch die Streuung σ der Messwerte:

$$\begin{aligned} RMSE_{abs}(\lambda) &= \sqrt{BIAS(\lambda)^2 + \sigma(G_{mod}(\lambda) - G_{mess}(\lambda))^2}, \\ RMSE_{rel}(\lambda) &= \frac{\sqrt{BIAS(\lambda)^2 + \sigma(G_{mod}(\lambda) - G_{mess}(\lambda))^2}}{G_{mess}(\lambda)}. \end{aligned} \quad (5.2)$$

$\sigma(G_{mod}(\lambda) - G_{mess}(\lambda))$ ist die Standardabweichung des Fehlers.

5.1.2 Wetterabhängige Analyse

Die ersten Untersuchungen der berechneten, spektral aufgelösten Einstrahlung wurden bei wolkenlosem Himmel durchgeführt. Ohne Bewölkung ist der Einfluss der Eingangsparameter zur Beschreibung der atmosphärischen Zusammensetzung besonders groß. Ein Vergleich der verschiedenen Eingangsparameter für SOLIS bzw. MAGIC ist in diesem Fall möglich. Daher werden die Modelle unter Verwendung verschiedener Eingangsparameter bei wolkenlosem Himmel validiert (s. hierzu Tabelle 4.5 in Kap. 4.2). So wird die spektrale Einstrahlung bei wolkenlosem Himmel an den Standorten Oldenburg, Stuttgart z.B. für verschiedene Shettle-Typen ausgewertet. In Loughborough wurden zur Auswertung der Klucher-Methode zum Vergleich Radianzen für den wolkenlosen Himmel mit libRadtran berechnet (in einer Schrittweite des Azimuthwinkels von 6° und des Zenithwinkels von 5°) und der Halbraum über der Fläche integriert.

Mit SOLIS-ClearSky und der Heliosat-Methode wurde für den gegebenen Zeitraum die Einstrahlung für die Standorte Loughborough, Stuttgart und Oldenburg berechnet. Diese Daten wurden zur Filterung der wolkenlosen Situationen verwendet. Es wurden nur die Stunden, in denen die Global-zu-Diffus-Rate bei den berechneten Strahlungsdaten kleiner als 0,3 ist, ausgewertet. Des Weiteren wird, um Fehler durch wechselhafte Bewölkung zu vermeiden, vorausgesetzt, dass die räumliche Variabilität der berechneten

5.2. AUSWERTUNGEN ANHAND DES SPEKTRALEN MISMATCHES⁷³

Strahlung gering bleibt. Daher werden nur solche Daten ausgewertet, bei denen die Standardabweichung des Cloudindex in einem Bereich von 5x3 Pixeln um das betrachtete Pixel im Satellitenbild weniger als 0,05 beträgt.

Auf Basis der Ergebnisse der Clearsky-Auswertung wird ein geeigneter Atmosphäreninput-Datensatz ausgewählt, und im Weiteren auch in Bezug auf den Bewölkungsgrad ausgewertet. Neben der direkten Auswertung der spektralen Einstrahlung wurde die mittlere Photonenenergie in Bezug auf den Sonnenstand und den Bewölkungsgrad untersucht und mit Bodendaten verglichen.

5.1.3 Validierung des MAGIC-Verfahrens

Die Validierung des MAGIC-Verfahrens bezieht sich nur auf die Auswertung der spektralen Einstrahlung. Hierfür wurden einige Details genauer untersucht und neben der Validierung anhand von Bodendaten ein direkter Vergleich zwischen MAGIC und SOLIS unter Verwendung des selben Eingangsdatensatz für die atmosphärische Zusammensetzung durchgeführt.

Neben dem BIAS und RMSE der mittleren spektralen Einstrahlung im gesamten Messzeitraum wurde die mittlere spektrale Einstrahlung für verschiedene Bewölkungssituationen untersucht. Hierfür wurden die in Kapitel 5.1 genannten Kriterien angewendet, um wolkenlosen Himmel heraus zu filtern, alle anderen Situationen wurden als bewölkt angesehen. Des Weiteren wurden der BIAS und der RMSE für verschiedene Sonnenstände ($> 30^\circ$ und $< 30^\circ$) bestimmt.

Neben der Auswertung der mittleren Spektren wurden einzelne Katobänder ausgewählt und in Abhängigkeit vom Clearsky-Index, dem Sonnenstand und im Jahresverlauf untersucht. Es wurde ein Katoband im Absorptionsbereich des Ozons (um 345 nm) ausgewählt, eins im sichtbaren Spektralbereich (um 485 nm), eins im Absorptionsbereich des Wasserdampfs (um 931 nm) und ein weiteres im IR-Bereich (1010 nm), in dem Wasserdampf keine Rolle spielt. Die Einstrahlung in diesem Wellenlängenbereich wurde auf die Gesamteinstrahlung normiert und die mittleren Werte sowie das 10. und 90. Perzentil untersucht.

5.2 Auswertungen anhand des spektralen Mismatches

Die Verwendbarkeit der spektralen Einstrahlung aus dem SOLIS-Verfahren inklusive der Umrechnung auf die geeignete Fläche nach Klucher zur Beschrei-

bung des Leistungsverhaltens von PV-Modulen wurde anhand des spektralen Mismatch-Faktors (Gl. 2.6 in Kapitel 2.1) und der gewichteten Einstrahlung (Gl 2.8) für amorphes und polykristallines Silizium an den drei Standorten überprüft. Der sMMF wurde in Bezug auf den Sonnenstand und den Bewölkungsgrad ausgewertet. Inwieweit das an einem Standort vorherrschende Spektrum den mittleren Ertrag (über den zur Verfügung stehenden Messzeitraum) verändert wird durch die mittlere Abweichung der gewichteten Einstrahlung von der gemessenen anhand des relativen BIAS quantifiziert.

Am Standort Oldenburg wurden im Rahmen der Modulmessungen ([Kühnert, 2011]) neben Modulen aus amorphem und polykristallinem Silizium auch CIS-Module vermessen. Deshalb werden an diesem Standort zusätzlich sMMF-Werte für dieses Material ausgewertet. Somit können die Ergebnisse der Modulmessungen der drei verschiedenen Technologien mit den Ergebnissen aus der spektralen Einstrahlungsmessung und der berechneten, spektralen Einstrahlung verglichen werden.

Kapitel 6

Auswertung anhand von Bodendaten

Zur Berechnung der spektralen Einstrahlung aus Satellitendaten werden in dieser Arbeit zwei Clearsky-Modelle mit der Heliosat-Methode kombiniert: Das SOLIS-Verfahren und das MAGIC-Verfahren. Im folgenden Kapitel soll die Qualität dieser Verfahren überprüft werden, indem die Ergebnisse mit Bodendaten verglichen werden. Die Validierung des SOLIS-Verfahrens in Kapitel 6.1 umfasst dabei zunächst die Auswertung der spektralen Einstrahlung, getrennt für wolkenlose Situationen und alle Bewölkungssituationen. Im Weiteren wird die Verwendbarkeit des SOLIS-Verfahrens zur Bestimmung des spektralen Mismatch von verschiedenen PV-Technologien geprüft. Die Auswertung des MAGIC-Verfahrens in Kapitel 6.2 bezieht sich zunächst auf einen Vergleich zwischen den beiden Verfahren und im Weiteren auf eine detailliertere Untersuchung der spektralen Einstrahlung für verschiedene Situationen.

6.1 Validierung des SOLIS-Verfahrens

Im folgenden Kapitel wird die berechnete, spektrale Einstrahlung aus dem SOLIS-Verfahren mit Bodenmessungen verglichen. Die Qualität der berechneten, spektralen Einstrahlung hängt insbesondere von richtig erkannten Bewölkungssituationen ab. Bei wolkenlosem Himmel ist der Einfluss der Eingangsparameter zur Beschreibung der atmosphärischen Zusammensetzung besonders groß. Daher wird zuerst die spektrale Einstrahlung bei wolkenlosem Himmel ausgewertet. Auf Basis dieser Auswertung wird für jeden Standort ein geeigneter Datensatz zur Beschreibung der atmosphärischen Zusammensetzung ausgewählt, der im Kapitel 6.1.2 für alle Bewölkungssituationen untersucht wird. Im Kapitel 6.1.3 werden die spektralen Einstrahlungen aus

Bodenmessungen und dem SOLIS-Verfahren hinsichtlich ihres Einflusses auf den Kurzschlussstrom verschiedener PV-Materialien anhand des spektralen Mismatch-Faktors (sMMF) untersucht. Es folgt in Kapitel 6.1.4 die Auswertung hinsichtlich der gewichteten Einstrahlung und in Kapitel 6.1.5 der Vergleich der aus SOLIS ermittelten MMF-Werte mit denen aus den in [Kühnert, 2011] gemessenen Kurzschlussströmen.

6.1.1 Auswertung der mittleren spektralen Einstrahlung bei wolkenlosem Himmel

Umrechnung auf die geneigte Fläche

Die Validierung des SOLIS-Verfahrens wurde zunächst nur für wolkenlose Situationen durchgeführt. Zur Untersuchung der spektralen Einstrahlung bei wolkenlosem Himmel wurden wolkenlose Situationen, wie in 5.1, beschrieben anhand des berechneten Anteils der Diffusstrahlung an der Globalstrahlung ausgewählt.

Die Bodenmessungen am Standort Loughborough wurden dazu verwendet, um die Umrechnung auf die geneigte Fläche mit der Klucher-Methode der aus der Integration der mit libRadtran berechneten Radianzen gegenüberzustellen. In Abbildung 6.1 sind links die mittleren Spektren aus den Bodenmessungen und aus SOLIS unter Verwendung der Klucher-Methode zur Umrechnung auf die geneigte Fläche sowie der BIAS über der Wellenlänge dargestellt. Die Abbildung zeigt rechts die entsprechende Auswertung für die über der geneigten Fläche integrierten Radianzen aus libRadtran. Insgesamt geben die integrierten Radianzen den spektralen Verlauf besser wieder, als die mit Klucher berechnete, spektrale Einstrahlung. Der BIAS ist insbesondere im kurzwelligen Spektralbereich für die Klucher-Methode größer. Es ergibt sich die bereits in Kap. 3.3.1 für den wolkenlosen Fall gezeigte Verschiebung des Spektrums zu kürzeren Wellenlängen durch die Kluchermethode, die in [Harrison and Coombes, 1988] mit einer Überschätzung der Diffusstrahlung auf die geneigte Fläche begründet wird. Für beide Methoden zur Umrechnung auf die geneigte Fläche fällt ein ähnlicher Verlauf des BIAS auf, der zum Teil durch die geringe Wellenlängenaufösung der Messung erklärt werden kann (vgl. [Betcke et al., 2010]). Die starken Einbrüche bei 780 und 960 nm deuten auf eine Überschätzung des Wasserdampfgehalts hin, während die Überschätzung zwischen 500 und 700 nm durch eine ungenaue Beschreibung der Aerosole oder des Ozons verursacht sein kann. Im Bereich < 400 nm ist der BIAS besonders hoch. In diesem Bereich ist möglicherweise die Messung aufgrund von Kalibrierungsproblemen ungenau.

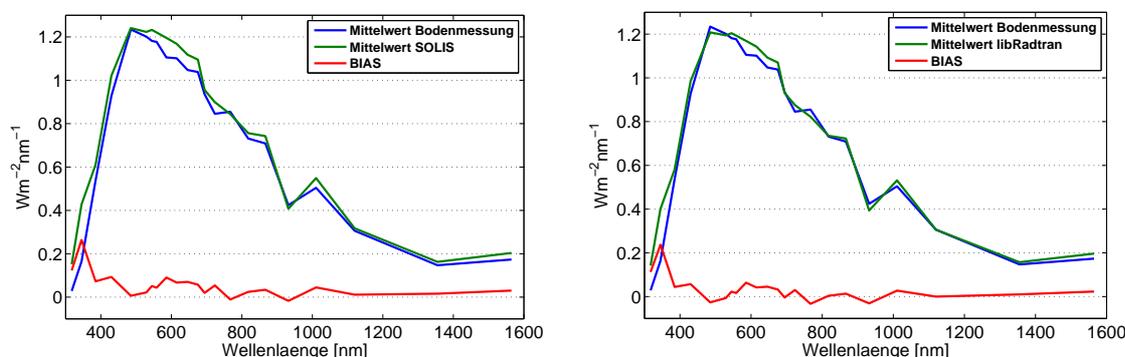


Abbildung 6.1: Mittleres Spektrum aus Bodenmessungen am Standort Loughborough, sowie aus SOLIS mit der Klucher-Methode (links), bzw. aus libRadtran mit Integration der Radianzen (rechts) auf die geneigte Fläche gerechnet für Clearsky-Situationen. Zusätzlich ist der wellenlängenabhängige BIAS gegeben. Verwendung der Aerosol-optischen Dicke aus AERONET und ländlichem Aerosoltyp.

Einfluss des Shettle-Typs

An den Standorten Stuttgart und Oldenburg wurde der Einfluss der Shettle-Typen zur Beschreibung der Wellenlängenabhängigkeit der AOD und der Einfachstreualbedo auf die berechnete, spektrale Einstrahlung untersucht. Die mittlere, spektrale Einstrahlung in Stuttgart aus Bodenmessungen und SOLIS ist in der Abbildung 6.2 unter Verwendung des städtischen Aerosoltyps (oben links) und ländlichen Aerosoltyps (oben rechts) dargestellt. In beiden Fällen ist eine Überschätzung der Einstrahlung im Bereich 300-500 nm zu verzeichnen, zwischen 500 nm und 1000 nm wird die spektrale Einstrahlung stark unterschätzt, möglicherweise durch eine Überschätzung des Aerosolgehalts. Zwischen 1000 und 1400 nm entspricht die berechnete Einstrahlung der gemessenen im Mittel sehr gut, ab 1400 nm steigt der BIAS wieder leicht an. Die in Loughborough beobachtete Unterschätzung in den Wasserdampfabsorptionsbanden ist in Stuttgart weniger deutlich.

Die Unterschätzung im sichtbaren und nahen IR-Bereich ist bei dem städtischen Aerosoltyp etwas deutlicher als mit dem ländlichen. Der städtische Aerosoltyp ist von kleineren Rußpartikeln geprägt, die zusätzlich stark absorbieren. Dadurch ergibt sich eine stärkere Wellenlängenabhängigkeit der Aerosol-optischen Dicke und somit eine größere Extinktion bei kleinen Wellenlängen. Die entsprechenden optischen Eigenschaften der städtischen Aerosole scheinen zumindestens für den Standort Stuttgart zu extrem. Zur Verdeutlichung wird in Tabelle 6.1 die Breitbandeinstrahlung und die mittlere Photonenenergie bei Verwendung der verschiedenen Aerosol-Typen ausgewertet. Der städtische Shettle-Typ bewirkt durch die stärkere Extinktion der kurzwelligen Strahlung eine geringere Breitband-

Tabelle 6.1: Auswertung des Einflusses des Shettle-Typs auf die Breitbandeinstrahlung (BB) und die mittlere Photonenenergie (APE) an den Standorten Stuttgart und Oldenburg im wolkenlosen Fall.

| | Mittelwert APE [eV] | BIAS APE [%] | Mittelwert BB [Wm^{-2}] | BIAS BB [%] |
|------------------|---------------------------|--------------------|-----------------------------------|-------------------|
| Stuttgart | | | | |
| Bodenmessung | 1,643 | - | 700,85 | - |
| SOLIS rural | 1,640 | -0,23 | 687,22 | -1,94 |
| SOLIS urban | 1,633 | -0,65 | 655,10 | -5,1 |
| Oldenburg | | | | |
| Bodenmessung | 1,662 | - | 409,17 | - |
| SOLIS rural | 1,661 | -0,06 | 469,89 | 14,84 |
| SOLIS maritim | 1,666 | 0,26 | 474,22 | 15,9 |

einstrahlung und eine geringere APE, als der ländliche Aerosoltyp. Aus der Bodenmessung sind sowohl die APE, als auch über den Messbereich integrierte Einstrahlung, höher als die Werte aus SOLIS. Eine mögliche Überschätzung der Aerosol-optischen Dicke könnte dies verursachen.

