

Parametrisierung solarer Einstrahlung aus Modellen und Beobachtungen

Diplomarbeit
von
Katharina Lengfeld

MATHEMATISCH - NATURWISSENSCHAFTLICHE FAKULTÄT DER
CHRISTIAN-ALBRECHTS-UNIVERSITÄT ZU KIEL
ERSTELLT AM LEIBNIZ - INSTITUT FÜR MEERESWISSENSCHAFTEN
FORSCHUNGSBEREICH 1
- MARITIME METEOROLOGIE -



Kiel, Oktober 2008

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------------|
| Zusammenfassung | I |
| Abstract | III |
| Abkürzungen | V |
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Grundlagen | 3 |
| 2.1 Solare Strahlung | 3 |
| 2.2 Eigenschaften von Wolken | 5 |
| 2.3 Einfluss von Wolken auf den Strahlungshaushalt | 7 |
| 3 Parametrisierungen | 9 |
| 3.1 Schewski Parametrisierung | 10 |
| 3.2 Parametrisierung nach Zillman | 18 |
| 4 Daten | 21 |
| 4.1 Lindenberg | 21 |
| 4.2 Polarstern | 24 |
| 5 Auswertung | 27 |
| 5.1 Original Schewski-Parametrisierung | 28 |
| 5.2 Modifizierte SP | 34 |
| 5.3 Modifizierte SP mit Zillman für den unbewölkten Fall | 38 |
| 5.4 Vergleich der drei Parametrisierungen | 42 |
| 5.5 Anwendung auf unabhängige Daten | 48 |
| 5.6 Tagesmittel | 57 |
| 6 Schlussbetrachtung | 61 |
| A Ergänzung zu Kapitel 5 | 65 |
| Literatur | 75 |
| Danksagung | 79 |

Erklärung

81

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Streuungsfunktion für ein Wolkentröpfchen ($10\mu m$) und einen Regentropfen ($1000\mu m$) bei $\lambda = 0.55\mu m$ | 4 |
| 2.2 | kurzwellige Einstrahlung bei wolkenfreiem Himmel | 6 |
| 2.3 | Wolkenklassifikation [DWD(2008)] | 7 |
| 2.4 | Energiebilanz der Erde [Kiehl und Trenberth(1997)] | 8 |
| 3.1 | Darstellung einer 3d-Wolke aus GESIMA. Dunklere Felder geben einen höheren Volumenextinktionskoeffizienten an [Schewski und Macke(2003)] . | 11 |
| 3.2 | Streuungsfunktionen für Wolkenwasser (sphärische Tropfen), Regen (nichtsphärische Tropfen), Eis und Schnee (fraktale Polykristalle) und hexagonale Eissäulen [Schewski und Macke(2003)] | 14 |
| 3.3 | Breitbandige Albedo, Absorption, diffuse und direkte Transmission als Funktion des Gesamtwasserpfads. Die Farben stehen für unterschiedliche Bedeckungsgrade in Achteln [Schewski und Macke(2003)] | 16 |
| 3.4 | Korrelation für die drei besten Wolkenparameter für solare breitbandige Transmission abhängig vom Sonnenzenitwinkel [Schewski und Macke(2003)] | 17 |
| 4.1 | Pyranometer CM22 von der Firma Kipp und Zonen [Kipp und Zonen(2008)] | 22 |
| 4.2 | 12 Kanal Mikrowellenprofiler [Ware et al.(2003)] | 23 |
| 4.3 | VIS/NIR Daylight Whole Sky Imager am RAO Lindenberg | 24 |
| 4.4 | Fahrtroute von Bremerhaven nach Kapstadt | 24 |
| 4.5 | Aufnahme der Wolkenkamera am 4.11.2007 um 15 : 59 Uhr | 25 |
| 4.6 | Mikrowellenradiometer HATPRO auf dem FS Polarstern | 26 |
| 5.1 | Messung und Parametrisierung der solaren Einstrahlung (linke Seite) und Bedeckungsgrad und CLW (rechte Seite) für den 30. (a) und 31. (b) Mai 2007 in Lindenberg | 28 |
| 5.2 | Vergleich zwischen der gemessenen und nach der original SP berechneten solaren Einstrahlung. Verschiedene Farben stehen für verschiedene Monate. | 29 |
| 5.3 | Schnell wechselnde Bewölkung am 8. Juli 2007: (a) gemessene (schwarze Linie) und mit der original SP berechnete (durchgezogene blaue Linie) kurzwellige Einstrahlung und deren Differenz (gestrichelte blaue Linie), (b) Bedeckungsgrad (rote Linie) und CLW (blaue Linie). | 30 |

| | | |
|------|--|----|
| 5.4 | Wechselnde Bewölkung am 27. Juli 2007: (a) gemessene (schwarze Linie) und mit der original SP berechnete (durchgezogene blaue Linie) kurzwellige Einstrahlung und deren Differenz (gestrichelte blaue Linie), (b) Bedeckungsgrad (rote Linie) und CLW (blaue Linie). | 31 |
| 5.5 | Komplett bedeckter Himmel am 5. Februar 2007: (a) gemessene (schwarze Linie) und mit der original SP berechnete (durchgezogene blaue Linie) kurzwellige Einstrahlung und deren Differenz (gestrichelte blaue Linie), (b) Bedeckungsgrad (rote Linie) und CLW (blaue Linie). | 32 |
| 5.6 | Nahezu unbewölkt am 16. April 2007: (a) gemessene (schwarze Linie) und mit der original SP berechnete (durchgezogene blaue Linie) kurzwellige Einstrahlung und deren Differenz (gestrichelte blaue Linie), (b) Bedeckungsgrad (rote Linie) und CLW (blaue Linie). | 33 |
| 5.7 | Vergleich zwischen der nach der mSP_0 berechneten und gemessenen solaren Einstrahlung. Verschiedene Farben stehen für verschiedene Monate. | 35 |
| 5.8 | 8. (a) und 27. (b) Juli, 5. Februar (c) und 16. April (d) 2007; links: Messwerte und Parametrisierungen für die solare Einstrahlung (durchgezogene Linie) und deren Differenzen (gestrichelte Linie), die roten Linien stehen für die mSP_0 ; rechts: Bedeckungsgrad in % und CLW in kg/m^2 | 36 |
| 5.9 | Vergleich zwischen der nach der $mSPZ_0$ berechneten und gemessenen solaren Einstrahlung. Verschiedene Farben stehen für verschiedene Monate. | 39 |
| 5.10 | 8. (a) und 27. (b) Juli, 5. Februar (c) und 16. April (d) 2007; links: Messwerte und Parametrisierungen für die solare Einstrahlung (durchgezogene Linie) und deren Differenzen (gestrichelte Linie), die grünen Linien stehen für die $mSPZ_0$; rechts: Bedeckungsgrad in % und CLW in kg/m^2 | 40 |
| 5.11 | Korrelation (a), Differenz zwischen Parametrisierung und Messung (b) und Standardabweichung (c) und deren Mittelwerte (gestrichelte Linien) für die oSP, die mSP_0 und die $mSPZ_0$ in Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad | 43 |
| 5.12 | Korrelation (a), Differenz zwischen Parametrisierung und Messung (b) und Standardabweichung (c) und deren Mittelwerte (gestrichelte Linien) für die oSP, die mSP_0 und die $mSPZ_0$ in Abhängigkeit vom CLW | 45 |
| 5.13 | Korrelation (a), Differenz zwischen Parametrisierung und Messung (b) und Standardabweichung (c) und deren Mittelwerte (gestrichelte Linien) für die oSP, die mSP_0 und die $mSPZ_0$ in Abhängigkeit vom Sonnenzenitwinkel | 47 |
| 5.14 | Vergleich der solaren Einstrahlung berechnet nach der oSP (a), der mSP_0 (b) und der $mSPZ_0$ (c) mit den Messwerten. Die verschiedene Farben stehen für verschiedene Monate. | 49 |
| 5.15 | Korrelation (oben), Differenz zwischen Parametrisierung und Messung (Mitte) und Standardabweichung (unten) und deren Mittelwerte (gestrichelte Linien) für die oSP, die mSP_0 und die $mSPZ_0$ in Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad (links), vom Sonnenzenitwinkel (Mitte) und vom CLW (rechts) für 2006 | 51 |

| | | |
|------|---|----|
| 5.16 | Vergleich der solaren Einstrahlung berechnet nach der oSP (blau), der mSP_0 (rot) und der $mSPZ_0$ (grün) mit den Messwerten für die Polarternfahrt ANTXXIV-1. | 53 |
| 5.17 | 5. (a), 12. (b), 14. (c) und 16. November (d) 2007; links: Messwerte und Parametrisierungen für die solare Einstrahlung (durchgezogene Linie) und deren Differenzen (gestrichelte Linie); rechts: Bedeckungsgrad in % und CLW in kg/m^2 | 55 |
| 5.18 | Vergleich zwischen den Tagesmitteln der Messung der solaren Einstrahlung am Boden mit der oSP (a), der mSP_0 (b) und der $mSPZ_0$ (c) für 2007. | 58 |
| 5.19 | Vergleich zwischen den Tagesmitteln der Messung der solaren Einstrahlung am Boden mit der oSP (a), der mSP_0 (b) und der $mSPZ_0$ (c) für 2006. | 60 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|--|----|
| 3.1 | Korrelationen zwischen den parametrisierten und den mit dem GRIMALDI Modell errechneten optischen Eigenschaften mit ein, zwei und drei Wolkenparametern | 16 |
| 3.2 | Koeffizienten für die original und die modifizierte SP für Sonnenzenitwinkel von 30°, 40°, 50°, 60°, 70° und 80°. | 18 |
| 3.3 | Mittlere Differenz $\overline{\Delta Q}$, Standardabweichung und Korrelation zwischen dem einminütigen Mittel der gemessenen und berechneten Einstrahlung [Kalisch und Macke(2008)] | 19 |
| 3.4 | Koeffizienten für die $mSPZ_0$ für Sonnenzenitwinkel von 30°, 40°, 50°, 60°, 70° und 80°. | 20 |
| 5.1 | Statistische Auswertung der original SP mit dem Mittelwert der Differenzen zwischen Parametrisierung und Messung ($\overline{\Delta Q}$), deren Standardabweichung (σ) und den Rangkorrelationen nach Spearman mit und ohne Tagesgang | 29 |
| 5.2 | Statistische Auswertung der original SP für die Tage 8. und 27. Juli, 5. Februar und 16. April 2007 mit dem Mittelwert der Differenzen zwischen Parametrisierung und Messung ($\overline{\Delta Q}$), deren Standardabweichung (σ) und den Rangkorrelationen nach Spearman mit und ohne Tagesgang | 34 |
| 5.3 | Statistische Auswertung der mSP_0 mit dem Mittelwert der Differenzen zwischen Parametrisierung und Messung ($\overline{\Delta Q}$), deren Standardabweichung (σ) und den Rangkorrelationen nach Spearman mit und ohne Tagesgang | 34 |
| 5.4 | Statistische Auswertung der mSP_0 für die Tage 8. und 27. Juli, 5. Februar und 16. April 2007 mit dem Mittelwert der Differenzen zwischen Parametrisierung und Messung ($\overline{\Delta Q}$), deren Standardabweichung (σ) und den Rangkorrelationen nach Spearman mit und ohne Tagesgang | 37 |
| 5.5 | Statistische Auswertung der mSP_0 mit dem Mittelwert der Differenzen zwischen Parametrisierung und Messung ($\overline{\Delta Q}$), deren Standardabweichung (σ) und den Rangkorrelationen nach Spearman mit und ohne Tagesgang | 39 |

| | | |
|------|---|----|
| 5.6 | Statistische Auswertung der $mSPZ_0$ für die Tage 8. und 27. Juli, 5. Februar und 16. April 2007 mit dem Mittelwert der Differenzen zwischen Parametrisierung und Messung ($\overline{\Delta Q}$), deren Standardabweichung (σ) und den Rangkorrelationen nach Spearman mit und ohne Tagesgang | 41 |
| 5.7 | Statistische Auswertung der drei Parametrisierungen für die Daten aus Lindenberg 2006 mit dem Mittelwert der Differenzen zwischen Parametrisierung und Messung ($\overline{\Delta Q}$), deren Standardabweichung (σ) und den Rangkorrelationen nach Spearman mit und ohne Tagesgang | 50 |
| 5.8 | Statistische Auswertung der drei Parametrisierungen für die Daten der Forschungsfahrt mit dem Mittelwert der Differenzen zwischen Parametrisierung und Messung ($\overline{\Delta Q}$), deren Standardabweichung (σ) und den Rangkorrelationen nach Spearman mit und ohne Tagesgang | 54 |
| 5.9 | Statistische Auswertung vom 5., 12., 14. und 16. November 2007 | 56 |
| 5.10 | Statistische Auswertung der drei Parametrisierungen für die Tagesmittelwerte für 2007 mit dem Mittelwert der Differenzen zwischen Parametrisierung und Messung ($\overline{\Delta Q}$), deren Standardabweichung (σ) und den Rangkorrelationen nach Spearman | 59 |
| 5.11 | Statistische Auswertung der drei Parametrisierungen für die Tagesmittelwerte für 2006 mit dem Mittelwert der Differenzen zwischen Parametrisierung und Messung ($\overline{\Delta Q}$), deren Standardabweichung (σ) und den Rangkorrelationen nach Spearman | 59 |
| A.1 | Korrelation für die Daten aus Lindenberg 2007 in Abhängigkeit des Bedeckungsgrads | 65 |
| A.2 | Differenz [W/m^2] für die Daten aus Lindenberg 2007 in Abhängigkeit des Bedeckungsgrads | 65 |
| A.3 | Standardabweichung [W/m^2] für die Daten aus Lindenberg 2007 in Abhängigkeit des Bedeckungsgrads | 66 |
| A.4 | Korrelation für die Daten aus Lindenberg 2007 in Abhängigkeit des CLWs | 67 |
| A.5 | Differenz [W/m^2] für die Daten aus Lindenberg 2007 in Abhängigkeit des CLWs | 67 |
| A.6 | Standardabweichung [W/m^2] für die Daten aus Lindenberg 2007 in Abhängigkeit des CLWs | 68 |
| A.7 | Korrelation für die Daten aus Lindenberg 2007 in Abhängigkeit des Sonnenzenitwinkels | 69 |
| A.8 | Differenz [W/m^2] für die Daten aus Lindenberg 2007 in Abhängigkeit des Sonnenzenitwinkels | 69 |
| A.9 | Standardabweichung [W/m^2] für die Daten aus Lindenberg 2007 in Abhängigkeit des Sonnenzenitwinkels | 69 |
| A.10 | Korrelation für die Daten aus Lindenberg 2006 in Abhängigkeit des Bedeckungsgrads | 70 |
| A.11 | Differenz [W/m^2] für die Daten aus Lindenberg 2006 in Abhängigkeit des Bedeckungsgrads | 70 |

| | |
|--|----|
| A.12 Standardabweichung [W/m^2] für die Daten aus Lindenberg 2006 in Abhängigkeit des Bedeckungsgrads | 71 |
| A.13 Korrelation für die Daten aus Lindenberg 2007 in Abhängigkeit des CLWs | 72 |
| A.14 Differenz [W/m^2] für die Daten aus Lindenberg 2007 in Abhängigkeit des CLWs | 72 |
| A.15 Standardabweichung [W/m^2] für die Daten aus Lindenberg 2007 in Abhängigkeit des CLWs | 73 |
| A.16 Korrelation für die Daten aus Lindenberg 2006 in Abhängigkeit des Sonnenzenitwinkels | 74 |
| A.17 Differenz [W/m^2] für die Daten aus Lindenberg 2006 in Abhängigkeit des Sonnenzenitwinkels | 74 |
| A.18 Standardabweichung [W/m^2] für die Daten aus Lindenberg 2006 in Abhängigkeit des Sonnenzenitwinkels | 74 |

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die auf Modellen beruhende Schewski Parametrisierung (2001) der solaren Einstrahlung am Boden auf reale Messungen angewandt. Diese Parametrisierung basiert auf dem mesoskaligen Atmosphärenmodell GESIMA und dem Strahlungstransportmodell GRIMALDI. Die Daten, auf die sie angewendet werden soll, stammen aus Lindenberg, Deutschland von Februar bis Dezember 2007. Es wurden jeweils 10-Minuten-Mittel benutzt.

Die Schewski-Parametrisierung berechnet die Transmission durch die Atmosphäre im kurzwelligen Bereich in Abhängigkeit vom gebietsgemittelten Bedeckungsgrad und Flüssigwasserpfad beziehungsweise Wolkenflüssigwasser. Es zeigt sich, dass die Berechnungen der solaren Einstrahlung am Boden zwar gut mit den Messwerten korreliert sind, die Parametrisierung diese aber deutlich unterschätzt.

Um die Parametrisierung optimal auf den hier verwendeten Datensatz anzupassen, werden die Koeffizienten variiert und die bestmöglichen herausgesucht, so dass die mittlere Differenz zwischen Messung und Berechnung 0 W/m^2 beträgt, die Standardabweichung möglichst gering und die Korrelation mit Tagesgang möglichst hoch ist. Dadurch wird eine Verringerung der Standardabweichung um 12% erreicht. Die Korrelation mit Tagesgang wird im Vergleich zur original Schewski-Parametrisierung verbessert und beträgt 0.91. Die Korrelation ohne Tagesgang, die nur durch Wolken und andere atmosphärische Partikel bestimmt wird, sinkt allerdings leicht.

Besonders für nahezu unbewölkte Tage ist die Differenz zwischen Messung und Berechnung der solaren Einstrahlung groß. Dieser Fall wird durch den Koeffizienten a bestimmt. Dieser wird durch die Parametrisierung nach Zillman (1972) ersetzt. Hier wird die solare Einstrahlung in Abhängigkeit vom Sonnenzenitwinkel, der Temperatur und der relativen Feuchte berechnet. Von Kalisch (2008) wurden für diese Gleichung Koeffizienten speziell für den wolkenfreien Fall ermittelt. Durch Einsetzen dieser Parametrisierung in die von Schewski ergibt sich Verbesserung der Differenz und Standardabweichung für Situationen mit geringen Bedeckungsgrad. Insgesamt verändern sich die Ergebnisse kaum.