In Oldenburg wurde der ländliche und maritime Aerosoltyp zur Berechnung der spektralen Einstrahlung verwendet. In der Abbildung 6.2 (Mitte) wird die spektrale Einstrahlung für beide Aerosoltypen bei wolkenlosem Himmel ausgewertet. Die Unterschiede zwischen den beiden Aerosoltypen sind eher gering und werden durch einen sehr hohen BIAS (s. auch Tab. 6.1) über alle Wellenlängenbereiche überlagert, der wahrscheinlich in einer systematischen Abweichung der Bodenmessung begründet ist (vgl. hierzu Kap. 4.1.2 und Tab. 4.4). Zur Verdeutlichung des geringen Unterschieds zwischen den maritimen und ländlichen Shettle-Typen sind in Abb. 6.2 (unten) die spektralen Einstrahlungen aus der Bodenmessung und SOLIS mit der Breitbandeinstrahlung normiert dargestellt. Besonders deutlich ist die Überschätzung zwischen 550 und 700 nm und die starke Unterschätzung bei 930 nm bei beiden Aerosoltypen. Die mittlere Photonenenergie wird bei Verwendung des ländlichen Aerosoltyps gut wiedergegeben. Der maritime Aerosoltyp führt zu einer Erhöhung der Breitbandeinstrahlung und einer leichten Überschätzung der APE.

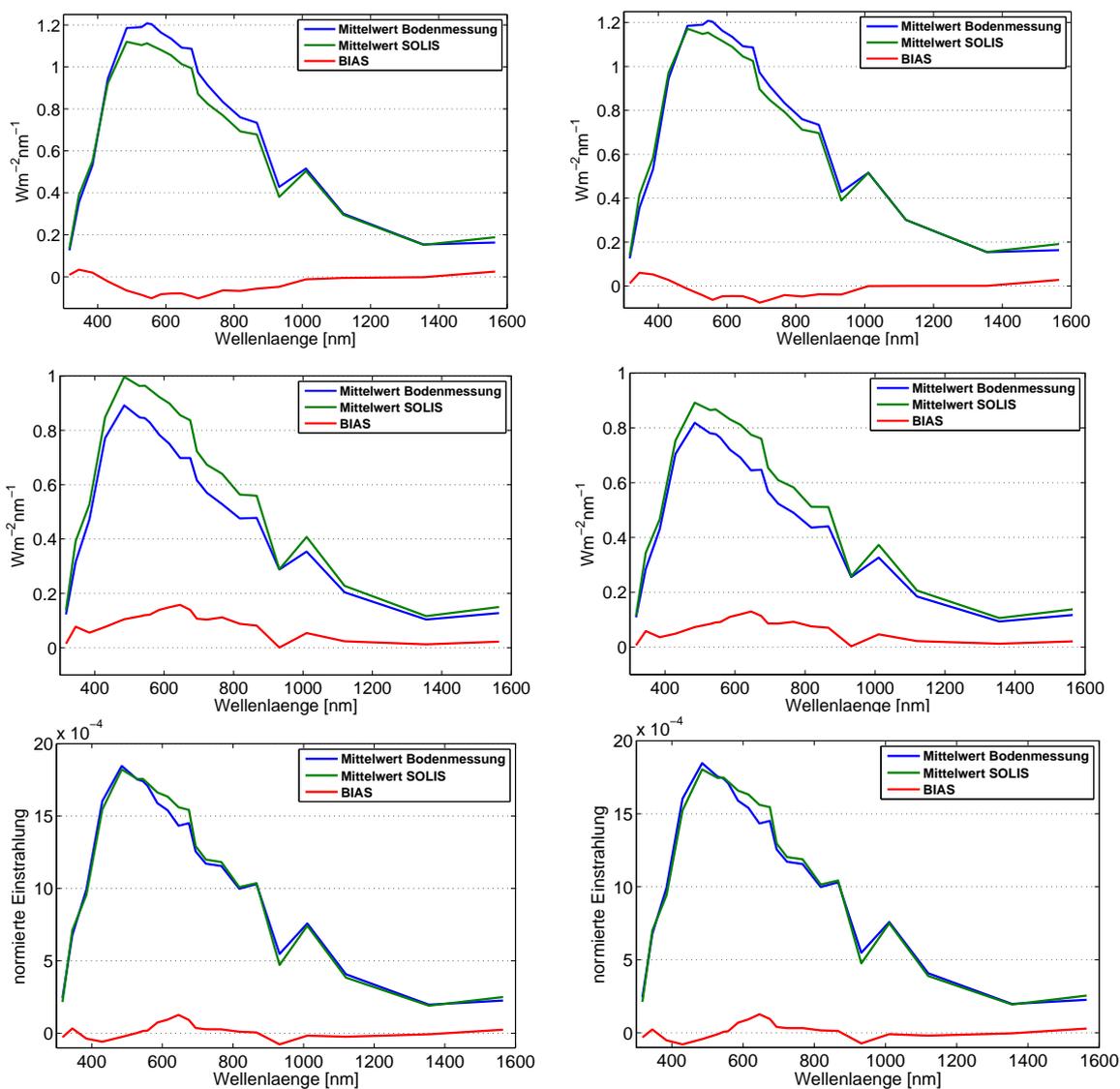


Abbildung 6.2: Mittleres Spektrum aus Bodenmessungen an den Standorten Stuttgart (oben) und Oldenburg (Mitte), sowie aus SOLIS unter Verwendung verschiedener Shettle-Typen für Clearsky-Situationen. Unten sind die spektralen Einstrahlungen am Standort Oldenburg mit der integrierten Einstrahlung normiert. Oben links: Shettle-Typ "urban", Mitte und unten links: "maritim", rechts: "rural". Zusätzlich ist der wellenlängenabhängige BIAS gegeben.

Die bisherige Auswertung macht den großen Einfluss der gewählten Eingangsparameter zur Berechnung der spektralen Einstrahlung deutlich. Basierend auf den gezeigten Ergebnissen werden in den weiteren Auswertungen folgende Konfigurationen detaillierter für alle Bewölkungssituationen und in Bezug auf den Einfluss der spektralen Verteilung auf verschiedene PV-Materialien untersucht:

- Zur Berechnung der spektralen Einstrahlung auf die geneigte Fläche wird die Klucher-Methode bevorzugt, da sie einerseits bei einem wesentlich geringeren Rechenaufwand gute Ergebnisse erzielt und darüber hinaus die Einbeziehung des Bewölkungsgrads in libRadtran nicht auf Basis des Clearsky-Index aus der Heliosat-Methode möglich ist.
- Zur Beschreibung der Aerosole wurde an allen Standorten der ländliche Shettle-Typ ausgewählt.

6.1.2 Auswertung der mittleren spektralen Einstrahlung für alle Bewölkungssituationen

Die Auswertung der mittleren spektralen Einstrahlung für alle Bewölkungssituationen wurde an den drei Standorten Oldenburg, Stuttgart und Loughborough durchgeführt. In diesem Kapitel werden beispielhaft die Ergebnisse in Stuttgart gezeigt, da die Bodenmessungen an diesem Standort am umfangreichsten sind (sie umfassen ein ganzes Jahr mit einer hohen zeitlichen Auflösung) und da die berechnete Breitbandeinstrahlung an diesem Standort im Mittel gut mit der gemessenen übereinstimmt (s. Tab. 6.2).

Die mittlere, spektrale Einstrahlung aus Bodenmessungen und aus dem SOLIS-Verfahren am Standort Stuttgart ist in der Abbildung 6.3 dargestellt. Insgesamt wird die spektrale Einstrahlung an diesem Standort durch das SOLIS-Verfahren gut wiedergegeben, was sich in einem geringen BIAS widerspiegelt. Es zeigt sich eine Überschätzung der spektralen Einstrahlung bei Werten kleiner 700 nm und größer 1000 nm, mit einem Anstieg des BIAS zu höheren Wellenlängen. Bis ca. 950 nm wird die Einstrahlung leicht unterschätzt.

Der relative BIAS wird in Abbildung 6.4 mit dem relativen BIAS bei wolkenlosem Himmel verglichen. Beide zeigen einen ähnlichen Verlauf, Ungenauigkeiten in der spektralen Clearsky-Einstrahlung finden sich somit auch bei allen Bewölkungssituationen. Die größten Werte werden bei Wellenlängen kleiner 400 nm und bei Wellenlängen größer 1400 nm erreicht. Im Bereich 400 bis 1000 nm variiert der BIAS für alle Bewölkungssituationen um 0, während im wolkenlosem Fall die spektrale Einstrahlung in diesem Bereich

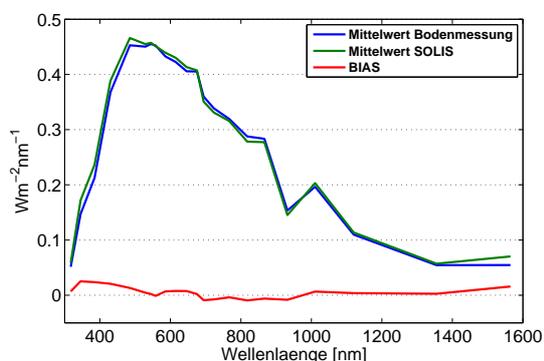


Abbildung 6.3: Mittleres Spektrum aus Bodenmessungen am Standort Stuttgart und mit SOLIS, sowie BIAS und RMSE.

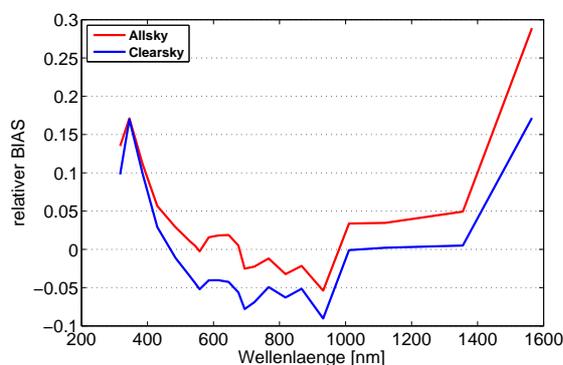


Abbildung 6.4: Relativer BIAS der mit SOLIS berechneten, spektralen Einstrahlung am Standort Stuttgart, für alle Situationen (allsky) und wolkenlose Situationen (clearsky)

unterschätzt wird. Beide Kurven weisen aber in denselben spektralen Bereichen Minima auf (um 723 nm, 818 nm und 931 nm), die den Absorptionsbanden des Wasserdampfs entsprechen.

Die mittlere, spektrale Einstrahlung, sowie BIAS und RMSE der SOLIS-Methode in Loughborough und Oldenburg sind im Anhang in den Abbildungen 7.5 und 7.6 dargestellt, Tabelle 6.2 fasst die Auswertung anhand der mittleren Photonenenergie zusammen. In Oldenburg ist die APE durch die horizontale Ausrichtung im Mittel höher als an den beiden anderen Standorten. Man findet allerdings an allen untersuchten Standorten eine Unterschätzung der APE durch SOLIS, die auch schon bei wolkenlosem Himmel gefunden wurde. Die Abweichung steigt durch die Einbeziehung der bewölkten Situationen an.

Detailliertere Untersuchungen über die Qualität der mittleren Photonenenergie aus dem SOLIS-Verfahren bei unterschiedlichen Bewölkungssituationen und unterschiedlichen Sonnenständen wurden am Beispielstandort Stuttgart durchgeführt. In der Abbildung 6.5 ist für den Standort Stuttgart links die APE aus den Bodenmessungen und rechts die APE aus dem SOLIS-Verfahren in Abhängigkeit vom Clearsky-Index und dem Sonnenstand aufgetragen. Aus den Bodenmessungen lässt sich ein Anstieg der mittleren Photonenenergie mit dem Bewölkungsgrad (sinkendem Clearsky-Index) nachweisen, der mit SOLIS gut wiedergegeben wird. Während die APE aus SOLIS zu kleineren Sonnenständen leicht sinkt (Abb. 6.5), zeigt die APE aus den Bodenmessungen diesen Trend nur bei Sonnenständen über 20° , zu niedrigeren Sonnenständen weisen die

Tabelle 6.2: Auswertung der berechneten Breitbandeinstrahlung (BB) und der mittleren Photonenenergie (APE) an den Standorten Loughborough, Stuttgart und Oldenburg.

| | Mittelwert APE [eV] | BIAS APE [%] | Mittelwert BB [Wm^{-2}] | BIAS BB [%] |
|---------------------|---------------------------|--------------------|-----------------------------------|-------------------|
| Loughborough | | | | |
| Bodenmessung | 1,665 | - | 306,25 | - |
| SOLIS rural | 1,659 | -0,39 | 336,39 | 9,84 |
| Stuttgart | | | | |
| Bodenmessung | 1,704 | - | 258,45 | - |
| SOLIS rural | 1,676 | -1,7 | 267,99 | 3,69 |
| Oldenburg | | | | |
| Bodenmessung | 1,686 | - | 287,65 | - |
| SOLIS rural | 1,6844 | -0,1 | 319,54 | 11,09 |

APE-Werte eine unerwarteten Anstieg auf. Durch die geringen Einstrahlungsintensitäten in diesen Situationen ist aber ein erhöhtes Rauschen in der Bodenmessung nicht ausgeschlossen. Der BIAS der APE ist in Abbildung 6.6 in Abhängigkeit vom Clearsky-Index und vom Sonnenstand dargestellt. Nur bei großen Sonnenständen wird die APE leicht überschätzt, im Mittel wird sie durch SOLIS unterschätzt, besonders stark bei kleinen Sonnenständen.

Insgesamt haben die Auswertungen gezeigt, dass Trends der mittleren Photonenenergie mit Sonnenstand und Bewölkungsgrad, die aus den Sensitivitätsstudien erwartet wurden, durch die Bodenmessungen bestätigt werden. Insgesamt weist SOLIS bei niedrigen Sonnenständen und starker Bewölkung in Bezug auf die APE Abweichungen auf. Dies entspricht den Ergebnissen aus den Sensitivitätsstudien (Kapitel 3.2 und 3.3), wonach die bestehende Wellenlängenkorrektur des Clearsky-Index in diesen Situationen nicht ausreicht und die Parametrisierung der Direktstrahlung spektral angepasst werden sollte.

6.1.3 Auswertung des Spektralen Mismatch-Faktors

Zur Bewertung des Einflusses variierender spektraler Verteilung der Einstrahlung auf das Leistungsverhalten verschiedener PV-Technologien wurde der spektrale Mismatch-Faktor (sMMF) von amorphem und polykristallinem Silizium in Abhängigkeit vom Bewölkungsgrad und vom Sonnenstand ausgewertet. Hier werden zunächst beispielhaft die Ergebnisse für amorphes

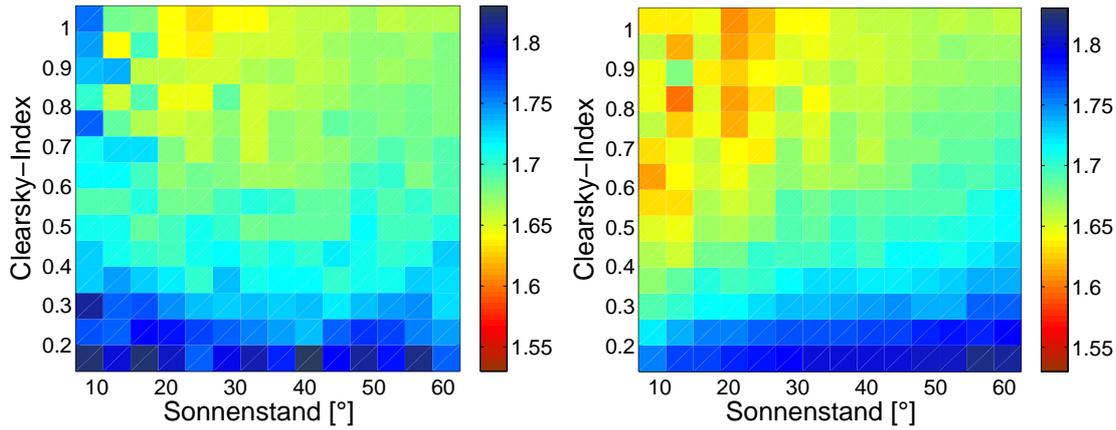


Abbildung 6.5: Mittlere Photonenergie [eV] am Standort Stuttgart aus der Bodenmessung (links) und dem SOLIS-Verfahren (rechts) in Abhängigkeit vom Sonnenstand und dem Clearsky-Index (Skala entgegen Konventionen: Blau entspricht hohen Werten der APE "Blauverschiebung").