Die modifizierten Parametrisierungen werden an einem Datensatz aus Lindenberg für Januar bis September 2006 getestet und liefern auch hier eine deutliche Verbesserung der Differenzen zwischen Messwerten und berechneter solarer Einstrahlung und deren Standardabweichung. Die Korrelation mit Tagesgang wird ebenfalls verbessert. Nur die Korrelationen ohne Tagesgang werden wie schon 2007 etwas geringer. Bei der Anwendung auf einen weiteren Datensatz, der bei der Forschungsfahrt ANTXXIV-1 mit dem FS Polarstern von Bremerhaven nach Kapstadt gesammelt wurde, zeigt sich nur eine Verringerung der Differenzen für die modifizierte Schewski Parametrisierung. Die Standardabweichung und die Korrelationen werden allerdings schlechter. Die Version mit Zillman zeigt in allen statistischen Parametern Verbesserungen im Vergleich zum Original außer bei der Korrelation mit Tagesgang. Diese ist mit 0.907 aber immer noch recht hoch.

Die Ergebnisse zeigen, dass es möglich ist, die solare Einstrahlung an Boden mit Hilfe gebietsgemittelter Wolkenparameter zu berechnen.

Abstract

In this thesis the parameterization of the incoming solar radiation by Schewski (2001) based on model calculations is tested with real measurements. This parameterization based on the meso-scale atmospheric model GESIMA and the radiative transfer model GRIMALDI. The dataset is derived from Lindenberg, Germany, from February to December 2007. 10 minute means are used. The parameterization by Schewski calculates the transmission of the atmosphere in the shortwave range depending on domain averaged cloud cover and liquid water path respectively cloud liquid water. It is shown that the calculation of the incoming solar radiation is correlated quite well with the measurements, but the parameterization underestimates them.

To fit the parameterization perfectly to the used data set, the coefficients are varied. The best coefficients are delivered, so that the the mean difference is 0 W/m^2 , the standard deviation is preferably small and the correlation with diurnal cycle as high as possible. Thereby a reduction of 12% of the standard deviation is reached. The correlation with diurnal cycle is enhanced compared to the original Schewski parameterization. Its value is 0.91. But the correlation without diurnal cycle, which is influenced by the clouds and atmospheric particles, gets a little smaller again.

Especially for almost clear sky conditions the differences between measurement and calculation of the incoming solar radiation is high. This case is determined by the coefficients a . These coefficients are replaced by the parameterization of Zillman (1972). The incoming solar radiation is calculated depending on the solar zenith angle, the temperature and the relative humidity. Special coefficients for the clear sky case were derived by Kalisch (2008). The combination of the parameterizations by Schewski and Zillman produces an upgrade of the mean difference and the standard deviation for situations with small cloud cover. In general the results change hardly.

The modified parameterizations are tested with a dataset from Lindenberg from January to September 2006 and produce reductions of the differences between measurements and calculated incoming solar radiation and their standard deviation. The correlation with diurnal cycle is upgraded, too. Only the correlation without diurnal cycle gets a little worse than for 2007. By using this parameterization for a dataset, that is made during a cruise with the FS Polarstern from Bremerhaven to Kapstadt, a only reduction of the differences for the modified Schewski parameterization is shown. The standard deviation and the correlations get worse. The version with Zillman shows enhancements in every statistical parameter compared to the original one except for the correlation with diurnal cycle. But this is still high with 0.907.

The results show that it is possible to parameterize the incoming solar radiation based on domain average cloud properties.

Abkürzungen

| | |
|---------|--|
| ARM | Atmospheric Radiation Monitoring |
| CLW | Cloud Liquid Water |
| DWD | Deutscher Wetterdienst |
| GESIMA | Geesthachter Simulationsmodell der Atmosphäre |
| LWP | Liquid Water Path |
| MOL | Meteorologisches Observatorium Lindenberg |
| MORE | Meridional Ocean Radiation Experiment |
| MPL | Marine Physical Laboratory |
| mSP | modifizierte Schewski Parametrisierung |
| mSPZ | modifizierte Schewski Parametrisierung kombiniert mit Zillman Parametrisierung |
| oSP | original Schewski Parametrisierung |
| RAO | Richard Aßmann Observatorium |
| TWP | Total Water Path (Gesamtwasserpfad) |
| VIS/NIR | Visible/Near Infrared |
| WMO | World Meteorological Organisation |
| WSI | Whole Sky Imager |

Kapitel 1

Einleitung

Für die Energiebilanz der Erde ist die solare Einstrahlung der wichtigste Anteil. Auf dem Weg durch die Atmosphäre wird die kurzwellige Sonnenstrahlung durch viele verschiedene Faktoren beeinflusst. Der Sonnenzenitwinkel ist entscheidend, da die Wegstrecke, die die Strahlung durch die Atmosphäre zurücklegen muss, mit steigendem Zenitwinkel länger wird und die Strahlung an Intensität verliert. Eine weitere wichtige Rolle spielen Wolken. An ihnen wird die solare Einstrahlung gestreut, reflektiert und absorbiert. Dabei sind der Bedeckungsgrad und die Eigenschaften der Wolken, wie optische Dicke, Temperatur und Zusammensetzung entscheidend. Diese vielen Faktoren machen eine Berechnung der kurzwelligen Strahlung, die den Boden erreicht, sehr kompliziert.

Einer der ersten Versuche die solare Einstrahlung zu parametrisieren stammt von Lumb (1964), der die Transmission durch die Atmosphäre in Abhängigkeit vom Sonnenzenitwinkel, dem Bedeckungsgrad und der Wolkenart berechnete. Darauf aufbauend gab es noch zahlreiche andere Parametrisierungen, die allerdings alle synoptische Beobachtungen der Wolkenart benötigten. Diese Beobachtungen sind subjektiv und beinhalten Fehler. Außerdem sind nicht immer solche Beobachtungen vorhanden. Deshalb entwickelte Zillman (1972) eine Parametrisierung basierend auf Messungen des Sonnenzenitwinkels, der Temperatur, der relativen Feuchte und des Bedeckungsgrades.

Mario Schewski (2001) erstellte eine Parametrisierung der solaren Einstrahlung am Boden, die allein auf Modelldaten beruht. Zur Erstellung dieser Parametrisierung wurde das mesoskalige Atmosphärenmodell GESIMA und das Strahlungstransportmodell GRIMALDI benutzt. Schewski entwickelte eine Parametrisierung in Abhängigkeit des gebietsgemittelten Flüssig-, Regen- und Schneewasserpfades, des Bedeckungsgrads, der optischen Dicke, der Unterkantenhöhe und der Oberkantentemperatur der Wolken. In dieser Arbeit werden nur der Bedeckungsgrad und an Stelle des Flüssigwasserpfades das Wolkenflüssigwasser benutzt.

Ziel dieser Arbeit ist es, zu untersuchen, ob diese auf Modelldaten basierende Parametrisierung auch bei Anwendung auf Messdaten gute Ergebnisse liefert und sie gegebenenfalls zu verbessern.

Kapitel 2

Grundlagen

Die solare Strahlung liefert die Energie für das Leben auf der Erde. Beeinflusst wird die Strahlung hauptsächlich durch Wolken, die einen Teil der einfallenden Strahlung zurück in den Weltraum reflektieren, einen Teil absorbieren und einen Teil zur Erdoberfläche hindurchlassen. Wie groß der Anteil der solaren Strahlung ist, die den Erdboden erreicht, hängt von der Art und somit der Zusammensetzung und Struktur der Wolken und vom Bedeckungsgrad ab. Es gibt zwei Arten von Sonnenstrahlung: die diffuse und die direkte Strahlung. Beide zusammengenommen werden als Globalstrahlung bezeichnet.

2.1 Solare Strahlung

Die Sonne hat eine Strahlungstemperatur von ca. 6000 Kelvin. Der Wellenlängenbereich umfasst das gesamte elektromagnetische Spektrum. Der energiereiche Teil kann in die Anteile ultraviolett ($0.29 - 0.4 \mu m$), sichtbar ($0.4 - 0.73 \mu m$) und infrarot ($0.73 - 4 \mu m$) unterteilt werden [DWD(1987)]. Der größte Teil der solaren Strahlung stammt aus dem sichtbaren Bereich der Sonne, der Photosphäre. Das Maximum kann nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz berechnet werden.

$$\lambda_{max} = a/T; \quad (2.1)$$

$$a = 2897.8 \mu m$$

Es liegt im grün-blauen Bereich des sichtbaren Lichts bei ca. $0.48 \mu m$ [DWD(1987)].

Von der Photosphäre wird eine Strahlungsleistung von $3.85 \cdot 10^{26} W$ abgegeben. Davon erreichen $S_0 = 1368 W/m^2$ den Oberrand der Atmosphäre. S_0 wird als Solarkonstante bezeichnet. Dieser Wert schwankt im Laufe des Jahres je nach Jahreszeit um $\pm 3.5 \%$ auf Grund der Exzentrizität der Erdbahn. Im Juli ist die Solarkonstante um 3.5% kleiner als das Mittel, weil der Abstand von der Erde zur Sonne größer ist, und im Januar um 3.5% größer.

Auf dem Weg durch die Atmosphäre werden die Eigenschaften der solaren Strahlung verändert. Diese Veränderung erfolgt durch Extinktion (Absorption und Streuung).

Als Absorption bezeichnet man die Umwandlung von Strahlung in Wärme oder andere Energieformen. Sie erfolgt größtenteils an Gasmolekülen, Aerosolen, Wolkentröpfchen und Regentropfen. Gase haben kein kontinuierliches Absorptionsspektrum wie Festkörper oder Flüssigkeiten sondern schmale Absorptionsbanden. Die wichtigsten Absorptionsbanden der Atmosphäre sind die Wasserdampfbanden im infraroten Bereich, die Kohlendioxidbanden und die Ozonbande. Letztere absorbiert die lebensgefährliche UV-Strahlung in 25 km bis 50 km Höhe [DWD(1987)]. Außerhalb der Absorptionsbanden kann die solare Strahlung im Bereich der atmosphärischen Fenster fast ungehindert die Erdatmosphäre passieren.

Wird die Strahlung ohne Energieübertrag aus ihrer Einfallsrichtung abgelenkt, so bezeichnet man diesen Vorgang als Streuung. Wird die solare Strahlung an den Luftmolekülen gestreut, handelt es sich um Rayleigh-Streuung. Hierbei ist der Streukörper klein gegen die Wellenlänge der Strahlung. Der Rayleigh Streukoeffizient α_s ist proportional zu λ^4 :

$$\alpha_s = \text{const.} \cdot \lambda^4; \quad (2.2)$$

Blaues Licht ($\lambda = 0.4\mu\text{m}$) wird also ca. 16 mal stärker gestreut als rotes ($\lambda = 0.8\mu\text{m}$).

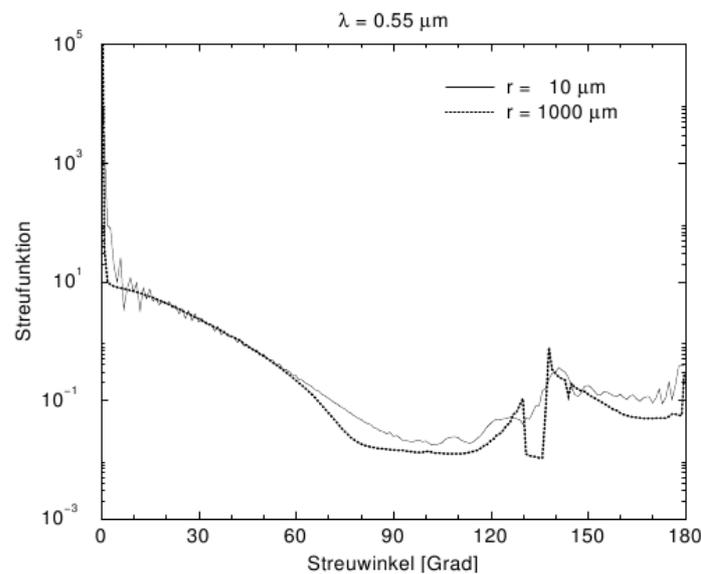


Abbildung 2.1: Streufunktion für ein Wolkentröpfchen ($10\mu\text{m}$) und einen Regentropfen ($1000\mu\text{m}$) bei $\lambda = 0.55\mu\text{m}$

Wenn die Größe des Streupartikels nicht mehr klein gegen die Wellenlänge des einfallenden Lichts ist, gilt die Rayleigh-Streuung nicht mehr. Für sphärische Teilchen, z.B. Aerosole oder Wolkentröpfchen, tritt dann die Mie-Streutheorie in Kraft. Die Intensität der Streuung ist nun kaum noch von der Wellenlänge abhängig und der größte Anteil des Lichts wird in Vorwärtsrichtung gestreut (Abbildung 2.1).

Für nicht-sphärische Teilchen, deren kleinste Ausdehnung sehr viel größer als die Wellenlänge des einfallenden Lichtes ist (Eiskristalle oder Regentropfen), wird die Näherungsmethode der geometrischen Optik benutzt. Hierbei wird die einfallende Welle durch Strahlen ersetzt, deren Brechungs- und Reflexionsprozesse durch die Streukörpergeometrie, das Snelliussche Brechungsgesetz, die Fresnelschen Formeln und die Beugung am Streukörper berechnet werden.

Wird die einfallende solare Strahlung in die Richtung der Strahlungsquelle zurückgestreut spricht man von Reflexion. Die Wolkenalbedo gibt den Anteil der an ihr reflektierten Strahlung an. Sie schwankt zwischen 30% und 92% und ist abhängig von der Dicke und Zusammensetzung der Wolke und vom Einfallswinkel der solaren Strahlung [DWD(1987)]. Die Albedo der Meeresoberfläche ist nur abhängig von der Sonnenhöhe und liegt zwischen 3% und 25%.

Für nähere Informationen zu Absorption und Streuung siehe zum Beispiel [Liou(2002)]. Den größten Einfluss auf die am Boden ankommende Strahlung hat jedoch der Sonnenzenitwinkel. Er beschreibt den Winkel zwischen dem Lot und dem Sonnenmittelpunkt unter dem ein Beobachter die Sonne sieht. Steht die Sonne also direkt senkrecht über dem Beobachter, so ist der Sonnenzenitwinkel $\theta = 0^\circ$ und bei Sonnenauf- bzw. Sonnenuntergang ist $\theta = 90^\circ$. Je größer der Zenitwinkel ist, desto länger ist der Weg, den die Strahlung durch die Atmosphäre zurücklegen muss. Deshalb nimmt die solare Einstrahlung am Boden mit steigendem Zenitwinkel ab. Berechnen lässt sich der Zenitwinkel mit Hilfe der geographischen Breite ϕ , dem Deklinationswinkel δ und dem Stundenwinkel h :

$$\cos \theta = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos h \quad . \quad (2.3)$$

Im Laufe des Tages folgt die solare Einstrahlung am Boden also einer Kosinuskurve sofern sie nicht durch Wolken beeinflusst wird. In Abbildung 2.2 ist die solare Einstrahlung am Boden für den wolkenfreien Fall an verschiedenen Tagen dargestellt. Man erkennt neben dem Tagesgang auch deutlich den Jahresgang, der durch die Erdachsenneigung verursacht wird.

Nähere Beschreibung zur Berechnung des Sonnenzenitwinkels finden sich in Kapitel 3.2.

2.2 Eigenschaften von Wolken

Eine zweite wichtige Komponente neben der solaren Einstrahlung im Energiehaushalt der Erde ist das Wasser. Es kommt als einziges Element von Natur aus in allen drei Aggregatzuständen in der Atmosphäre der Erde vor, nämlich als Wasserdampf, flüssiges Wasser und Eis. In Form von Wolken beeinflusst das Wasser auch den Strahlungstransport. An den in der Wolke enthaltenden Hydrometeoren wird die kurzwellige solare Strahlung absorbiert und gestreut. Auch auf die langwellige Ausstrahlung der Erde hat das Wasser einen großen Einfluss. Wasserdampf absorbiert und emittiert im langwelligen Bereich und gilt als das wichtigste natürliche Treibhausgas.

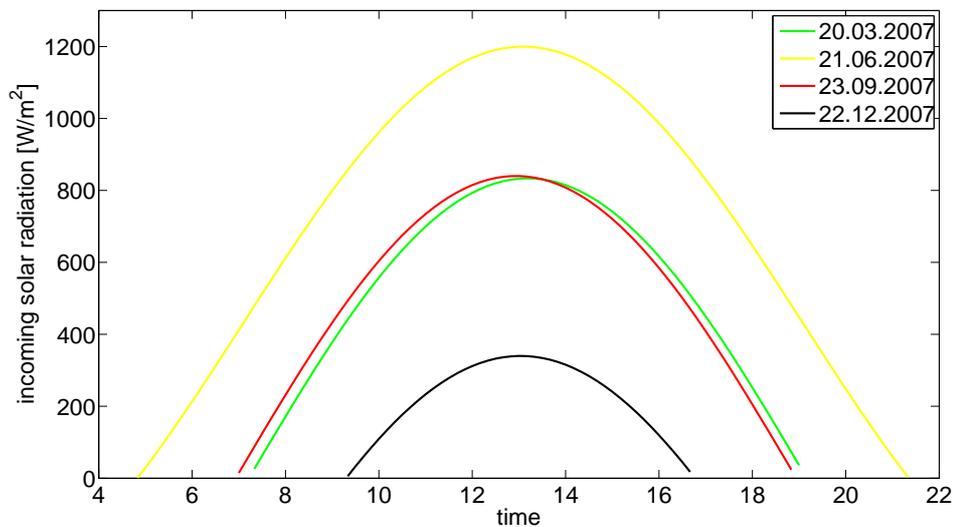


Abbildung 2.2: kurzwellige Einstrahlung bei wolkenfreien Himmel

Wolken entstehen immer dann, wenn übersättigter Wasserdampf an Aerosolkernen kondensiert oder sublimiert. Je nach Entstehungsart unterscheidet man zwischen konvektiven und stratiformen Wolken.

Konvektive Wolken bilden sich bei einer labil geschichteten Atmosphäre, der sogenannten Cumulusthermik, die stark von den strahlungsphysikalischen Unterschieden des Erdbodens abhängt [DWD(1987)]. Warme Oberflächen unterstützen die Thermik, während kalte sie unterdrücken. Außerdem beeinflussen die örtliche Zirkulation, die reibungsbedingte Bodenkonvergenz und der Sonnenzenitwinkel die Cumulusthermik. Bei der Bildung von Quellwolken überschreitet die Konvektion das Cumuluskonvektionsniveau und es bilden sich vertikal stark ausgedehnte Haufenwolken. Durch die erzwungenen, schnellen Aufstiegsbewegungen mit Geschwindigkeiten zwischen 1 m/s und 25 m/s kommt es zu Inhomogenitäten innerhalb der Wolke. Verstärkt wird diese Inhomogenität noch durch turbulente Ein- und Ausmischung von Umgebungsluft. Die durch die Konvektion aufsteigenden Luftmassen müssen durch einen abwärtsgerichteten Transport von Luft wieder ausgeglichen werden. Dies geschieht in den Gebieten zwischen den Konvektionswolken. Durch diesen Wechsel zwischen bewölkten und unbewölkten Gebieten wird die Inhomogenität bei Betrachtung eines größeren Himmelsausschnittes verstärkt.