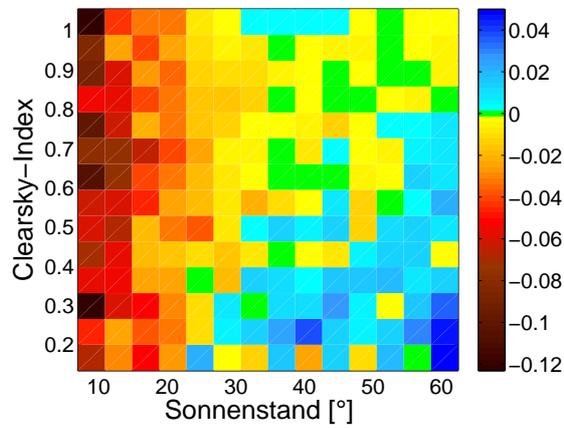


Abbildung 6.6: BIAS der mittleren Photonenergie am Standort Stuttgart aus dem SOLIS-Verfahren über dem Clearsky-Index und dem Sonnenstand (Blau entspricht Überschätzung der APE "Blauverschiebung").

Silizium am Standort Stuttgart gezeigt. In der Abbildung 6.7 (oben links) ist er in Abhängigkeit vom (satellitenbasierten) Clearsky-Index dargestellt. Es ist eine deutliche Verringerung des sMMF mit steigendem Clearsky-Index erkennbar. Dies findet sich sowohl in den aus SOLIS berechneten sMMF-Werten als auch in den aus den spektralen Einstrahlungen berechneten Werten. Der aus den Satellitendaten hergeleitete Clearsky-Index eignet sich also gut, um den Einfluss der sich mit dem Bewölkungsgrad ändernden, spektralen Einstrahlung auf die untersuchten Modultypen zu beschreiben. Bei vollständig bewölktem Himmel ($k^* < 0,2$) beträgt der sMMF von a-Si im Mittel etwa 1,1, somit wird auch der Ertrag im Mittel etwa 10% höher sein als bei Standard-Test-Bedingungen erwartet. Aus der Bodenmessung ist das 10. Perzentil bei 0,9 und das 90. bei über 1,2. Auch hier kann aufgrund geringerer Einstrahlungsintensitäten ein erhöhtes Rauschen Ursache dafür sein. Bei wolkenlosem Himmel ($k^* \approx 1$) nähern sich die Werte des sMMF im Mittel 1 an.

In der Abbildung 6.7 (oben rechts) sind die aus Bodenmessungen und SOLIS berechneten sMMF-Werte für amorphes Silizium über dem Sonnenstand dargestellt. Die Abhängigkeit vom Sonnenstand ist deutlich geringer, als die vom Bewölkungsgrad, es ist nur im Mittel eine leichte Verringerung der sMMF-Werte zu kleinen Sonnenständen festzustellen. Bei kleinen Sonnenständen ist aufgrund des längeren Wegs des Lichts durch die Atmosphäre und des dadurch gestiegenen Einflusses des Atmosphärenzustands eine größere Streuung der Werte deutlich erkennbar.

Insgesamt entspricht der Verlauf der sMMF-Werte aus SOLIS sehr gut den aus gemessenen Spektren ermittelten Werten, bei kleinen k^* -Werten wird der sMMF durch SOLIS im Mittel leicht überschätzt und bei größeren k^* -Werten leicht unterschätzt. Bei Sonnenständen über 20° liegen die sMMF-Werte aus SOLIS im Mittel leicht über den aus gemessenen Spektren ermittelten sMMF-Werten, das 90. Perzentil liegt in diesem Bereich deutlich über dem aus Bodenmessungen. Dies entspricht den bisher gezeigten Auswertungen der mittleren Photonenenergie, die im wolkenlosen Fall unterschätzt und bei hohen Sonnenständen leicht überschätzt wird.

Im Anhang befinden sich die entsprechenden Abbildungen 7.7 und 7.8 des spektralen Mismatch-Faktors von amorphem Silizium über dem Clearsky-Index und dem Sonnenstand für alle untersuchten Standorte. Insgesamt sind die Ergebnisse für Loughborough denen aus Stuttgart ähnlich, der spektrale Mismatch durch SOLIS wird im Mittel unterschätzt.

In Oldenburg sind die sMMF-Werte aus den gemessenen spektralen Einstrahlungen etwas geringer als an den anderen Standorten (s. Abb. 6.7 unten), es fehlen allerdings auch Vergleichswerte bei starker Bewölkung. Im Clearsky-Fall bleibt dagegen der sMMF deutlich über 1 (im Mittel bei 1,04 aus SOLIS,

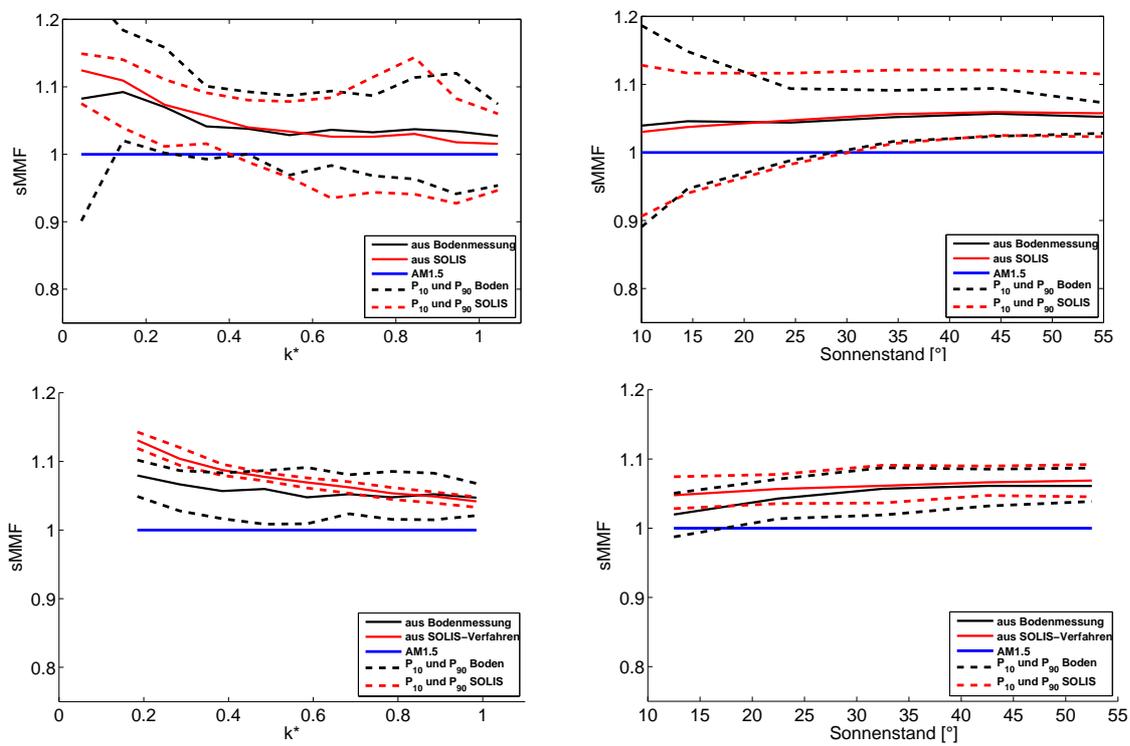


Abbildung 6.7: Spektraler Mismatch-Faktor für amorphes Silizium aus Bodendaten und dem SOLIS-Verfahren in Abhängigkeit vom Clearsky-Index (links) und vom Sonnenstand (rechts) am Standort Stuttgart (oben) und am Standort Oldenburg (unten).

bzw 1,05 aus der Spektralmessung). Durch die horizontale Ausrichtung der Module steigt der Anteil der Diffusstrahlung, wodurch das Spektrum der eintreffenden Strahlung auch bei wolkenlosem Himmel einen größeren Anteil an kurzen Wellenlängen als das Standardspektrum, welches für die geneigte Fläche berechnet wurde, aufweist. Auffällig am Standort Oldenburg ist auch die geringere Streuung der sMMF-Werte, dies ist sowohl für die Bodenmessung als auch für die Werte aus SOLIS festzustellen. Im Gegensatz zu den anderen Standorten wurde hier die spektrale Einstrahlung nur über wenige Monate, statt über ein ganzes Jahr ausgewertet. Die Variation der atmosphärischen Bedingungen (v.a. Aerosol- und Wasserdampfgehalt), die das Spektrum beeinflussen, ist in diesen kurzen Zeitraum offensichtlich geringer.

Des Weiteren ist in den Abbildungen 7.7 und 7.8 im Anhang auch der sMMF für polykristallines Silizium an den untersuchten Standorten über dem Clearsky-Index und dem Sonnenstand dargestellt. Auch pc-Si weist einen Anstieg des sMMF mit zunehmender Bewölkung auf, im Mittel bis 1,07, während die Werte in Abhängigkeit vom Sonnenstand annähernd konstant bleiben. Am Standort Oldenburg wurden zusätzlich sMMF-Werte für CIS ausgewertet (s. Abb. 7.9 im Anhang). Sie zeigen einen ähnlichen Verlauf wie die Werte von polykristallinem Silizium: Einen leichten Anstieg mit zunehmender Bewölkung und keine deutliche Abhängigkeit vom Sonnenstand.

Die bisherigen Auswertungen des spektralen Mismatch-Faktors haben gezeigt, dass an allen Standorten, sowohl aus den Bodenmessungen als auch aus SOLIS, bei allen untersuchten PV-Materialien ein Mehrertrag im Vergleich zu den Standard-Test-Bedingungen aufgrund der spektralen Verteilung der Einstrahlung zu erwarten ist, der sMMF ist im Mittel > 1 . Es findet sich ein eindeutiger Anstieg der Werte bei zunehmender Bewölkung, der für amorphes Silizium stärker ausfällt als für polykristallines Silizium oder CIS. Für amorphes Silizium ist eine leichte Verringerung des sMMF im Mittel mit dem Sonnenstand gefunden worden, für die anderen Materialien ergaben die Untersuchungen kein eindeutiges Ergebnis.

6.1.4 Auswertung der gewichteten Einstrahlung

Im vorherigen Kapitel wurde gezeigt, dass extreme Werte des sMMF insbesondere bei niedrigen Einstrahlungsverhältnissen (niedriger Sonnenstand, starke Bewölkung) zu finden sind, die für den mittleren Ertrag einer PV-Anlage eine untergeordnete Rolle spielen. Um den spektralen Effekt abschätzen zu können, wird im folgenden die gewichtete Einstrahlung G_w untersucht. Tabelle 6.3 zeigt die mittlere Abweichung von G_w (aus SOLIS und den spektralen Einstrahlungsmessungen ($G_{mess}(\lambda)$)) von der gemesse-

Tabelle 6.3: Mittlere Abweichung [%] der gewichteten Einstrahlung G_w von der gemessenen Globalstrahlung für amorphes Silizium (a-Si) und polykristallines Silizium (pc-Si)

| | Oldenburg | Stuttgart | Loughborough |
|---------------------------|-----------|-----------|--------------|
| a-Si SOLIS | 5,87 | 6,38 | 2,3 |
| a-Si $G_{mess}(\lambda)$ | 5,08 | 4,8 | 3,27 |
| pc-Si SOLIS | 2,11 | 4,3 | 0,72 |
| pc-Si $G_{mess}(\lambda)$ | 0,89 | 4,23 | 2,82 |

nen Globalstrahlung, die der gewichteten Einstrahlung mit einem sMMF=1 (AM1.5 Standardspektrum) entspricht. Anhand dieses Vergleichs lässt sich ein Mehrertrag über den Messzeitraum für amorphes Silizium im Mittel von 4,6% und für polykristallines von 2,5% feststellen. Dieser nimmt für a-Si bei abnehmendem Neigungswinkel (zunehmendem Diffusanteil) erwartungsgemäß zu - bei horizontaler Ausrichtung in Oldenburg beträgt er 5% und bei 53° Neigung in Loughborough 3,3%. Für pc-Si ist dies nicht festzustellen.

Der Vergleich zwischen den Ergebnissen aus der Bodenmessung und SOLIS weist ähnliche Trends auf, wie bereits anhand des Mismatch-Faktors gezeigt. In Oldenburg wird der sMMF im Mittel überschätzt, somit ist auch die gewichtete Einstrahlung aus SOLIS sowohl für pc-Si als auch für a-Si im Mittel höher. In Loughborough ist dies umgekehrt. In Stuttgart führen die Überschätzungen des sMMF bei hohen Sonnenständen zu insgesamt höheren Werten der gewichteten Einstrahlung aus SOLIS im Vergleich zur Bodenmessung. Die Unterschiede zwischen SOLIS und der Bodenmessung sind (insbesondere für polykristallines Silizium) größer, als die Unterschiede zwischen den Standorten.

6.1.5 Auswertung anhand gemessener Kurzschlussströme

Im Rahmen der Diplomarbeit [Kühnert, 2011] wurden synchron zur spektralen Einstrahlungsmessung in Oldenburg auch die wichtigsten Kenngrößen (u.a. Kurzschlussstrom) verschiedener PV-Module gemessen. Die aus SOLIS berechneten sMMF-Werte für a-Si, pc-Si und CIS werden in den Abbildungen 6.8 mit denen nach (2.5) aus der Kurzschlussstrommessung hergeleiteten Werten in Abhängigkeit von k^* und dem Sonnenstand verglichen¹. Die spektralen Einstrahlungsmessungen wurden an dieser Stelle nicht zum Vergleich herangezogen. Durch die fehlende Witterungsfestigkeit der Einkoppeloptik wurde insbesondere in bewölkten Situationen nicht gemessen. Gerade dann ist jedoch der spektrale Effekt am deutlichsten.

Auch aus den Kurzschlussstrommessungen lässt sich eine starke Abhängigkeit der Modultypen vom Bewölkungsgrad nachweisen (ca. 10% Unterschied zwischen wolkenlosem und bewölktem Himmel). Im Gegensatz zu den sMMF-Werten aus SOLIS weisen die Werte aus den I_{sc} -Messungen für alle Modultypen einen deutlichen Anstieg mit steigendem Sonnenstand auf. Da sich diese Abhängigkeit auch nicht aus den spektralen Messungen nachweisen ließ (Vgl Kapitel 6.1.3), ist anzunehmen, dass andere Verlusteinflüsse dieses Verhalten verursachen, z.B. Reflexionsverluste, die durch die horizontale Ausrichtung der Module begünstigt werden. [Kühnert, 2011] wendet eine Reflexionskorrektur nach [Sjerps-Koomen et al., 1996] auf die Direktstrahlung an. Diese korrigierten sMMF-Werte wurden an dieser Stelle nicht ausgewertet. Insgesamt weist nur a-Si anhand der Kurzschlussstrommessung im Mittel sMMF-Werte größer als 1 auf, während für CIS und pc-Si die Werte im Mittel kleiner als 1 sind. Dies kann neben weiteren Verlusteffekten an einer ungenauen Bestimmung der Kurzschlussstromwerte bei Standard-Test-Bedingungen aus den Datenblattangaben liegen.

Es konnte aus den spektralen Einstrahlungsmessungen und aus den berechneten Spektren ein Effekt auf den Kurzschlussstrom theoretisch nachgewiesen werden. Da die aus den Kurzschlussstrommessungen berechneten sMMF-Werte die gleiche Tendenz aufweisen, kann dies durch den spektralen Effekt erklärt werden, auch wenn sie sich quantitativ von denen aus SOLIS unterscheiden.