Stratiforme oder Schichtwolken hingegen haben eine geringe innere Inhomogenität. Sie entstehen durch großräumige Hebungsprozesse in einer stabilen Atmosphäre. Ein Beispiel für die Bildung von Stratuswolken ist das Aufgleiten einer Luftmasse an einer Warmfront. Diese Aufgleitbewegung erfolgt mit einer Geschwindigkeit in der Größenordnung von cm/s und erstreckt sich über eine Breite von mehreren hundert und eine Länge bis zu einigen tausend Kilometern. Hierbei entstehen Wolkenfelder, die den gan-

zen Himmel bedecken können.

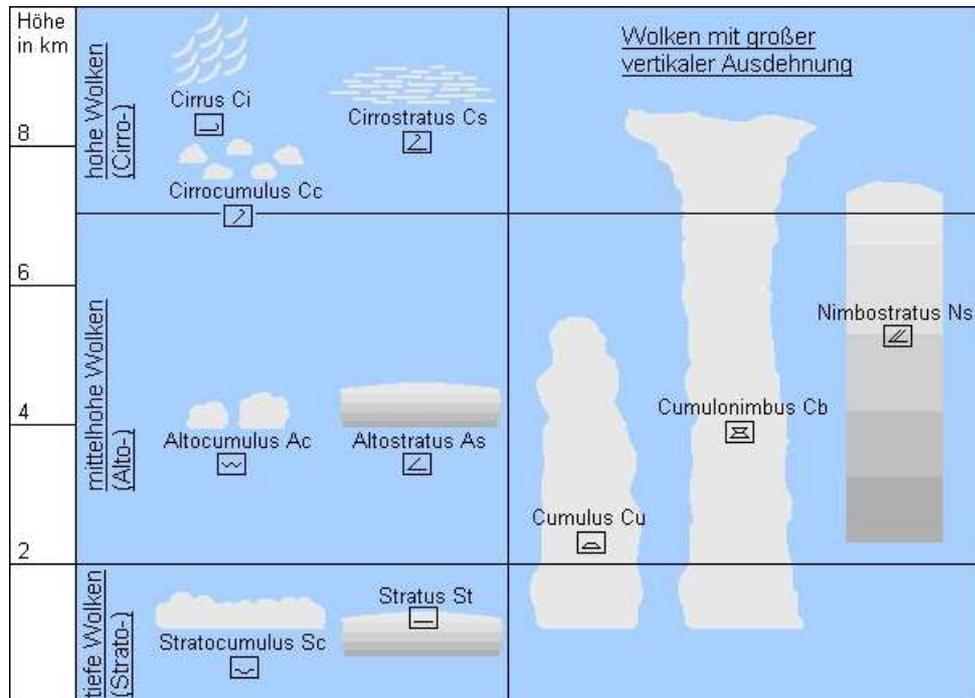


Abbildung 2.3: Wolkenklassifikation [DWD(2008)]

Desweiteren kann man die Wolken nach der Höhe, in der sie vorwiegend auftreten in verschiedene Gruppen einteilen (Abbildung 2.3). Die Wolken im unteren Stockwerk bestehen aus flüssigem Wasser (Stratocumulus und Stratus). Die Wolken in dem mittleren Stockwerk sind hauptsächlich Mischwolken (Altostratus, Altopumulus, Cumulus, Cumulonimbus und Nimbostratus). Sie bestehen also sowohl aus Wasser als auch aus Eis. Im oberen Stockwerk findet man reine Eiswolken (Cirrus, Cirrocumulus und Cirrostratus).

2.3 Einfluss von Wolken auf den Strahlungshaushalt

Wolken können sowohl erwärmend als auch abkühlend wirken. Dies lässt sich durch den Albedo- und den Treibhauseffekt beschreiben. Der Albedoeffekt beschreibt die abkühlende Wirkung durch Reflexion der solaren Strahlung zurück in den Weltraum an Wolken abhängig vom Wasser- und Eisgehalt der Wolken. Im Gegensatz dazu wird die terrestrische Ausstrahlung der Erdoberfläche von den Wolken absorbiert und wieder emittiert. Diese Erwärmung wird als Treibhauseffekt bezeichnet. Die Wolkenoberseite hat eine geringere Ausstrahlungstemperatur als die Erdoberfläche und emittiert deshalb Strahlung mit geringerer Energie (Abbildung 2.4).

Hohe, dünne Wolken wirken in der Nettobilanz erwärmend auf die Atmosphäre. Sie sind Eiswolken und strahlen deshalb im langwelligen Bereich mit einer geringen Temperatur

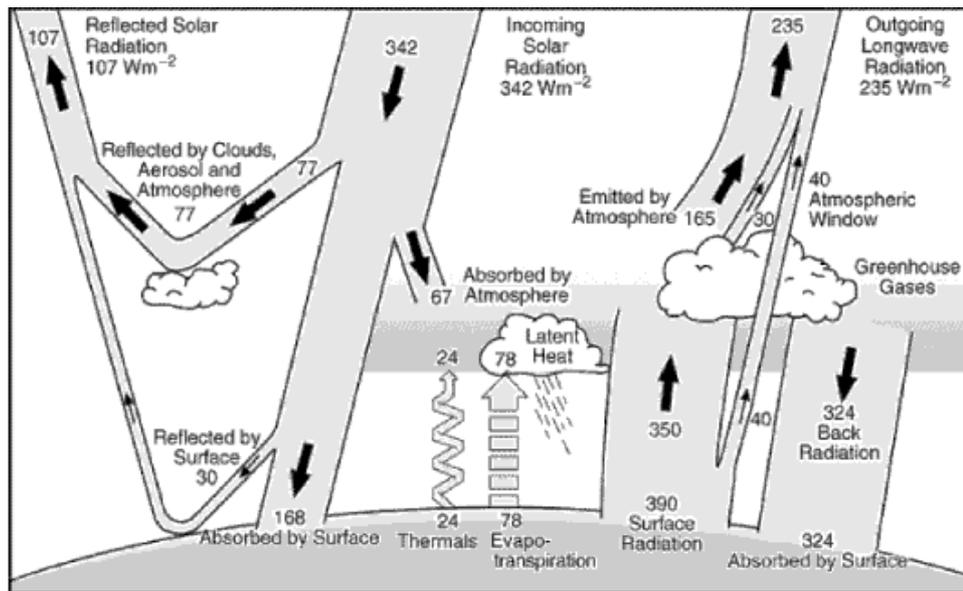


Abbildung 2.4: Energiebilanz der Erde [Kiehl und Trenberth(1997)]

aus. Außerdem haben sie eine geringe optische Dicke, so dass sie einen großen Teil der solaren Einstrahlung zur Erdoberfläche durchlassen. Mittelhohe und tiefe Wolken sind optisch dick und lassen nur wenig solare Strahlung zum Boden durch. Sie sind wärmer als die hohen Wolken, emittieren demzufolge mit einer höheren Temperatur und haben eine abkühlende Wirkung auf die Atmosphäre. Der globale Nettoeffekt der Wolken ist eine Abkühlung. Allerdings ist der genaue Einfluss der Wolken auf das Klimasystem noch unklar und stellt eine der größten Fehlerquellen in der Modellierung von Klimaszenarien dar.

Bei durchbrochener Bewölkung (Schönwetter-Cumulus) kann es außerdem zu dem sogenannten *Broken Cloud Effekt* kommen. Hierbei wird die solare Strahlung an den Wolken in Richtung Erdboden gestreut. Direkte und diffuse Strahlung können dann am Erdboden größer sein als die Einstrahlung bei wolkenfreiem Himmel wäre. Für eine genauere Beschreibung des Broken Cloud Effekts siehe [Schade(2005)]. Dieser Effekt lässt sich allerdings mit den in dieser Arbeit verwendeten Parametrisierungen nicht darstellen. Eine Untersuchung des Broken Cloud Effects in Lindenberg für die Sommer der Jahre 2005 und 2006 wurde in der Diplomarbeit von Inger Jahnke durchgeführt [Jahnke(2008)].

Kapitel 3

Parametrisierungen

Die solare Einstrahlung, die durch die Wolken bis zum Boden gelangt, hängt von folgenden Faktoren ab:

- Solarkonstante
- Sonnenzenitwinkel
- Bedeckungsgrad
- Wolkenunterkantenhöhe und optische Dicke
- Zusammensetzung der Wolken
- Vertikalstruktur der Luftfeuchtigkeit
- Vertikalstruktur der Lufttemperatur
- Bodenalbedo

Um aus diesen einem Teil dieser messbaren Größen die Einstrahlung am Boden zu bestimmen, werden Strahlungsparametrisierungen verwendet. Allerdings können in den Parametrisierungen nicht alle diese Faktoren berücksichtigt werden. Es werden immer nur ein paar ausgewählte Parameter betrachtet. Die übrigen sind entweder nicht bekannt oder werden als nicht relevant vernachlässigt.

Die einfachste Form der Parametrisierung berücksichtigt nur die Solarkonstante S_0 und den Sonnenzenitwinkel θ :

$$Q_{SW} = Q_0 T_F \quad (3.1)$$

mit der solaren Einstrahlung am Oberrand der Atmosphäre

$$Q_0 = S_0 \cos \theta. \quad (3.2)$$

T_F gibt den atmosphärischen Transmissionsfaktor an. Der erste Versuch den Transmissionsfaktor zu bestimmen basiert auf einer 1-Schritt-Parametrisierung von Lumb (1964):

$$T_F = a_i + b_i \cos \theta, \quad \text{mit } i = 1, \dots, 9 . \quad (3.3)$$

Hierbei wird angenommen, dass die Transmission linear vom Sonnenzenitwinkel, vom Bedeckungsgrad und von der Wolkengattung abhängt. Lumb teilte die Wolken in 9 verschiedene Kategorien mit unterschiedlicher optischer Dicke ein. Später wurden diese Kategorien von Lind et al. (1984) erweitert und neue Parametrisierungskoeffizienten ermittelt.

Dobson und Smith (1988) bestimmten die Koeffizienten für Kategorien 0 bis 9, die auf dem Bedeckungsgrad beruhen. Kategorie 9 gilt dabei für Nebel oder Schneefall. Dabei berücksichtigten sie den nichtlinearen Zusammenhang zwischen der Transmission und dem Sonnenzenitwinkel und schlugen folgenden nichtlinearen Transmissionsfaktor vor:

$$T_F = F \cdot \exp(-D_0 / \cos \theta) \cdot (N [\exp(-D_i / \cos \theta) + E_i] + (1 - N)) \quad (3.4)$$

F ist der bei wolkenfreiem Himmel von Gasen absorbierte Anteil der solaren Strahlung, D_0 die optische Dicke des wolkenfreien Himmels, D_i die optische Dicke für direkte Strahlung, E_i der Transmissionsfaktor von Wolken für diffuse Strahlung und N der Bedeckungsgrad. Dobson und Smith benutzen insgesamt 11 Wolkengattungen, die auf den WMO-Wolkengattungen basieren.

Eine weitere nichtlineare 2-Schritt-Parametrisierung stammt von Zillmann (1972). Hierbei werden nicht nur die Solarkonstante, der Sonnenzenitwinkel und der Bedeckungsgrad, sondern auch der Wasserdampfdruck in zwei Metern Höhe benutzt. Diese Parametrisierung wird in Kapitel 3.2 näher beschrieben.

Alle diese Parametrisierungen basieren auf Messdaten. Die in dieser Arbeit verwendete Parametrisierung von Schewski (2001) basiert allein auf Modelldaten.

3.1 Schewski Parametrisierung

In der Diplomarbeit von Mario Schewski wurde die Anwendbarkeit von Parametrisierungen der Strahlungsbilanz auf dreidimensionale inhomogene Bewölkung getestet [Schewski(2001)]. Dazu wurde der Zusammenhang zwischen gebietsgemittelten Strahlungsflüssen dreidimensionaler Wolkenfelder und den gemittelten Wolkeneigenschaften untersucht. Für die Berechnung der physikalischen Wolkeneigenschaften wurde das Geosthachter Simulationsmodell der Atmosphäre (GESIMA) benutzt. Die zu parametrisierenden Albeden, Absorptionen und Transmissionen wurden mit dem Monte-Carlo Strahlungstransportmodell GRIMALDI berechnet.

GESIMA ist ein dreidimensionales, nicht-hydrostatisches, mesoskaliges Modell der Atmosphäre und kann Prozesse simulieren, die auf einer Längenskala von 1 km bis 250 km stattfinden. Auf solchen Skalen muss der dynamische, nicht nur der hydrostatische Druck berücksichtigt werden. Für die Berechnung seiner Parametrisierung benutzte Mario Schewski eine horizontale Auflösung von 2 km und 25 Schichten in der Vertikalen zwischen 100 m und 10 km. Am Boden verwendete er eine Auflösung von 100 m, in den

obersten Schichten bis zu 1000 m. Für die Berechnung der Wolken wurden $52 \times 52 \times 26$ Gitterzellen verwendet, das Modellgebiet ist also 104×104 km groß. Genauere Beschreibungen des Modells finden sich in [Eppel et al.(1992)] und [Eppel et al.(1995)].

Durch das Wolkenmodul von [Levkov et al.(1992)] werden die mikrophysikalischen Prozesse beschrieben. Levkov unterscheidet in seiner Parametrisierung zwischen Wasserdampf, Wolkenwasser, Regen, Eiskristallen und Schnee, für die jeweils die Form und die Größenverteilung der Partikel vorgegeben ist. Die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Gruppen und die Änderungen innerhalb einer Gruppe werden mit Hilfe von Bulkparametrisierungen berechnet.

Als Startbedingungen wurden Radiosondenaufstiege über dem Ozean in den mittleren Breiten in der Nordhemisphäre für verschiedene Monate genommen. Die Vertikalprofile von Temperatur, Druck und Feuchte wurden auf das Modellgitter übertragen. Horizontal wurden homogene Startbedingungen benutzt. Alle Modellläufe wurden wolkenfrei gestartet. Um Wolkenbildung zu garantieren wurde diese künstlich durch Hinzufügen von Wasserdampf angeregt.

In Abbildung 3.1 ist eine Beispielwolke aus den GESIMA Berechnungen dargestellt. Dunklere Farben stehen für größere Volumenextinktionskoeffizienten.

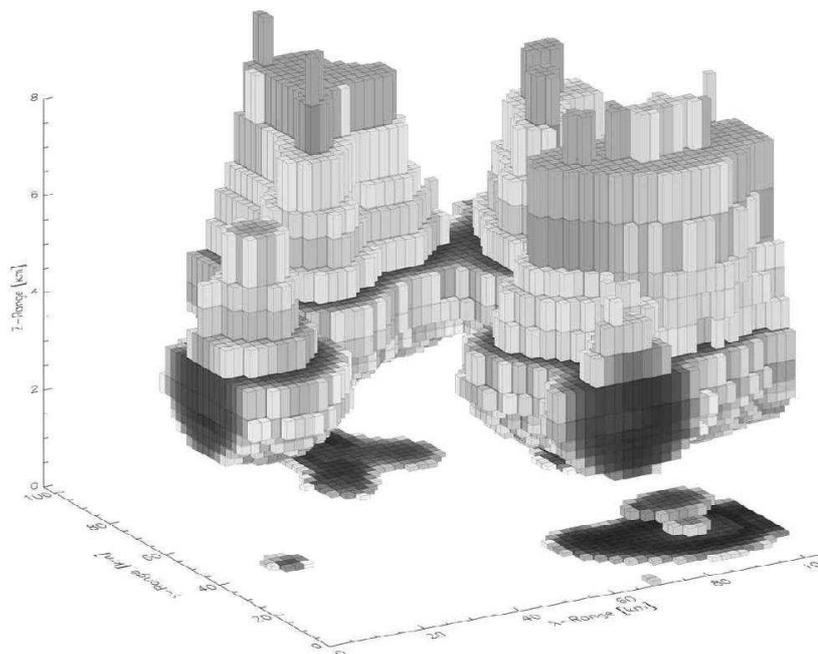


Abbildung 3.1: Darstellung einer 3d-Wolke aus GESIMA. Dunklere Felder geben einen höheren Volumenextinktionskoeffizienten an [Schewski und Macke(2003)]

Zur Erstellung der Parametrisierung wurden insgesamt 756 Wolkenfelder aus 152 Zeitserien nach Schreier und Macke (2001) verwendet. Wolkenfelder aus gleichen Zeitserien wurden in einem Abstand von 20 Minuten voneinander gewählt. Jede Zeitserie basiert auf einem anderen Radiosondenaufstieg. Auf Grund der Größe des betrachteten Fel-

des (104 × 104 km) konnten in den Modellsimulation nur konvektive Stratocumulus- oder Cumulus-Wolken entstehen. Die stratiforme Bewölkung, die bei Aufgleitprozessen an Fronten entsteht wird daher bei der Berechnung der Schewski-Parametrisierung (SP) nicht berücksichtigt. In 257 von den 756 Szenarien ist das Modellgebiet komplett mit Wolken bedeckt, die restlichen 499 sind durchbrochene Wolkenfelder. Insgesamt ergab sich ein mittlerer Bedeckungsgrad von 69%. In 386 Fällen handelt es sich um reine Wasserwolken, 369 Wolken sind Mischwolken und eine Wolke besteht komplett aus Eis [Schewski und Macke(2003)].

Um die physikalischen Größen, wie Temperatur, Druck, Luftfeuchtigkeit, Niederschlagsmenge oder den Wassergehalt der einzelnen Hydrometeorgruppen für das Strahlungsmodell nutzen zu können, müssen daraus die optischen Eigenschaften Volumenextinktionskoeffizient, Einfachstreueralbedo und Streufunktion berechnet werden [Macke et al.(1999)]. Der Extinktionskoeffizient beschreibt die Abnahme der Strahlung entlang eines optischen Weges. Die Einfachstreueralbedo gibt den bei Wechselwirkung mit Materie gestreuten Anteil der Strahlung an und die Streufunktion stellt die Winkelverteilung der gestreuten Strahlung dar [Lenoble(1993)].