¹bei [Kühnert, 2011] messspezifischer Mismatch-Faktor mMMF, der neben dem spektralen Einfluss auf den Kurzschlussstrom auch andere Effekte beinhaltet

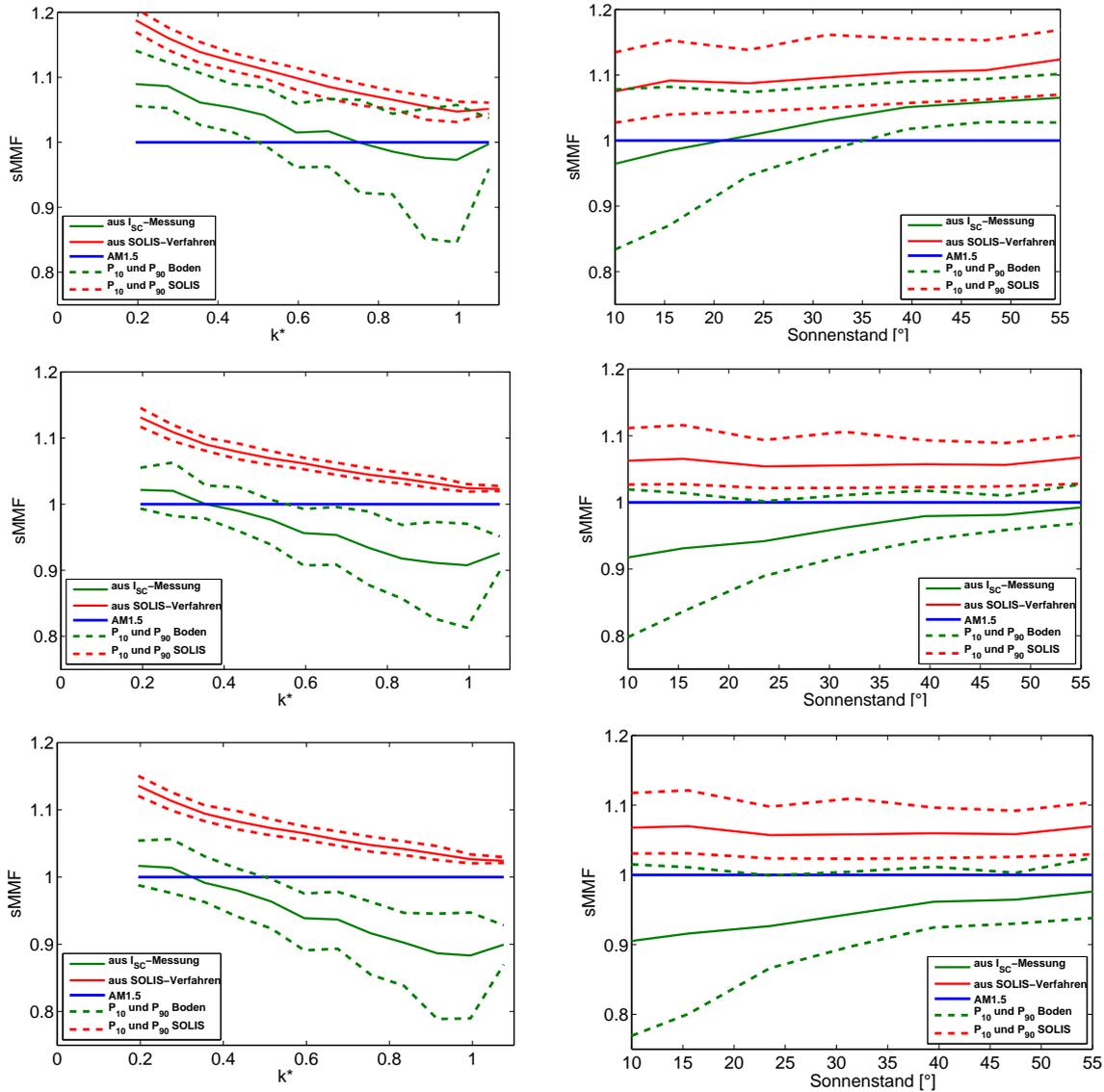


Abbildung 6.8: Spektraler Mismatch-Faktor für amorphes Silizium (oben), polykristallines Silizium (Mitte) und CIS (unten) aus Kurzschlussstrommessungen und dem SOLIS-Verfahren in Abhängigkeit von k^* (links) und vom Sonnenstand (rechts) am Standort Oldenburg.

6.2 Validierung des MAGIC-Verfahrens

Das MAGIC-Verfahren, das vom Deutschen Wetterdienst entwickelt wurde und in Rahmen dieser Arbeit in Zusammenarbeit mit dem DWD auf spektrale Bänder erweitert wurde, wird im folgenden Kapitel validiert. Die Auswertung der mittleren, spektralen Einstrahlung erfolgt in Kap. 6.2.1 durch einen Vergleich mit dem SOLIS-Verfahren bei Verwendung desselben atmosphärischen Eingangsdatensatzes. In Kapitel 6.2.2 wird anhand ausgewählter Wellenlängenbereiche die berechnete, spektrale Einstrahlung mit Bodenmessungen validiert.

6.2.1 Auswertung der mittleren spektralen Einstrahlung

Die Qualität der mit dem MAGIC-Verfahren berechneten, spektralen Einstrahlung wurde anhand der mittleren Spektren an zwei Standorten untersucht. Zusätzlich wurde unter Verwendung desselben atmosphärischen Eingangsparametersatzes (vgl. Tabelle 4.5 in Kap. 4.2) mit dem SOLIS-Verfahren die spektrale Einstrahlung an diesen Standorten berechnet. Die mittleren Spektren aus den Bodenmessungen, dem MAGIC- und dem SOLIS-Verfahren sowie den spektralen BIAS sind im Anhang (Abb. 7.10) dargestellt. Die Ergebnisse entsprechen im Wesentlichen den bisher gezeigten Auswertungen des SOLIS-Verfahrens. Die Verwendung der Look-up-Tabellen und der Parametrisierung des Einflusses von Wasserdampf und Ozon in MAGIC scheinen die Genauigkeit der berechneten, spektralen Einstrahlung kaum zu verändern. Ein direkter Vergleich der beiden Verfahren an den beiden untersuchten Standorten wird in Abbildung 6.9 gegeben. Insgesamt ergibt sich aus beiden Verfahren ein ähnlicher Verlauf. Durch Verwendung der gleichen Atmosphärenkonfiguration und da in beiden Verfahren die Modified-Lambert-Beer Parametrisierung verwendet wird, entspricht dies auch den Erwartungen. An beiden Standorten wird durch den BIAS zwischen MAGIC und SOLIS allerdings deutlich, dass durch das MAGIC-Verfahren die spektrale Einstrahlung zu größeren Wellenlängen verschoben wird. Dies kann an einer leicht veränderten, spektralen Wolkenkorrektur liegen [Müller et al., 2012].

Abbildung 6.10 zeigen den absoluten und relativen BIAS, bzw. RMSE des MAGIC-Verfahrens im Vergleich zu Bodenmessungen für alle Situationen, für wolkenlose und bewölkte Situationen. Hier zeigt sich deutlich, dass insbesondere der RMSE vor allem durch die bewölkten Situationen bestimmt wird (höhere Anzahl bewölkter Situationen). Der absolute RMSE nimmt bei wolkenlosen Situationen durch die höhere Einstrahlung zu, während der relative

RMSE bei wolkenlosen Situationen deutlich geringer ist, als für bewölkte Situationen. Auffällig ist, dass der relative RMSE im bewölkten Fall zu größeren Wellenlängen deutlich ansteigt, während er im wolkenlosem Fall nur einen geringen Anstieg zu höheren Wellenlängen zeigt. Auch der BIAS zeigt im wolkenlosen Fall eine geringere Abhängigkeit mit der Wellenlänge. Es ergibt sich also im bewölkten Fall eine Verschiebung zu langen Wellenlängen, die aufgrund der verwendeten Parametrisierungen schon bei der Auswertung des SOLIS-Verfahrens deutlich wurde.

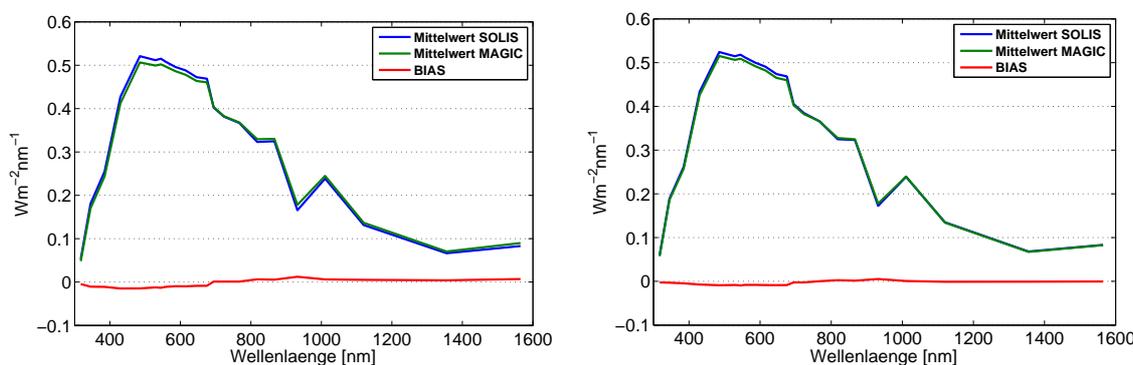


Abbildung 6.9: Mittleres Spektrum aus SOLIS und MAGIC, sowie BIAS zwischen beiden Verfahren an den Standorten Loughborough (links) und Stuttgart (rechts)

6.2.2 Auswertung der normierten Einstrahlung bei ausgewählten Wellenlängen

Im Weiteren wird eine detailliertere Analyse der spektralen Einstrahlung aus dem MAGIC-Verfahren anhand von vier ausgewählten Wellenlängen gegeben. Hierzu wurde die Einstrahlung in einem Absorptionsband des Ozons (Katoband um 354 nm) und des Wasserdampfs (Katoband um 931 nm) ausgewählt, sowie ein Band im sichtbaren Spektralbereich (um 485 nm) und im Infrarot-Bereich (um 1010 nm), in dem die Absorption des Wasserdampfs eine untergeordnete Rolle spielt. Die Einstrahlung im jeweiligen Wellenlängenbereich wurde mit der Gesamteinstrahlung normiert, um lediglich spektrale Effekte zu untersuchen. In den Abbildungen 6.11 und 6.12 sind die Einstrahlungen in den ausgewählten Wellenlängenbereichen normiert mit der Gesamteinstrahlung im Jahresverlauf, jeweils mit dem Monatsmittelwert sowie dem 10. und 90. Perzentil, dargestellt. An beiden Standorten wird aus dem MAGIC-Verfahren ein ähnlicher Jahresgang erzielt: Im Sommer ist der Anteil im sichtbaren und ultravioletten Spektralbereich höher als im Winter, der Anteil der Infrarot-Strahlung hingegen ist im Winter höher als im

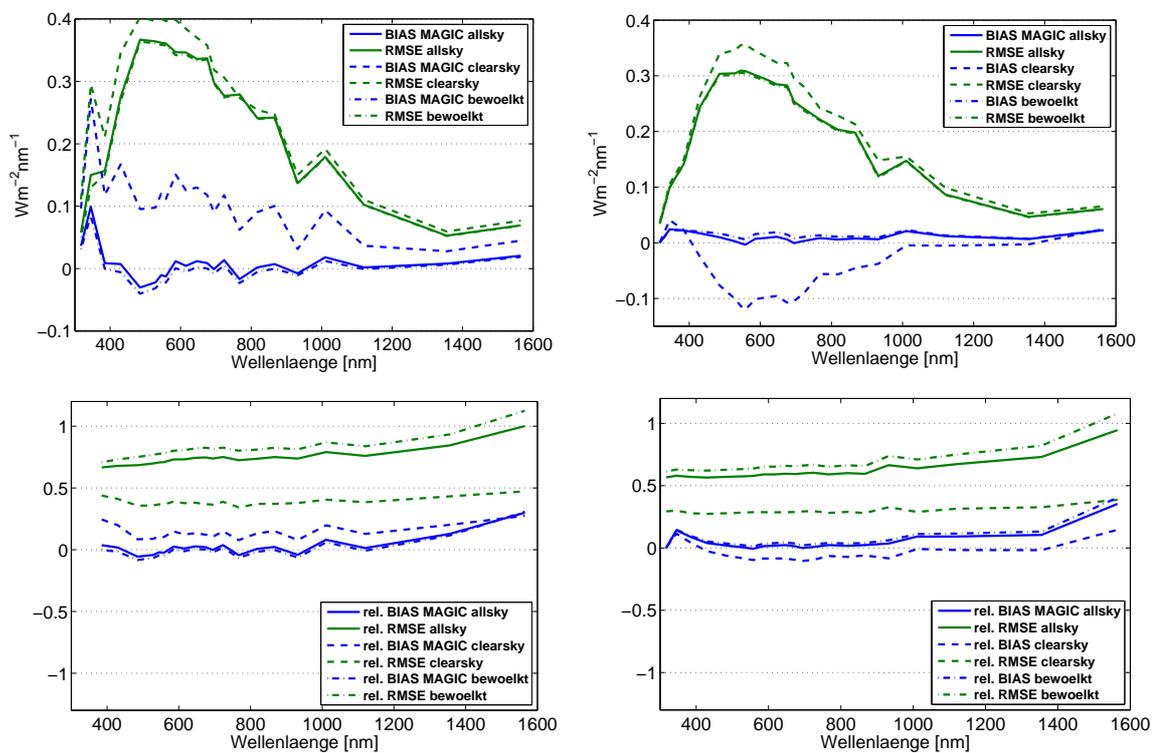


Abbildung 6.10: Absoluter BIAS und RMSE (oben), sowie relativer BIAS und RMSE (unten) des MAGIC-Verfahrens für alle Situationen, für wolkenlose Situationen und für bewölkte Situationen. Links: am Standort Loughborough, rechts: am Standort Stuttgart.

Sommer. Mit diesem Ergebnis stimmt das MAGIC-Verfahren mit den Bodenmessungen überein. Eine Ausnahme bildet die normierte Einstrahlung um 345 nm, die in Loughborough gemessen wurde. Sie weist nur einen sehr geringen Anstieg im Sommer auf. Aufgrund der Kalibrierungsprobleme in diesem Spektralbereich in Loughborough erscheint der aus MAGIC gegebene Verlauf realistischer, vor allem da er am Standort Stuttgart sehr gut mit den Bodenmessungen übereinstimmt. In Loughborough führt die deutlich höhere normierte Einstrahlung aus MAGIC im UV-Bereich zu einer deutlich geringeren Einstrahlung in den Wellenlängenbereichen um 485 nm und 931 nm.

Die normierte Einstrahlung in den ausgewählten Wellenlängenbereichen wurde zusätzlich in Abhängigkeit vom Sonnenstand und dem Clearsky-Index untersucht. Die Ergebnisse hinsichtlich des Bewölkungsgrads sind im Anhang (Abb. 7.11 - Abb. 7.12) zu finden. Sowohl die Bodenmessung als auch MAGIC ergeben einen deutlichen Abfall der normierten Einstrahlung bei kurzen Wellenlängen und einen Anstieg im IR-Bereich. Bei der Auswertung in Bezug auf den Sonnenstand in Stuttgart (Abb. 6.13) werden allerdings Unterschiede bei kleinen Sonnenständen deutlich. In diesen Situationen wird die Einstrahlung im kurzwelligen Bereich unterschätzt und im langwelligen Bereich überschätzt, d.h. die spektrale Verteilung der Einstrahlung wird deutlich zu größeren Wellenlängen verschoben. In Loughborough wird dies durch die starke Überschätzung bei 345 nm und der damit verbundenen Unterschätzung in den mittleren Wellenlängenbereichen überlagert (s. Abb. 7.13 im Anhang).

Das MAGIC-Verfahren bietet bei geringerem Rechenaufwand kaum Qualitätsverluste im Vergleich zum SOLIS-Verfahren. Im Mittel wird die spektrale Verteilung der Einstrahlung so, wie auch bei der Berechnung mit SOLIS, zu größeren Wellenlängen verschoben, vermutlich genau wie auch bei SOLIS durch die verwendeten Parametrisierungen. Dies wird auch bei der Auswertung der normierten Einstrahlung bei ausgewählten Wellenlängen deutlich. Qualitativ wird der Jahresgang in den betrachteten Wellenlängenbereichen allerdings gut wiedergegeben. Die verwendeten Klimatologien, bzw. Satellitenmessungen zur Bestimmung der atmosphärischen Zusammensetzung beschreiben den Verlauf der atmosphärischen Bestandteile in den einzelnen Monaten offensichtlich ausreichend. Durch die Normierung mit der Breitbandeinstrahlung kann allerdings keine Aussage über ihre absoluten Werte getroffen werden.