Das in Mario Schewski's Arbeit verwendete Strahlungstransportmodell GRIMALDI basiert auf dem Monte-Carlo Verfahren. Bei diesem Verfahren werden die Absorptions- und Streuprozesse in der Atmosphäre an Hand einer großen Anzahl von Photonen verfolgt. Aus den Ergebnissen lassen sich dann die Strahlungseigenschaften des betrachteten Gebiets ableiten. Mit der Monte-Carlo Methode können beliebig komplizierte Wolkenfelder betrachtet werden. Die Monte-Carlo Methode ist umso genauer, je größer die Anzahl der verwendeten Photonen ist und somit rechenaufwendig.

Wenn ein Photon in ein Wolkengebiet einfällt, dann erfährt es durch einen Streuprozess azimutale und zenitale Richtungsänderungen. Die zenitale Änderung errechnet sich aus einem mit der Streufunktion $P(\theta)$ gewichteten Zufallsprozess:

$$\int_0^{\theta} P(\theta') \sin(\theta') d\theta' = R(0, 1) \int_0^{\pi} P(\theta') \sin(\theta') d\theta'. \quad (3.5)$$

Die Streufunktion wird hierbei als Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für den Ablenkungswinkel der Streuung interpretiert. Weil die Streukörper in dem Gebiet zufällig orientiert sind, ist die Wahrscheinlichkeit der azimutalen Ablenkung ϕ für alle Richtungen gleich:

$$\phi = 2\pi r. \quad (3.6)$$

Für jedes Photon wird eine Weglänge festgelegt. Sie gibt die Länge an, die ein Photon in eine zufällig gewürfelte Richtung bis zur ersten Wechselwirkung zurücklegt. Die Position \mathbf{r} , die es dann einnimmt errechnet sich aus der Ausgangsposition \mathbf{r}_0 und der gewürfelten Richtung \mathbf{k} :

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + l\mathbf{k}, \quad (3.7)$$

mit der Weglänge

$$l = -\frac{1}{\epsilon} \ln R(0, 1). \quad (3.8)$$

Die Weglänge ist nach dem Bouguer-Lambert-Beer'schen Gesetz verteilt. ϵ ist der Volumenextinktionskoeffizient.

Hat das Photonenbündel die vorgegebene Wegstrecke durchlaufen, wird ein Teil der Photonen absorbiert und der Rest gestreut und somit wieder in eine andere Richtung abgelenkt. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Photon absorbiert wird, beträgt $1 - \omega_0$, wobei ω_0 die mittlere Einfachstreueralbedo darstellt. Zur einfacheren Interpretation wird jedem Photon am Anfang das Gewicht $W = 1$ zugeordnet, das sich bei jeder Wechselwirkung verringert:

$$W_K = W_{k-1} \cdot \omega_0. \quad (3.9)$$

Dieser Vorgang wird mit neuer Weglänge so lange wiederholt bis das Photonenbündel entweder vollständig absorbiert ist oder das betrachtete Gebiet durch die obere oder die untere Modellgrenze verlässt. Das noch vorhandene Gewicht wird zur Albedo oder zur Transmission gezählt. Diese Gewichte werden aufsummiert und so ergeben sich für bestimmte Raumwinkelintervalle die Strahldichten für die bewölkte Atmosphäre.

Für nähere Erklärungen zur Monte-Carlo Methode siehe [Marchuk et al.(1980)].

Je nach Anteil von Wolkenwasser, Regen, Eiskristallen und Schnee und abhängig von den effektiven Radien innerhalb eines Gebiets, wurden die effektive Einfachstreueralbedo und die Streufunktion, wie bei [Macke et al.(1999)] beschrieben, berechnet. In Abbildung 3.2 sind die Phasenfunktionen für verschiedene Partikelklassen im sichtbaren Bereich bei einer Wellenlänge von 550 nm als Funktion des effektiven Radius dargestellt.

Die Berechnung der Phasenfunktionen für sphärische Wassertropfen basiert auf der Mie-Theorie. Für Regentropfen wurde ein Ray Tracing Code benutzt, der die nichtsphärischen großen Regentropfen berücksichtigt [Macke und Großklaus(1998)]. Die Phasenfunktionen für Schneepartikel und Eiskristalle beruhen auf Ray Tracing Berechnungen für ein Modell für fraktale Polykristalle [Macke et al.(1996)].

Für eine Strahlungssimulation wurden $2.5 \cdot 10^6$ Photonen benutzt. Es wurde nur die solare Einstrahlung betrachtet. Die terrestrische Ausstrahlung im infraroten Bereich wurde nicht benutzt. Insgesamt fanden 13 spektrale Bänder Verwendung, die den ganzen solaren Bereich abdecken. Die Absorptionskoeffizienten der Atmosphäregase wurden mit einem spektralen Bandmodell berechnet [Scheirer und Macke(2000)]. Um auszuschließen, dass verschiedene Arten von Untergrund die Ergebnisse beeinflussen, wurde die Bodenalbedo für alle spektralen Bänder auf 0 gesetzt.

Es wurden außerdem reflektierende Randbedingungen benutzt. Das heißt, dass alle Photonen, die das Modellgebiet an den Seitenflächen verlassen hätten, wieder in die Wolke zurückreflektiert wurden, so dass ein horizontal unendlich ausgedehntes Areal entstand. Um den Einfluss der Wolken noch zu erhöhen, wurde der Bedeckungsgrad künstlich erhöht, indem nur die kleinste vertikale Box, in der alle Wolken vollständig enthalten sind, im Strahlungsmodell benutzt wurden.

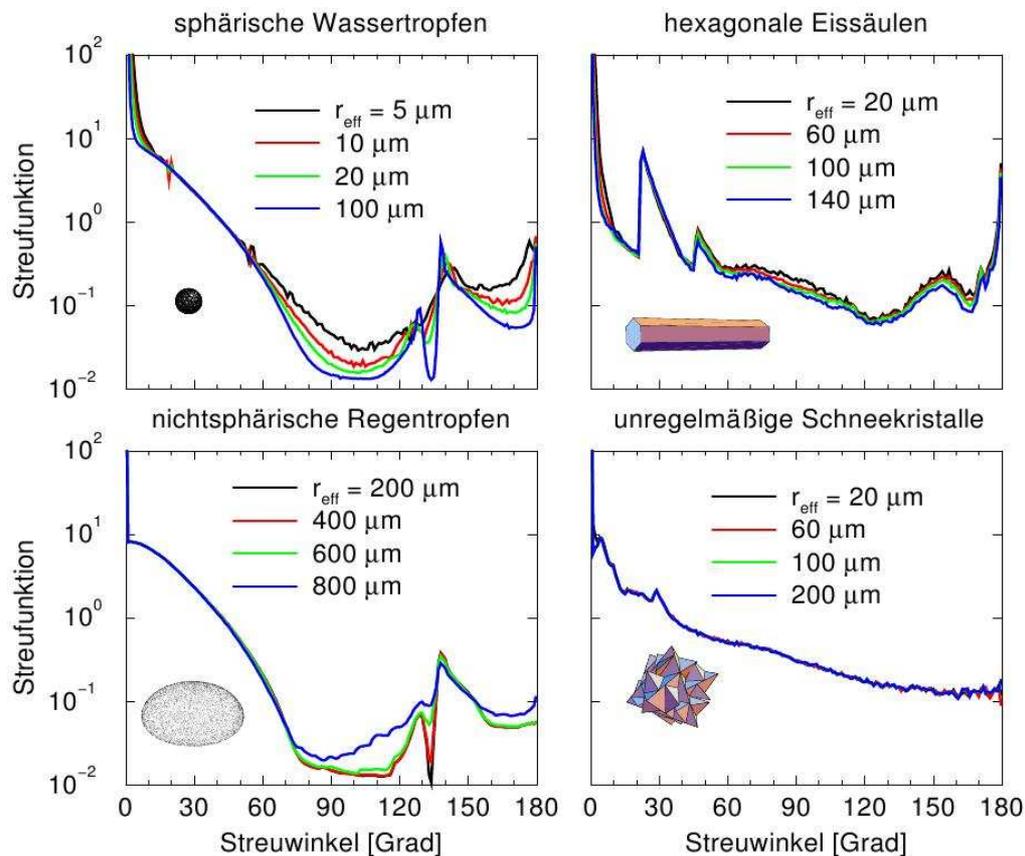


Abbildung 3.2: Streufunktionen für Wolkenwasser (sphärische Tropfen), Regen (nichtsphärische Tropfen), Eis und Schnee (fraktale Polykristalle) und hexagonale Eissäulen [Schewski und Macke(2003)]

Die Strahlungstransportrechnung wurde von [Scheirer und Macke(2000)] für neun Sonnenzenitwinkel in 10° -Schritten zwischen 0° und 80° und vier Azimutwinkel (0° , 90° , 180° , 270°) durchgeführt.