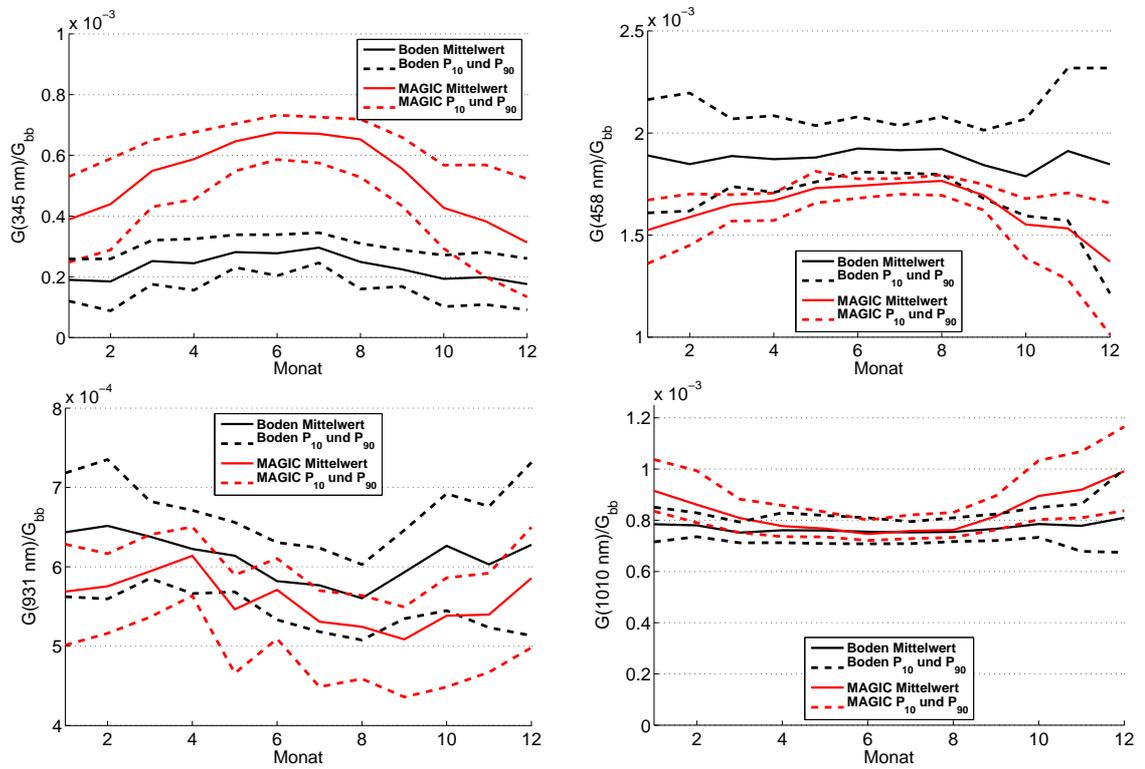


Abbildung 6.11: Jahresgang der normierten Einstrahlung in ausgewählten Wellenlängenbändern am Standort Loughborough (Monatsmittelwerte sowie 10. und 90. Perzentil). Oben links: 345 nm, oben rechts: 458 nm, unten links: 931 nm, unten rechts: 1010 nm.

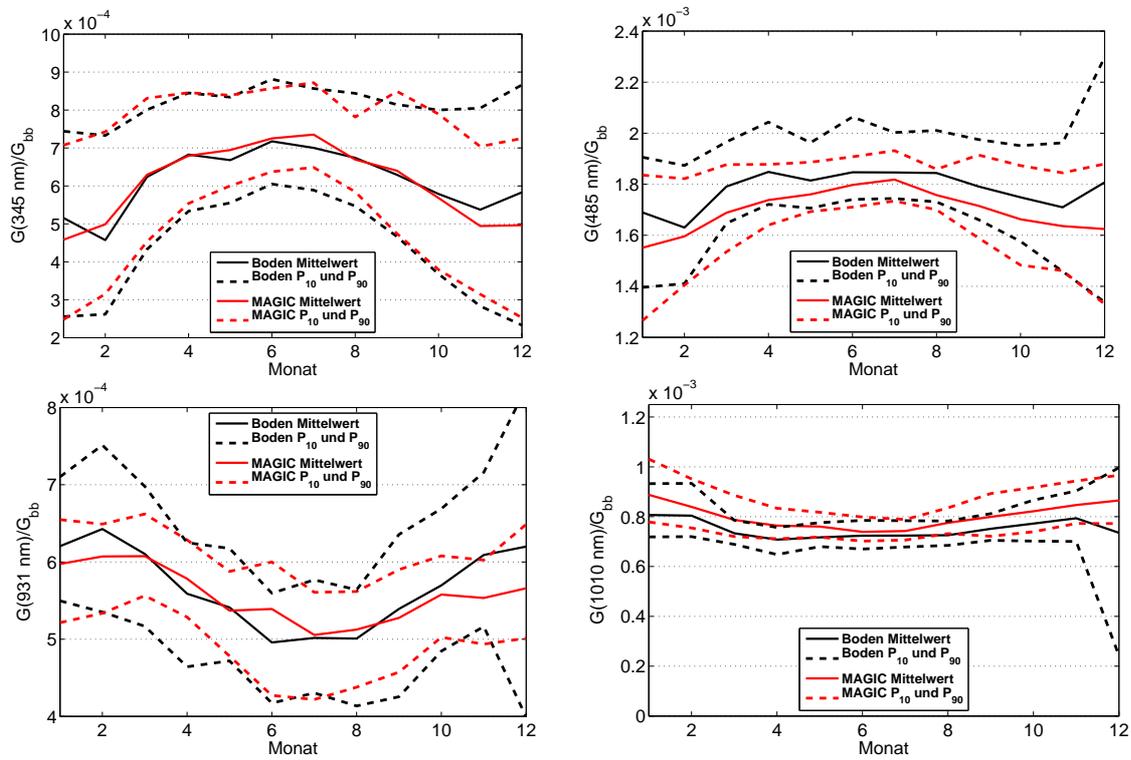


Abbildung 6.12: Jahresgang der normierten Einstrahlung in ausgewählten Wellenlängenbändern am Standort Stuttgart (Monatsmittelwerte sowie 10. und 90. Perzentil). Oben links: 354 nm, oben rechts: 485 nm, unten links: 931 nm, unten rechts: 1010 nm.

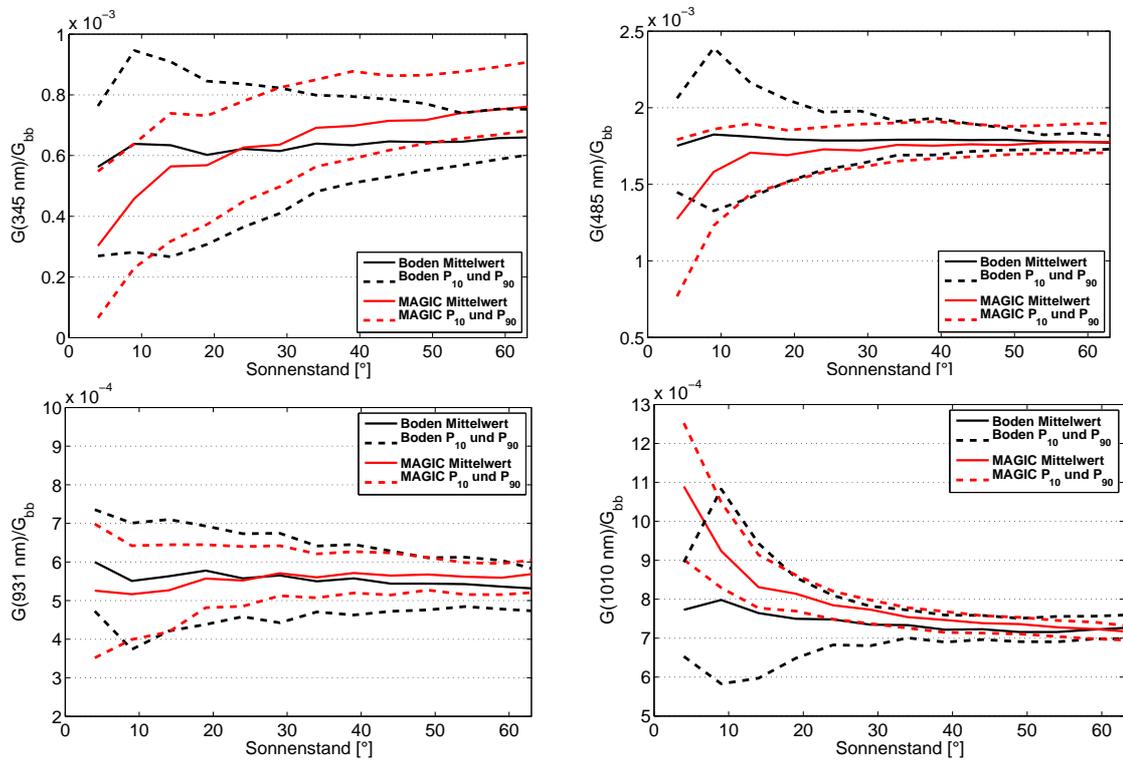


Abbildung 6.13: Normierte Einstrahlung in Abhängigkeit vom Sonnenstand am Standort Stuttgart (Monatsmittelwerte sowie 10. und 90. Perzentil) Oben links: 354 nm, oben rechts: 485 nm, unten links: 931 nm, unten rechts: 1010 nm.

Kapitel 7

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Berechnung der spektralen Einstrahlung aus Satellitendaten ist sowohl mit dem SOLIS- als auch mit dem MAGIC-Verfahren möglich. Beiden liegen die gleichen Parametrisierungen zu Grunde, um Rechenzeit zu sparen. Während in SOLIS-Clearsky die Modified-Lambert-Beer-Parameter in Abhängigkeit von der atmosphärischen Zusammensetzung jeweils neu berechnet werden, sind sie im MAGIC-Verfahren in Look-up-Tabellen hinterlegt, und werden gegebenenfalls interpoliert. Die berechnete, spektrale Einstrahlung aus den beiden Verfahren unterscheidet sich dabei kaum.

Bei der Validierung der Verfahren ist die Unterscheidung der möglichen Fehlerursachen wichtig. Das Spektrum kann zum Einen durch falsche Eingangswerte für die atmosphärische Zusammensetzung, durch die Vielzahl an Parametrisierungen (MLB, spektrale Wolkenkorrektur, Direktstrahlung in Abhängigkeit vom Clearsky-Index) oder zum Anderen durch die Umrechnung auf die geneigte Fläche ungenau wiedergegeben werden.

Zur Validierung muss eine gute Qualität der Bodenmessung gewährleistet sein. Diese wird durch viele Aspekte beeinflusst, wie Verunreinigungen der Einkoppeloptik und Veränderungen der Empfindlichkeiten der Detektoren zwischen den Kalibrierungen. Stark variierende Einstrahlungsverhältnisse können auch dazu führen, dass die Aussteuerung der Detektoren nicht immer ideal ist. Bei fremdgemessenen Datensätzen ist es besonders schwierig diese Einflussgrößen abzuschätzen. Aber auch bei den eigenen Messungen sind beobachtete Abweichungen nicht leicht zu erklären. Die deutliche Unterschätzung des verwendeten Spektrometers im Vergleich zur Pyranometermessung kann teilweise durch den breiten Empfindlichkeitsbereich des Pyranometers im Vergleich zum gemessenen Wellenlängenbereich des Spektralradiometers begründet werden. Aber auch die vom Hersteller angegebenen

Unsicherheiten pro Wellenlängenbereich reichen nicht aus, um die Abweichung vollständig nach zu vollziehen. Auch wenn kein zeitlicher Trend dieser Abweichung nachgewiesen wurde, der auf eine langsame Veränderung des Systems, im Verhalten der Detektoren, auf dem optischen Weg durch das Gerät oder durch Verschmutzung der Einkoppeloptik hinweisen würde, wird eine Neukalibrierung des Geräts möglicherweise eine Verbesserung der Messung ermöglichen.

Zur besseren Bewertung der möglichen Fehlerursachen des SOLIS-Verfahrens dienen die Sensitivitätsstudien, die sich z.T. auch auf das MAGIC-Verfahren übertragen lassen. Zum Einen zeigen sie deutlich, wie das SOLIS-Verfahren auf Änderungen der Eingangsparameter reagiert. Des Weiteren lassen sich durch den direkten Vergleich mit Strahlungstransportrechnungen Schwachstellen der Parametrisierungen aufzeigen. Die Untersuchung der spektral aufgelösten Global-, Direkt- und Diffusstrahlung in Abhängigkeit von Bewölkung und Sonnenstand zeigt dabei recht deutlich, dass die Globalstrahlung vor allem bei niedrigem Sonnenstand mit Bewölkung einer deutlicheren spektralen Korrektur bedarf, als sie zur Zeit verwendet wird.

Die Veränderung der Direktstrahlung mit zunehmender Bewölkung ist im aktuellen Verfahren im Prinzip nur für die Breitband-Direktstrahlung berücksichtigt. Die verwendete Parametrisierung wird zwar auch auf die spektralen Bänder angewendet, sie beinhaltet aber nicht die steigende, wellenlängenabhängige Streuung der Direktstrahlung in den 5° -Winkelbereich um die Sonne, der bei der Messung der Direktstrahlung mit aufgenommen wird. Insgesamt sollte die Direktstrahlung auch bei wolkenlosem Himmel statt mit einem Breitband-Faktor von 5% mit einer spektral angepassten Funktion (ähnlich der spektralen Wolkenkorrektur) auf den Messbereich korrigiert werden.

Die Auswertung der Klucher-Methode durch Vergleich mit integrierten Radianzen ergab, dass sie sich insgesamt gut auf die spektralen Bänder anwenden lässt und nur im wolkenlosen Fall geringe Abweichungen aufweist. Zukünftig sollen detailliertere Auswertungen, unter anderem anhand gemessener Spektren auf die horizontale und geneigte Fläche, und Vergleiche mit anderen Modellen zur Umrechnung auf die geneigte Fläche durchgeführt werden.

Die Validierung der berechneten Einstrahlung, vor allem aber die Auswertung der daraus resultierenden mittleren Photonenenergie, zeigt Abweichungen insbesondere bei kleinen Sonnenständen und starker Bewölkung. Dies lässt sich zum Teil auf die in den Sensitivitätsstudien gezeigten Schwachstellen des Verfahrens zurück führen. Zur weiteren Messung der spektralen Einstrahlung in Oldenburg ist zukünftig ein wetterfestes Gehäuse um die Einkoppeloptik geplant, um auch bei hoher Luftfeuchtigkeit und bei Regen messen

zu können. Gerade in solchen Situationen, die meist mit starker Bewölkung verbunden sind, ist bisher eine Auswertung nicht möglich gewesen.

Einen großen Einfluss auf die Qualität der berechneten Einstrahlung hat der gewählte Eingangs-Datensatz zur Beschreibung der atmosphärischen Zusammensetzung. Die verwendeten Klimatologien können z.T. erhebliche Abweichungen zur tatsächlichen Aerosol- oder Wasserdampfkonzentration aufweisen.

Neben dem Vergleich der berechneten, spektral aufgelösten Einstrahlung (und des daraus berechneten Einflusses auf verschiedene PV-Technologien) mit den gemessenen, spektralen Einstrahlungen wurden Modulmessungen aus [Kühnert, 2011] zur Auswertung hinzugezogen. Diese Messungen sind durch andere Effekte, wie z.B. Reflexionsverluste, Temperatureffekte oder Schwachlichtverhalten beeinflusst. Eine Trennung der verschiedenen Aspekte ist schwierig. [Kühnert, 2011] wendet eine Reflexionskorrektur nach [Sjerps-Koomen et al., 1996] auf die Direktstrahlung an, die möglicherweise auf die richtungsaufgelöste Diffusstrahlung übertragen werden könnte.

Anhang

A1: Sensitivitätsanalyse

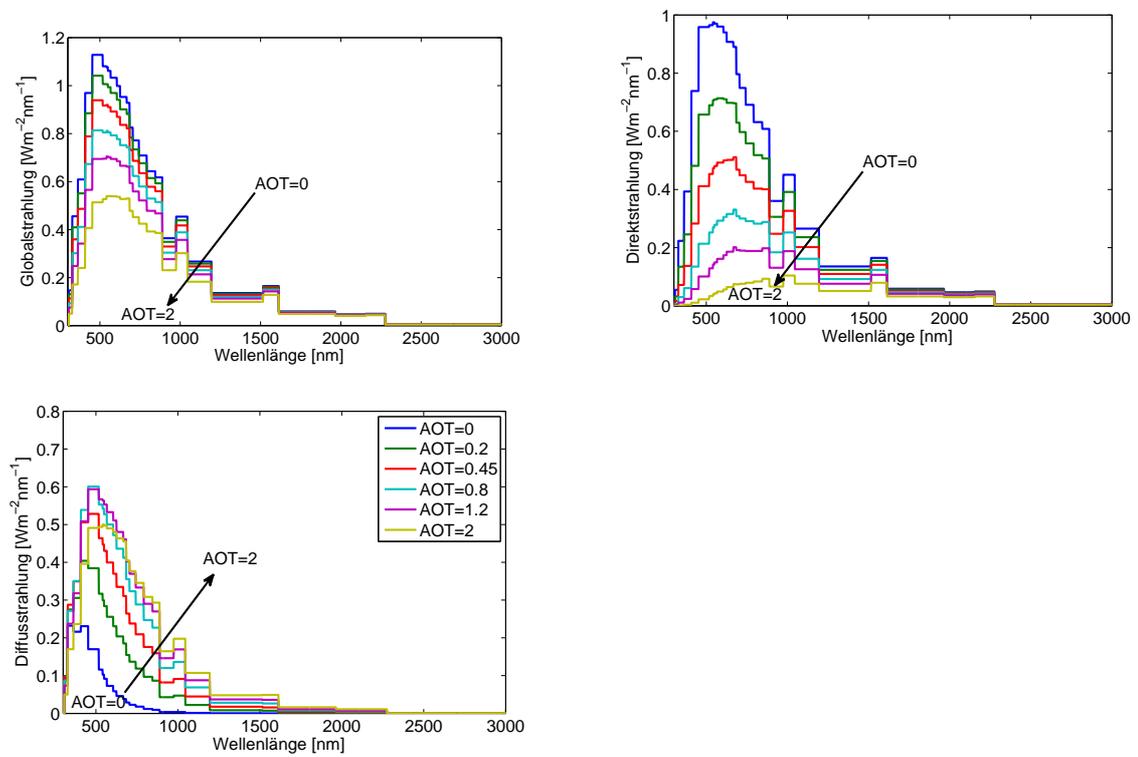


Abbildung 7.1: Spektrale Global-, Direkt- und Diffusstrahlung bei verschiedenen aerosol-optischen Dicken (wolkenloser Himmel, SZA = 50° , Wasserdampf: 15 mm, Ozon: 245 DU)

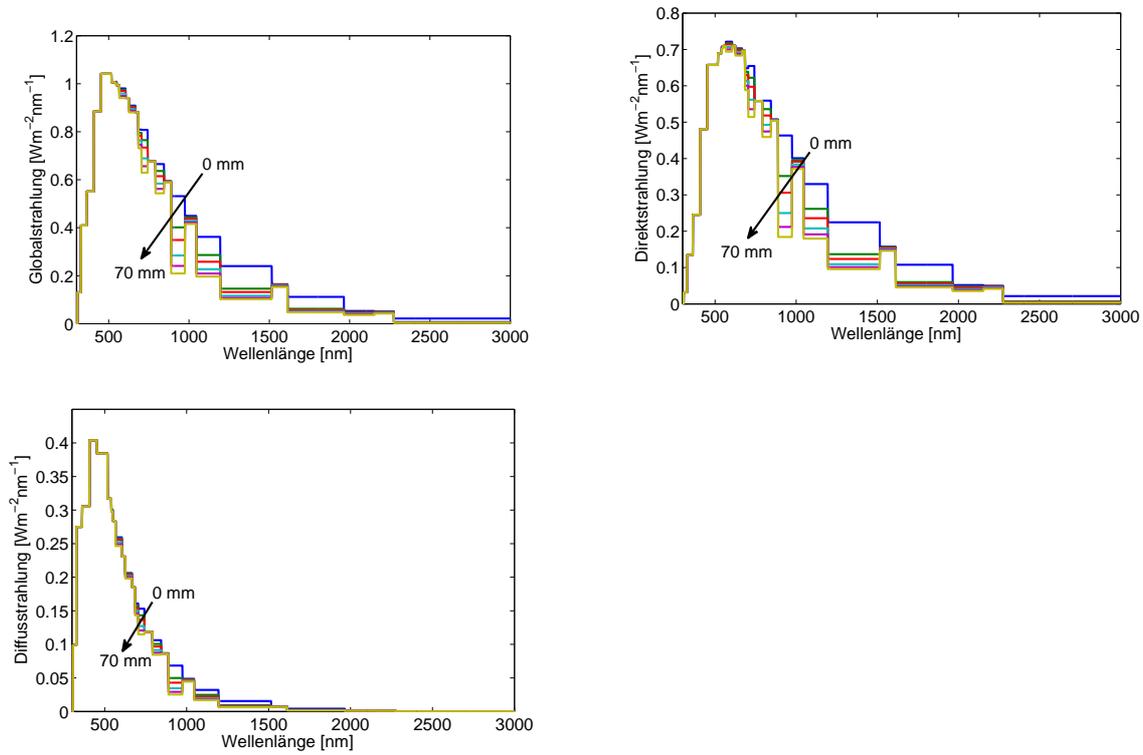


Abbildung 7.2: Spektrale Global-, Direkt- und Diffusstrahlung für verschiedene Wasserdampfgehalte (wolkenloser Himmel, $\text{SZA} = 50^\circ$, $\text{AOT} = 0.2$, Ozon: 245 DU)

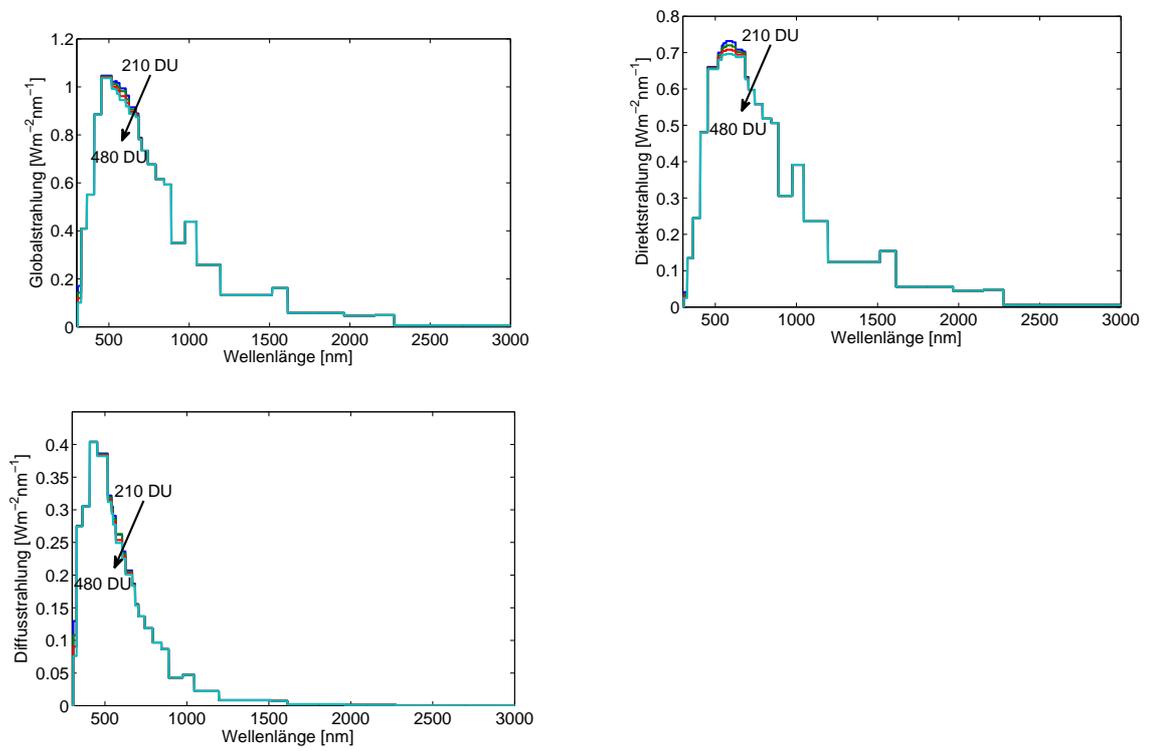


Abbildung 7.3: Spektrale Global-, Direkt- und Diffusstrahlung für verschiedenen Ozon-
 gehalte (wolkenloser Himmel, $\text{SZA} = 50^\circ$, $\text{AOT} = 0.2$, Wasserdampf: 15 mm)

A2: Validierung

A2.1 Qualitätskontrolle

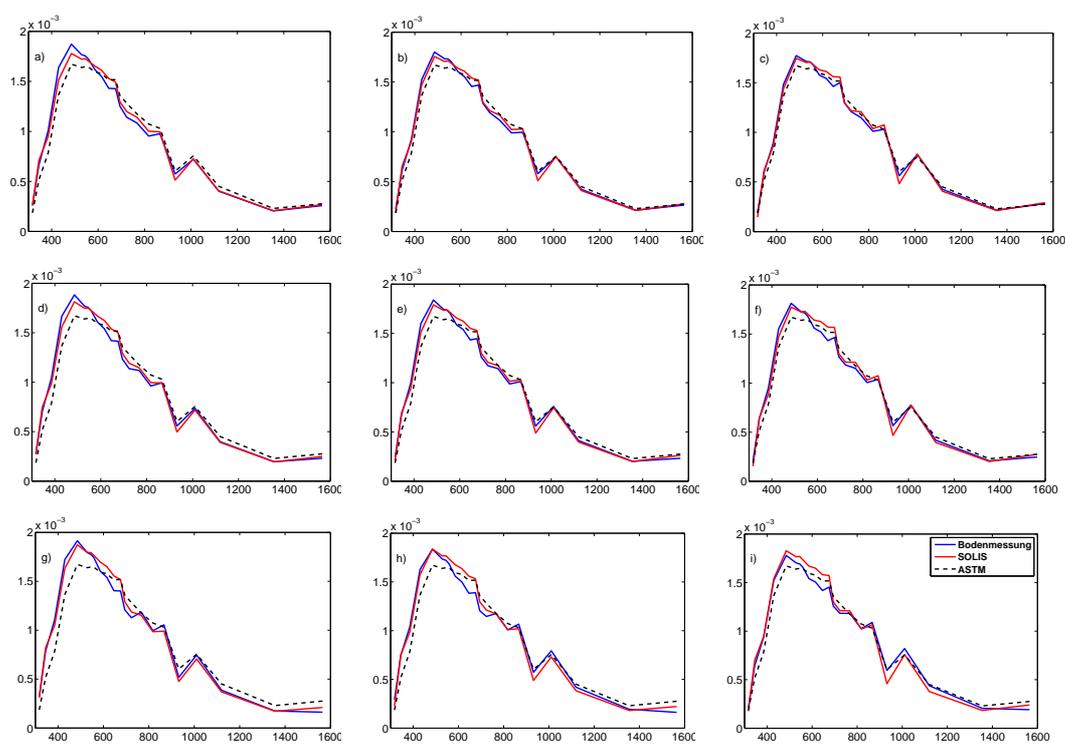


Abbildung 7.4: Normierte spektrale Einstrahlung am Standort Oldenburg gemessen und mit SOLIS (shettle typ: rural) berechnet, sortiert nach Sonnenstands- und Bewölkungsklassen (a) $k^* > 0.95$, $SZA < 65^\circ$; b) $k^* > 0.95$, $65^\circ \leq SZA < 65^\circ$; c) $k^* > 0.95$, $SZA \geq 75^\circ$; d) $0.6 < k^* \leq 0.95$, $SZA < 65^\circ$; e) $0.6 < k^* \leq 0.95$, $65^\circ \leq SZA < 65^\circ$; f) $0.6 < k^* \leq 0.95$, $SZA \geq 75^\circ$; g) $k^* \leq 0.6$, $SZA < 65^\circ$; h) $k^* \leq 0.6$, $65^\circ \leq SZA < 65^\circ$; i) $k^* \leq 0.6$, $SZA \geq 75^\circ$), verglichen mit dem ASTM-Standardspektrum.

A2.2 Validierung des SOLIS-Verfahrens

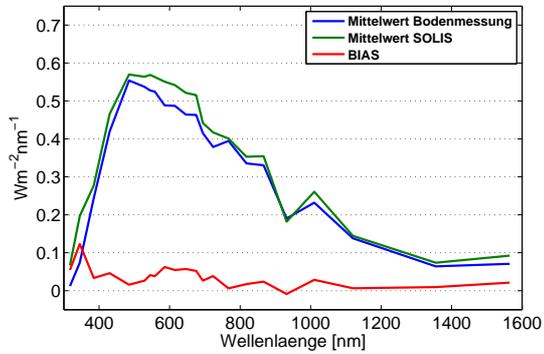


Abbildung 7.5: Mittleres Spektrum aus Bodenmessungen am Standort Loughborough und aus SOLIS mit der Kluchermethode auf die geneigte Fläche gerechnet, sowie BIAS und RMSE.

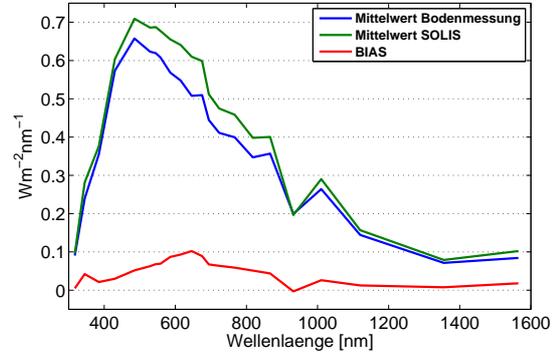


Abbildung 7.6: Mittleres Spektrum aus Bodenmessungen am Standort Oldenburg und mit SOLIS unter Verwendung des Shettle-Typs "rural" berechnet, sowie BIAS und RMSE.

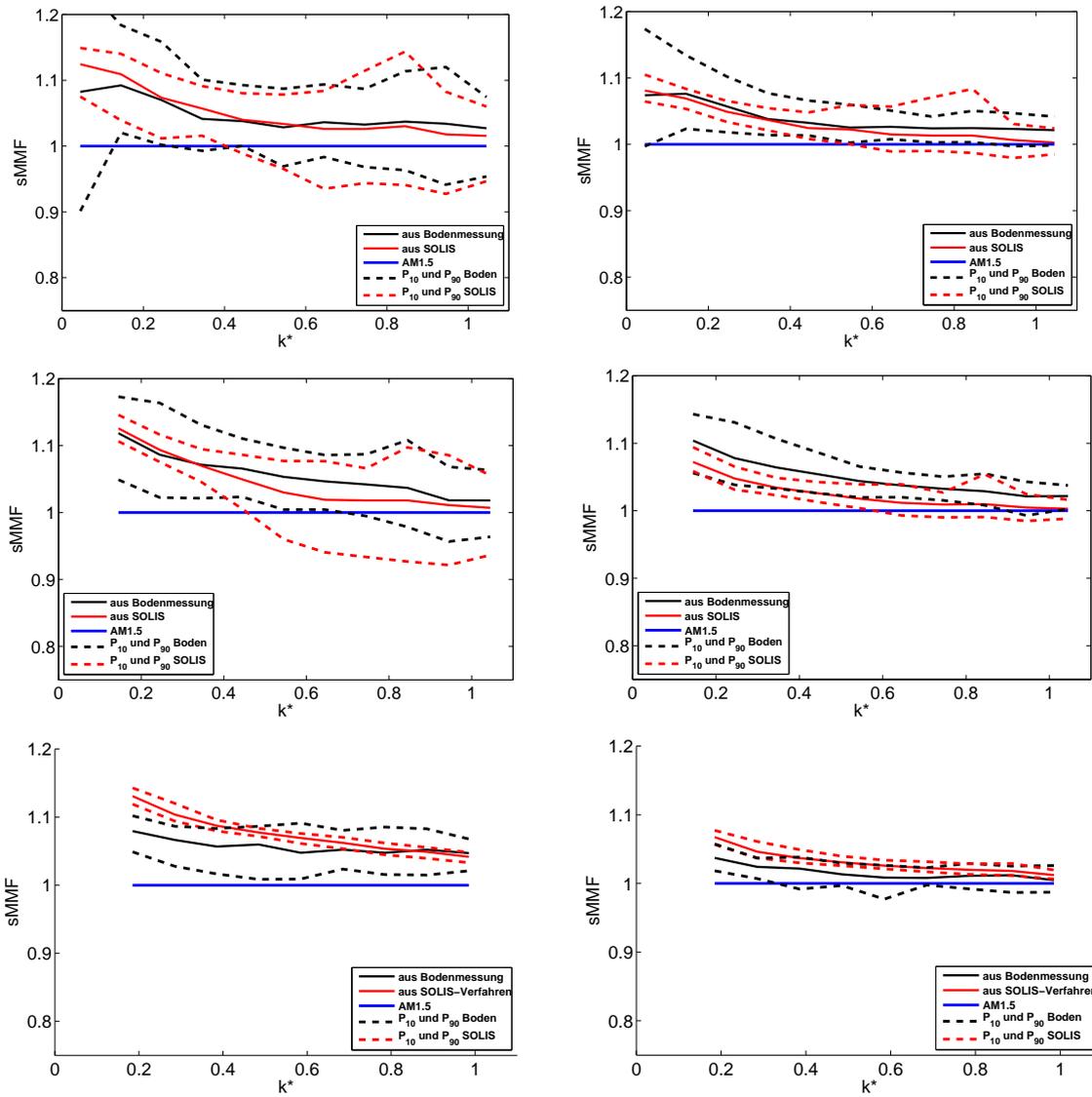


Abbildung 7.7: Spektraler Mismatch Faktor für amorphes Silizium (links) polykristallines Silizium (rechts) aus Bodendaten und dem SOLIS-Verfahren in Abhängigkeit von k^* am Standort Stuttgart (oben), Loughborough (Mitte), Oldenburg (unten).

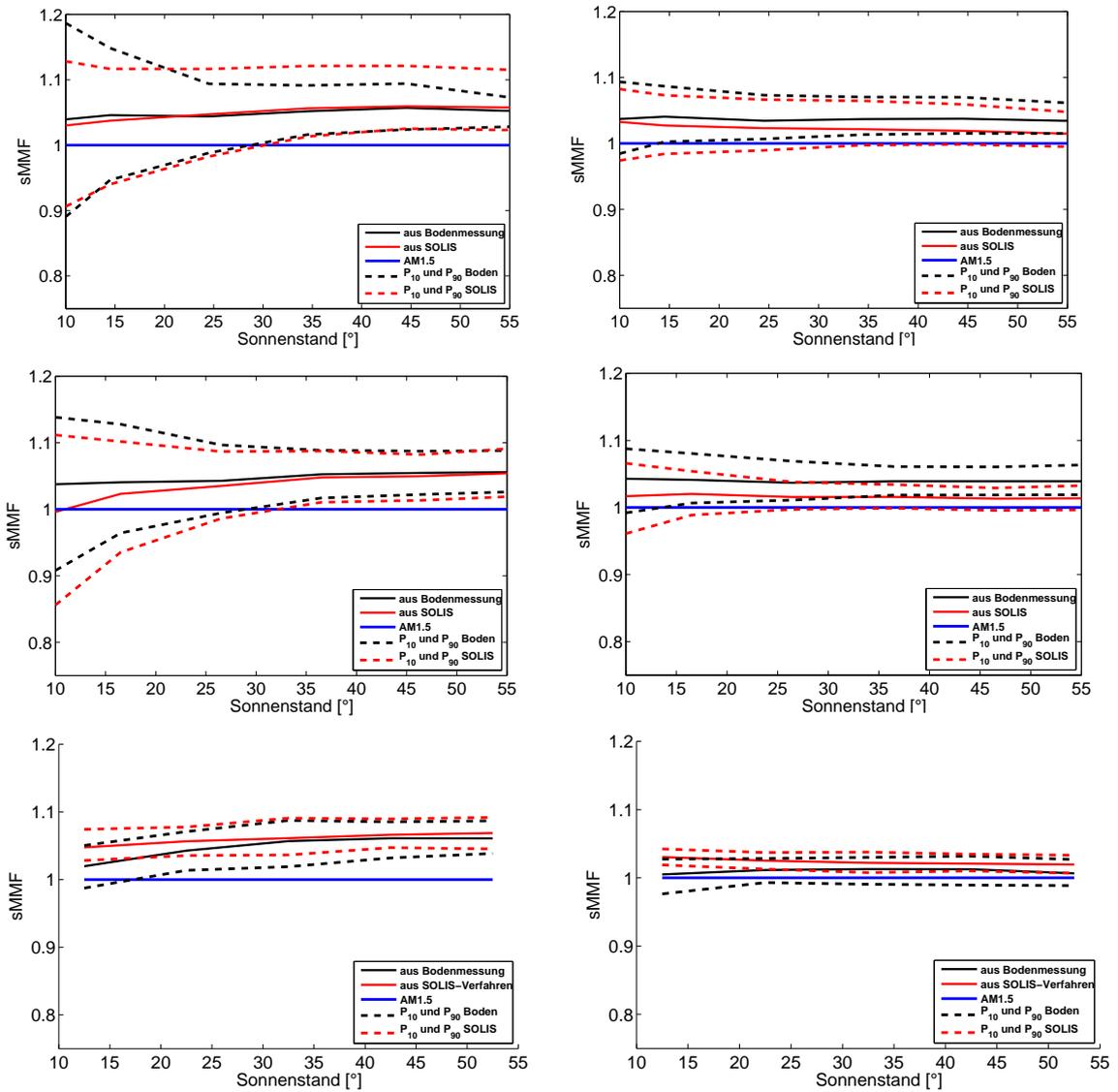


Abbildung 7.8: Spektraler Mismatch Faktor für amorphes Silizium (links) polykristallines Silizium (rechts) aus Bodendaten und dem SOLIS-Verfahren in Abhängigkeit vom Sonnenstand am Standort Stuttgart (oben), Loughborough (Mitte), Oldenburg (unten).

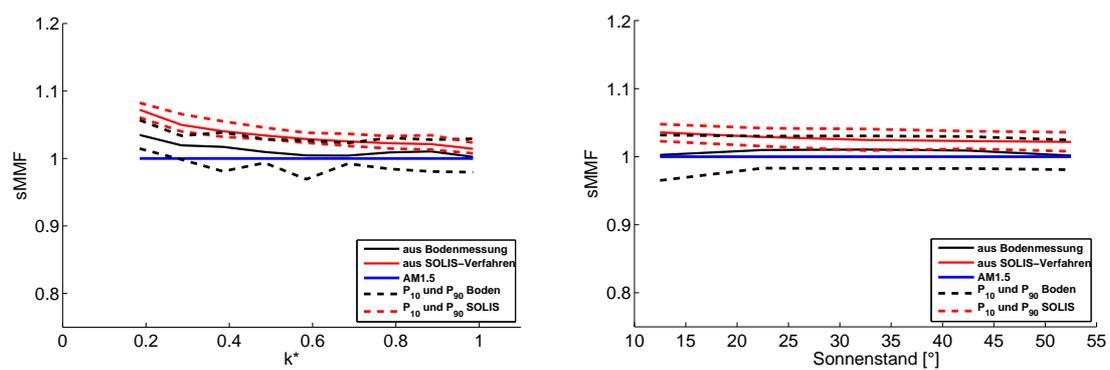


Abbildung 7.9: Spektraler Mismatch Faktor für CIS aus Bodendaten und dem SOLIS-Verfahren in Abhängigkeit von k^* (links) und vom Sonnenstand (rechts) am Standort Oldenburg.

A2.3 Validierung des MAGIC-Verfahrens

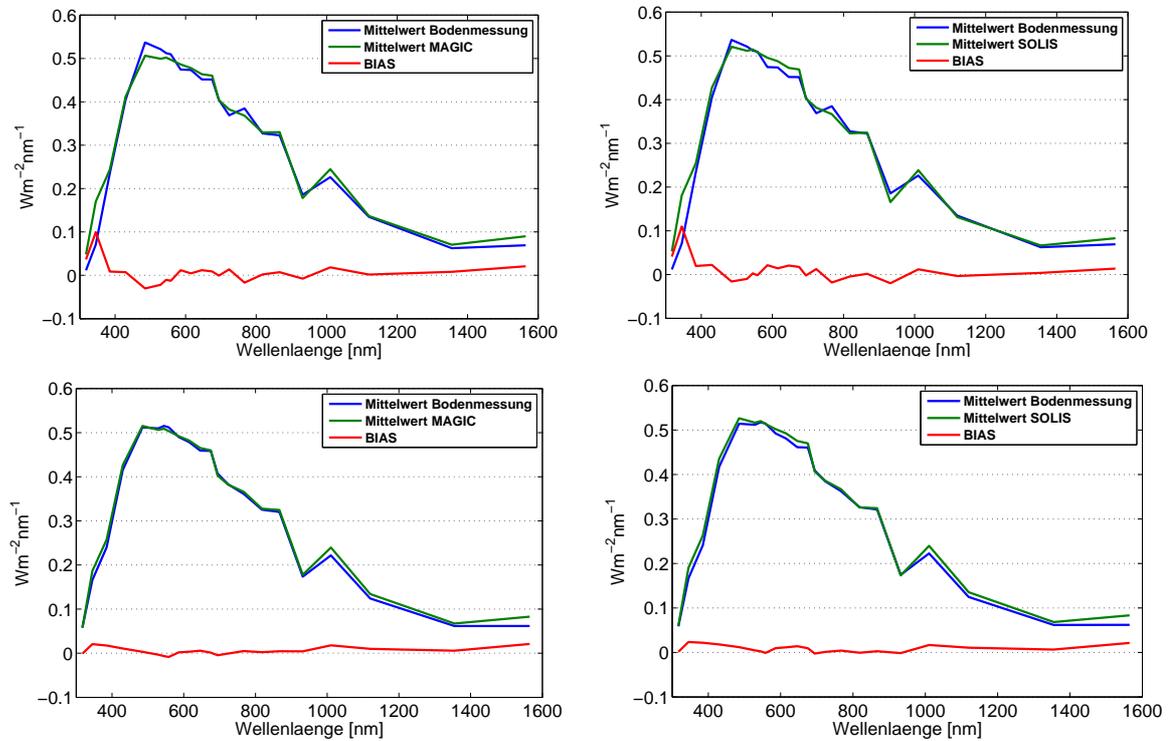


Abbildung 7.10: Mittleres Spektrum aus Bodenmessung und aus MAGIC (links) bzw. SOLIS (rechts) sowie BIAS an den Standorten Loughborough (oben) und Stuttgart (unten)

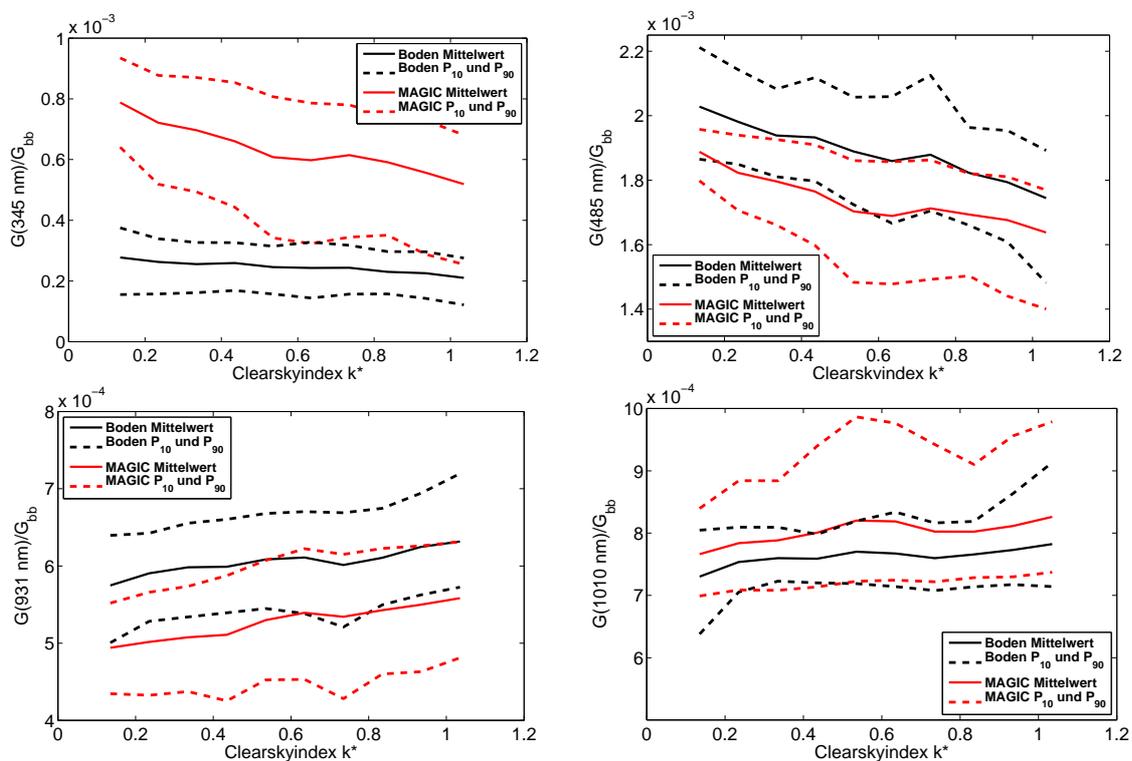


Abbildung 7.11: Normierte Einstrahlung in Abhängigkeit vom Clearsky-Index am Standort Loughborough (Monatsmittelwerte sowie 10. und 90. Perzentil). Oben links: 354 nm, oben rechts: 485 nm, unten links: 931 nm, unten rechts: 1010 nm.

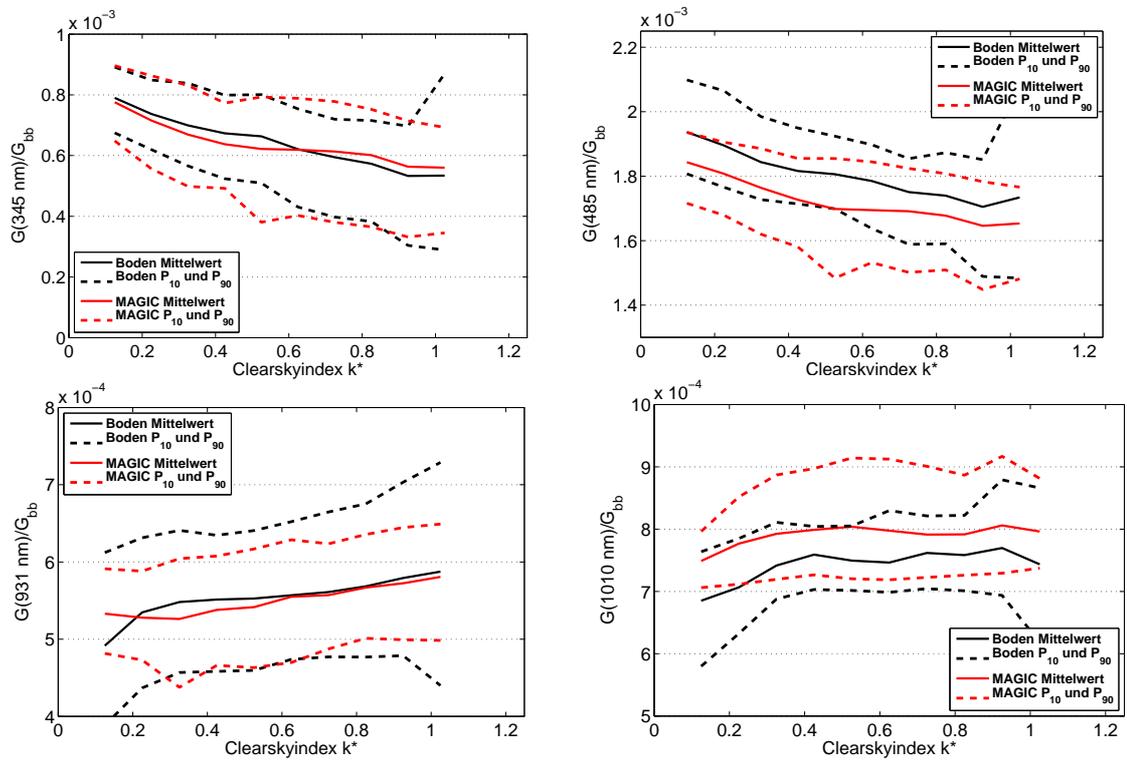


Abbildung 7.12: Normierte Einstrahlung in Abhängigkeit vom Clearsky-Index am Standort Stuttgart (Monatsmittelwerte sowie 10. und 90. Perzentil). Oben links: 345 nm, oben rechts: 485 nm, unten links: 931 nm, unten rechts: 1010 nm.

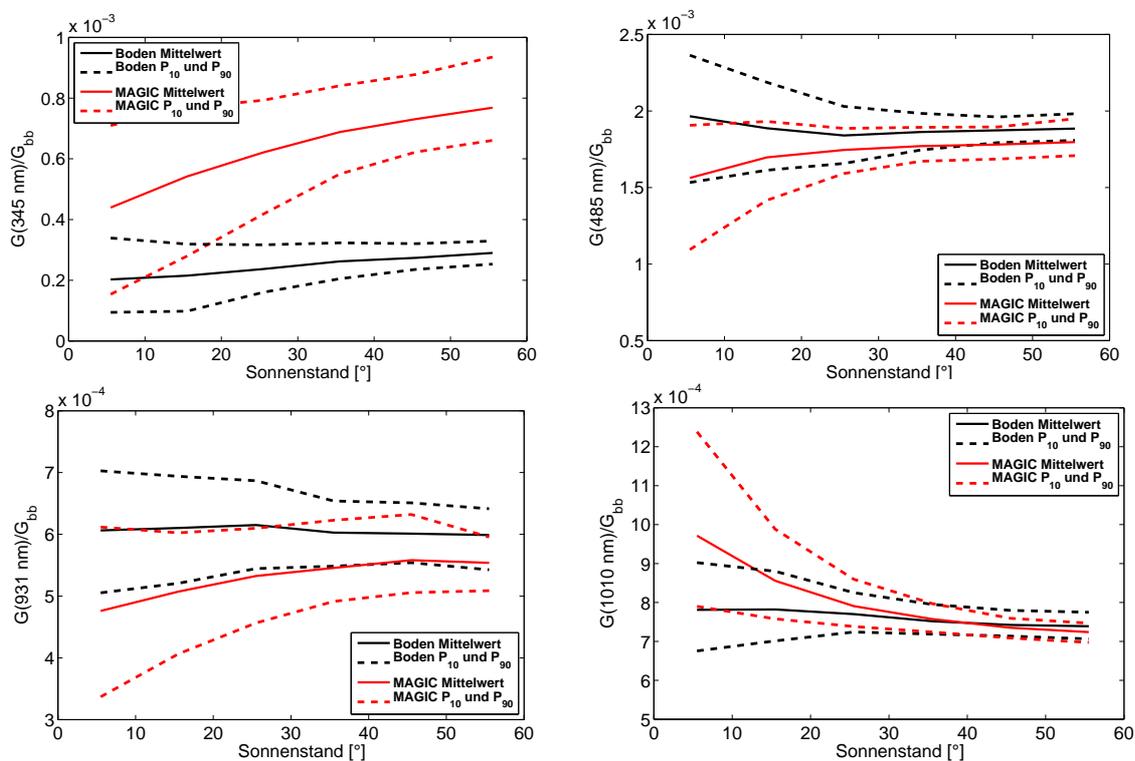


Abbildung 7.13: Normierte Einstrahlung in Abhängigkeit vom Sonnenstand am Standort Loughborough (Monatsmittelwerte sowie 10. und 90. Perzentil). (Oben links: 345 nm, oben rechts: 485 nm, unten links: 931 nm, unten rechts: 1010 nm.)

Wissenschaftliche Veröffentlichungen

Im Rahmen dieser Arbeit wurde an folgenden Veröffentlichungen mitgewirkt:

- T. Behrendt, A. Hammer, E. Lorenz, D. Heinemann: 'Spektrale Solarstrahlung aus Satellitendaten zur Bewertung des Leistungsverhaltens von Dünnschicht-Solarzellen', 24. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein März 2009.
- T. Behrendt, J. Kühnert, A. Hammer, E. Lorenz, J. Betcke, D. Heinemann: 'Spectrally resolved solar irradiance from satellite data to investigate the performance of thin film photovoltaics', 25th EPVSEC Valencia, September 2010.
- J. Betcke, T. Behrendt, J. Kühnert, A. Hammer, E. Lorenz, D. Heinemann: 'Spectrally resolved solar irradiance derived from meteorological cloud information - Methods and validation', EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Cordoba September 2010.
- T. Behrendt, J. Kühnert, A. Hammer, E. Lorenz, J. Betcke, D. Heinemann: 'Spektrale Solarstrahlung zur Bewertung des Leistungsverhaltens von Dünnschicht-Solarzellen', 26. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, März 2011.
- R.W. Müller, T. Behrendt, A. Hammer, A. Kemper: 'A New Algorithm for the Satellite-Based Retrieval of Solar Surface Irradiance in Spectral Bands', Remote Sensing, 2012.

Danksagung

Viele haben zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen, dafür möchte ich mich herzlich bedanken!

Prof. Jürgen Parisi gilt mein Dank für die Betreuung. Insbesondere in der Endphase haben mir seine Ratschläge viel genützt. Auch Prof. Carsten Agert sei als Zweitgutachter gedankt.

In der Arbeitsgruppe Energiemeteorologie wurde ich bei einem angenehmen Arbeitsklima immer gut unterstützt, unter anderem im Spektrometer-Schichtdienst. Dr. Detlev Heinemann, Dr. Elke Lorenz und Dr. Annette Hammer haben mich mit vielen Anregungen sehr gut betreut. Jan Kühnert danke ich für die gute Zusammenarbeit bei der Realisierung des Messaufbaus und den Konferenzbeiträgen. Mit Jethro Betcke habe ich mich zusätzlich oft inhaltlich ausgetauscht können. Stephan Block möchte ich danken, dass er mir immer unmittelbar bei Problemen mit dem Computer geholfen hat und Dr. Thomas Scheidsteger für Hilfestellungen bei Programmierfragen.

Zur Realisierung des Messaufbaus waren einige mit Rat und Tat zur Stelle, insbesondere gilt mein Dank Wilhelm Jürgens, Udo Kulschewski und Hans Holtorf.

Außerhalb der Universität Oldenburg danke ich Dr. Richard Müller für die Zusammenarbeit und Tom Betts und Bastian Zinßer für die spektralen Einstrahlungsmessungen aus Loughborough und Stuttgart.

Neben den Kollegen sei meiner Familie und meinen Freunden für die Unterstützung und den Ausgleich von der Arbeit gedankt. Insbesondere gibt es viele Gründe, meinem Mann Christian und meiner Tochter Lisa zu danken. Danke auch an meine Eltern für die große Unterstützung in jeglicher Hinsicht.

Ich danke den Korrekturlesern für die Verbesserungsvorschläge.

Die Arbeit wurde gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt im Rahmen des Promotionsstipendienprogramms. Ich danke den Projektleitern für ihren Aufwand bei der Einrichtung und Aufrechterhaltung des AERONET-Standorts Chilbolton.

Lebenslauf

Persönliche Daten

| | |
|--------------------|------------------------------|
| Name | Tanja Behrendt geb. Kaminski |
| E-Mail | t.behrendt@uni-oldenburg.de |
| Geburtsdatum, -ort | 15. Mai 1981, Salzkotten |

Ausbildung

| | |
|-------------------|---|
| Juni 2000 | Abitur am Gymnasium St. Michael, Paderborn; |
| 2000 - 2006 | Studium: Marine Umweltwissenschaften an der Universität Oldenburg |
| Jan. - Sept. 2006 | Diplomarbeit: „Verwendbarkeit verschiedener Aerosolklimatologien zur Berechnung der Direktstrahlung bei wolkenlosem Himmel“ |
| Seit Jul. 2007 | Promotion an der Carl-von-Ossietzky Universität |
| Feb. - Aug. 2009 | Mutterschutz und Elternzeit |

Berufserfahrung

| | |
|------------------|--|
| Seit Okt. 2005 | Studentische Hilfskraft: Praktikumsbetreuung im internationalen Studiengang „Postgraduate Programme Renewable Energy“ (PPRE) an der Carl-von-Ossietzky Universität Oldenburg (seit Apr. 2007 als wissenschaftliche Hilfskraft) |
| Apr. – Jun. 2007 | wissenschaftliche Hilfskraft in der Arbeitsgruppe Energiemeteorologie an der Carl-von-Ossietzky Universität Oldenburg |
| Seit Jan. 2011 | wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Arbeitsgruppe Energiemeteorologie |

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen benutzt habe. Des Weiteren erkläre ich, dass die Dissertation weder in ihrer Gesamtheit noch in Teilen einer anderen wissenschaftlichen Hochschule zur Begutachtung in einem Promotionsverfahren vorliegt oder vorgelegen hat.

Oldenburg, den 6. September 2012

Literaturverzeichnis

- ASTM. Standard tables for reference solar spectral irradiances: Direct normal and hemispherical on 37 degree tilted surface. Standard G173-03. *Techn Ber. ASTM*, 2003.
- T. Behrendt, A. Hammer, E. Lorenz, and D. Heinemann. Spektrale Solarstrahlung aus Satellitendaten zur Bewertung des Leistungsverhaltens von Dünnschicht-Solarzellen. *24. Symposium Photovoltaische Solarenergie*, 2009.
- T. Behrendt, J. Kühnert, A. Hammer, E. Lorenz, J. Betcke, and D. Heinemann. Spectrally resolved solar irradiance from satellite data to investigate the performance of thin film photovoltaics. *25th European Photovoltaic Solar Energie Conference*, 2010.
- T. Behrendt, J. Kühnert, A. Hammer, E. Lorenz, J. Betcke, and D. Heinemann. Spektrale Solarstrahlung zur Bewertung des Leistungsverhaltens von Dünnschicht-Solarzellen. *26. Symposium Photovoltaische Solarenergie*, 2011.
- J. Betcke, C. Costanzo, A. Hammer, C. Hoyer, R. Kuhleemann, E. Lorenz, R. W. Müller, and T. H. Scheidsteiger. *Solar Irradiance from MSG data - the Heliosat and Solis Software. User Manual, Program description, Installation guide*, 2005.
- J. Betcke, T. Behrendt, J. Kühnert, A. Hammer, E. Lorenz, and D. Heinemann. Spectrally resolved solar irradiance derived from meteosat cloud information - methods and validation. *EUMETSAT Meteorological Satellite Conference*, 2010.
- T.R. Betts. Investigation of Photovoltaic Device Operation under Varying Spectral Conditions. *Dissertation, Loughborough University*, 2004.

- T.R. Betts, R. Gottschalg, and D.G. Infield. Spectral irradiance correction for pv system yield calculations. *19th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2005.
- H. Field. Solar cell spectral response measurement errors related to spectral band width and chopped light waveform. *26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1997.
- Instrument Systems GmbH. *SPECTRO 320 D R5 - optical scanning spectrometer, Benutzerhandbuch 5.1.*, 2005.
- A. Hammer. Anwendungsspezifische Solarstrahlungsinformationen aus Meteosat-Daten. *Dissertation, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg*, 2000.
- A. Hammer, D. Heinemann, C. Hoyer, R. Kuhlemann, E. Lorenz, R. W. Müller, and H. G. Beyer. Solar energy assessment using remote sensing technologies. *Remote Sensing of Environment*, 86:423–432, 2003.
- A.W. Harrison and C.A. Coombes. Comparison of model and indirectly measured diffuse sky irradiances of tilted surfaces. *Atmosphere-Ocean*, 26:193–202, 1988.
- D.A. Sanchez Herrera. Use of the solis satellite-based solar spectral irradiance for characterization of thin film photovoltaic modules. *Masterarbeit, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg*, 2007.
- B. Houshyani Hassanzadeh, A.C. de Keizer, N.H. Reich, and W.G.J.H.M. van Sark. The effect of a varying solar spectrum on the energy performance of solar cells. *22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2007.
- T. Huld, T. Sample, and E.D. Dunlop. A simple model for estimating the influence of spectrum variations on PV performance. *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2009.
- IEC. 60904-3: Photovoltaic devices - part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data. *Techn. Ber. IEC*, 2008.
- IEC. 60904-7: Photovoltaic devices - part 7: Computation of the spectral mismatch correction for measurements of photovoltaic devices. *Techn. Ber. IEC*, 2007.

- T. Kaminski. Verwendbarkeit verschiedener Aerosolklimatologien zu Berechnung der Direktstrahlung bei wolkenlosem Himmel. *Diplomarbeit, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg*, 2006.
- S. Kato, P. Ackermann, J.H. Mather, and E. E. Clothiaux. The k-distribution method and correlated-k approximation for a shortwave radiative transfer model. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 62: 109–121, 1999.
- R.P. Kenny, A. Ioannides, H. Müllejjans, and E.D. Dulop. Spectral effects on the energy rating of thin film modules. *19th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2004.
- D.L. King, J.A. Kratochvil, and W.E. Boyson. Measuring solar spectral and angle-of-incidence effects on photovoltaic modules and solar irradiance sensors. *26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1997.
- S. Kinne. Aerosol direct radiative forcing with an AERONET touch. http://www.dwd.de/en/FundE/Klima/KLIS/int/CM-SAF/products/add_on/aerosol, 2005.
- S. Kinne, U. Lohmann, J. Feichter, M. Schulz, C. Timmreck, S. Ghan, R. Easter, M. Chin, P. Ginoux, T. Takemura, I. Tegen, D. Koch, M. Herzog, J. Penner, G. Pitari, B. Holben, T. Eck, A. Smirnov, O. Dubovik, I. Slutsker, D. Tanre, O. Torres, M. Mishchenko, I. Geogdzhayev, D. A. Chu, and Y. Kaufmann. Monthly averages of aerosol properties: A global comparison among models, satellite data, and AERONET ground data. *Journal of Geophysical Research*, 108 (D20):4634, 2003.
- S. Kinne, M. Schulz, C. Textor, S. Guibert, Y. Balkanski, S. E. Bauer, T. Berntsen, T. F. Berglen, O. Boucher, M. Chin, W. Collins, F. Dentener, T. Diehl, R. Easter, J. Feichter, D. Fillmore, S. Ghan, P. Ginoux, S. Gong, A. Grini, J. Hendricks, M. Herzog, L. Horowitz, I. Isaksen, T. Iversen, A. Kirkevag, S. Kloster, D. Koch, J. E. Kristjansson, M. Krol, A. Lauer, J. F. Lamarque, G. Lesins, X. Liu, U. Lohmann, V. Montanaro, G. Myhre, J. E. Penner, G. Pitari, S. Reddy, O. Seland, P. Stier, T. Takemura, and X. Tie. An AeroCom initial assessment - optical properties in aerosol component modules of global models. *Atmospheric Chemistry and Physics Discuss.*, 5:1–46, 2005.
- T.M. Klucher. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. *Solar Energy*, 23:111–114, 1979.

- J. Kühnert. Vergleich unterschiedlicher PV-Technologien in Bezug auf das Spektrum der Solarstrahlung. *Diplomarbeit, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg*, 2011.
- K.N. Liou. *Radiation and Cloud Processes in the Atmosphere - Theory, Observation and Modeling*. Oxford University Press, 1992.
- B. Mayer and A. Kylling. Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations – description and examples of use. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5:1855–1877, 2005a.
- B. Mayer and A. Kylling. *libRadtran - library for radiative transfer calculations (documentation)*, 2005b.
- T. Minemoto, Y. Nakada, H. Takahashi, and H. Takakura. Uniqueness verification of solar spectrum index of average photon energy for evaluating outdoor performance of photovoltaic modules. *Solar Energy*, 83:1294–1299, 2009.
- M. Mishchenko, J.E. Penner, and D. Anderson. Global Aerosol Climatology Project. *Journal of Atmospheric Science*, 59, Nr.3:249, 2002.
- T. Muneer. *Solar Radiation and Daylight Models*, chapter 5 Solar Spectral Radiation. Elsevier, 2004.
- R.W. Müller, K. F. Dagestad, P. Ineichen, M. Schroedter-Homscheidt, S. Cros, D. Dumortier, R. Kuhlemann, J. A. Olseth, G. Pernavieja, C. Reise, L. Wald, and D. Heinemann. Rethinking satellite based solar irradiance modelling - the SOLIS clear-sky module. *Remote Sensing of Environment*, 91 (2):160–174, 2004.
- R.W. Müller, C. Matsoukas, A. Gratzki, H.D. Behr, and R. Hollmann. The CM-SAF operational scheme for the satellite based retrieval of solar surface irradiance - a LUT based eigenvector hybrid approach. *Remote Sensing of Environment*, 113 (5):1012–1024, 2009.
- R.W. Müller, T. Behrendt, A. Hammer, and A. Kemper. A new algorithm for the satellite-based retrieval of solar surface irradiance in spectral bands. *Remote Sensing*, 4(3):622–647, 2012.
- J.J. Perez-Lopez, F. Fabero, and F. Chenlo. Experimental solar spectral irradiance until 2500 nm: Results and influence on the pv confersion of different materials. *Progress in Photovololtaics: Research and Applications*, 15:303–315, 2007.

- D.L. Randel, T.H. Vonder Haar, M.A. Ringerud, G.L. Stephens, T.J. Greenwald, and C.L. Combs. A new global water vapor dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77:1233–1246, 1996.
- E. P. Shettle. Models of aerosols, clouds and precipitation for atmospheric propagation studies. *AGARD Conference Proc. No.454*, 1989.
- M Simon and E.L. Meyer. The effects of spectral evaluation of c-si modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 11:1–10, 2011.
- E.A. Sjerps-Koomen, E.A. Alsema, and W.C. Turkenburg. A simple model for pv module reflection losses under field conditions. *Solar Energy*, 57: 421–432, 1996.
- First Solar. Next generation thin film pv modules: Module characterization: Spectral response PD-5-422, first ed. *First Solar Documentation Kit*, 2005.
- H.R. Wilson and M. Hennies. Energetic relevance of solar spectral variation on solar cell short circuit current. *Solar Energy*, 42,3:273–279, 1989.
- B. Zinßer. Jahresenergieerträge unterschiedlicher Photovoltaik-Technologien bei verschiedenen klimatischen Bedingungen. *Dissertation, Universität Stuttgart*, 2010.