Basierend auf den Ergebnissen des GESIMA-Modells erstellte Mario Schewski Parametrisierungen für die Albedo, die Absorption, die direkte, diffuse und totale Transmission von Wolken ohne ihre interne Struktur zu kennen. GESIMA liefert folgende physikalischen Wolkenparameter:

- Flüssig-, Regen- und Schneewasserpfad
- Bedeckungsgrad
- optische Dicke der Wolken

- Wolkenunterkantenhöhe
- Wolkenoberkantentemperatur

Von diesen zunächst über das Modellgebiet gemittelten Parametern ausgehend wurde eine nichtlineare Regression der Form

$$F_i = a_i + \sum_{j=1}^n b_{ij} \sqrt{C_j} + c_{ij} C_j + d_{ij} C_j^2 \quad (3.10)$$

angesetzt. F_i sind die parametrisierte Albedo, Absorption, direkte, diffuse oder totale Transmission. Die C_j sind die Wolkenparameter und die a_i , b_{ij} , c_{ij} und d_{ij} die anzupassenden Koeffizienten. Der Wurzel- und der Quadratterm wurden zu der sonst linearen Regression hinzugefügt, weil die Wolkeneigenschaften im Allgemeinen nicht linear mit der solaren Einstrahlung verbunden sind. Der Zusammenhang zwischen den optischen Eigenschaften (Albedo, Absorption, direkte und diffuse Transmission) und den Wolkenparametern (Gesamtwasserpfad (TWP) und Bedeckungsgrad) sind in Abbildung 3.3 für einen Sonnenzenitwinkel von 50° dargestellt. Die Albedo steigt mit wachsendem TWP und Bedeckungsgrad. Die Absorption steigt nur leicht mit wachsendem TWP und ist unabhängig vom Bedeckungsgrad. Die diffuse Transmission nimmt zunächst mit wachsendem TWP und Bedeckungsgrad zu und danach mit steigendem TWP wieder ab. Die direkte Transmission wächst mit abnehmendem Bedeckungsgrad, ist aber weitgehend unabhängig vom TWP.

Die Regression wurde für jeden der neun Sonnenzenitwinkel durchgeführt. Von den sieben zur Verfügung stehenden Wolkenparametern wurden jeweils die drei benutzt, die die beste Korrelation hervorgebracht haben. Um herauszufinden welche das sind, wurde eine EOF-Analyse durchgeführt [Schewski(2001)]. Es müssen also pro Sonnenzenitwinkel und für jedes F_i zehn Koeffizienten angepasst werden.

In Tabelle 3.1 sind die Ergebnisse für Regressionen mit einem, zwei und drei Parametern für einen Sonnenzenitwinkel von 50° dargestellt. Die Korrelationen ergeben sich aus dem Vergleich von Modelldaten aus dem GRIMALDI Strahlungstransportmodell und der Parametrisierung. Die Albedo wird in erster Linie vom Bedeckungsgrad beeinflusst. Ohne Bewölkung wäre die Albedo nahezu konstant und hinge nur von der Art des Untergrundes ab. Sind Wolken vorhanden hängt die Albedo stark von der geometrischen Dicke der Wolke und der Wolkenoberkantentemperatur ab. Die Absorption hängt am stärksten von der Wolkenoberkantentemperatur ab. Aus diesem Wolkenparameter kann man auf die Phase der Wolke schließen. Hochreichende vereiste Wolken reflektieren mehr solare Einstrahlung als tiefe Wasserwolken. Somit kann also in Eiswolken weniger absorbiert werden. Den zweitstärksten Einfluss auf die Absorption hat die Wolkendicke. Die Absorption der solaren Einstrahlung findet in der gesamten Atmosphäre, vorwiegend aber in höheren Schichten, statt. Je größer die vertikale Ausdehnung ist, desto mehr solare Strahlung kann absorbiert werden. Der drittstärkste Parameter ist die Wolkenunterkantenhöhe, der ebenfalls angibt, ob sich eine Wolke in höheren oder tieferen Schichten befindet. Da ohne Wolken keine diffuse Transmission stattfindet und diese die direkte

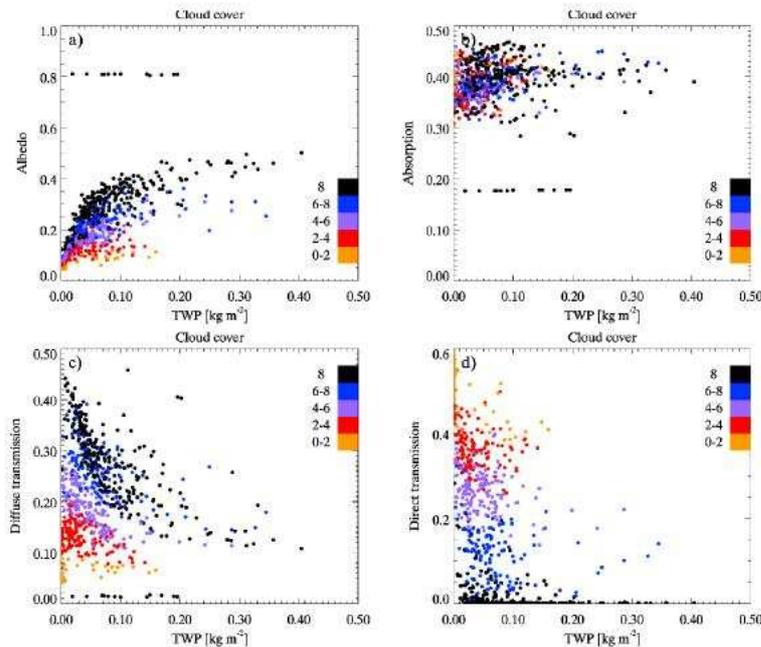


Abbildung 3.3: Breitbandige Albedo, Absorption, diffuse und direkte Transmission als Funktion des Gesamtwasserpfads. Die Farben stehen für unterschiedliche Bedeckungsgrade in Achteln [Schewski und Macke(2003)]

Transmission beeinflusst, ist der Bedeckungsgrad der dominierende Wolkenparameter für diese beiden Strahlungsgrößen. Außerdem hat der LWP einen großen Einfluss auf die beiden Transmissionen, gefolgt von der Wolkenoberkantentemperatur. Die totale Transmission ist die Summe aus diffuser und direkter Transmission und hängt deshalb von denselben Parametern ab.

| Parameter | R | A | T_{diff} | T_{dir} | T_{ges} |
|-----------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1 | N | T^{CT} | N | N | N |
| | 0.743 | 0.690 | 0.783 | 0.975 | 0.789 |
| 2 | N,CH | CH, T^{CT} | LWP,N | LWP,N | LWP,N |
| | 0.864 | 0.816 | 0.879 | 0.982 | 0.895 |
| 3 | LWP,N, T^{CT} | CH, T^{CT} ,Bot | LWP,N, T^{CT} | LWP,N, T^{CT} | LWP,N, T^{CT} |
| | 0.899 | 0.841 | 0.931 | 0.983 | 0.929 |

Tabelle 3.1: Korrelationen zwischen den parametrisierten und den mit dem GRIMALDI Modell errechneten optischen Eigenschaften mit ein, zwei und drei Wolkenparametern

Für diese Arbeit ist nur die Parametrisierung für die totale Transmission wichtig. Von den drei Strahlungsgrößen Albedo, Absorption und Transmission ist die Transmission diejenige mit der höchsten Korrelation für die Parametrisierung mit ein, zwei oder drei

Wolkenparametern bei einem Sonnenzenitwinkel von 50° . Bei anderen Sonnenständen können andere Prozesse diese Korrelation möglicherweise beeinflussen. Deswegen wurde die Korrelation für alle Zenitwinkel von 0° bis 80° untersucht. Aus Abbildung 3.4 geht hervor, dass die Korrelation der Transmissionen für alle Winkel zwischen 0.92 und 0.94 lag und somit die Parametrisierung auch für die anderen Winkel genutzt werden kann.

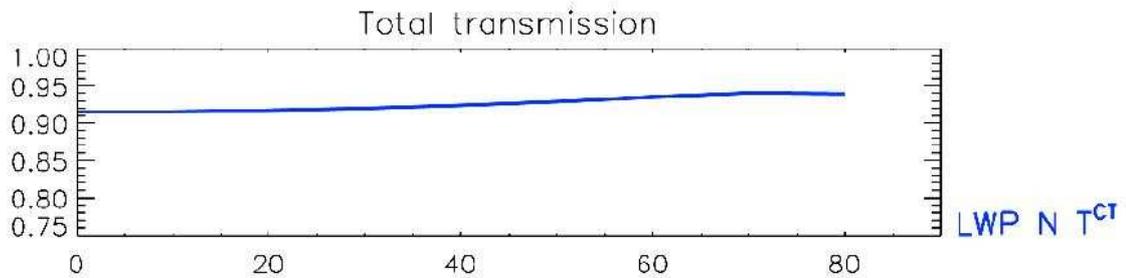


Abbildung 3.4: Korrelation für die drei besten Wolkenparameter für solare breitbandige Transmission abhängig vom Sonnenzenitwinkel [Schewski und Macke(2003)]

In dieser Arbeit wird auf Grund der Verfügbarkeit der Daten die Parametrisierung nur in Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad und dem LWP zu benutzt. Anstelle des LWPs wird hier das Wolkenflüssigwasser CLW verwendet.

Die Schewski-Parametrisierung für die solare Einstrahlung am Boden sieht basierend auf Gleichung (3.10) wie folgt aus:

$$F_{SW} = \left(a + \sum_{j=1}^n b_j \sqrt{C_j} + c_j C_j + d_j C_j^2 \right) \cdot F_{TOA}, \quad (3.11)$$

wobei F_{TOA} die kurzwellige Strahlung ist, die am Oberrand der Atmosphäre ankommt. Die Parametrisierung nach Schewski wird in dieser Arbeit sowohl in ihrer Originalform als auch mit modifizierten an den hier verwendeten Datensatz angepassten Koeffizienten verwendet. Für jede mögliche Kombination der neuen Koeffizienten wurden die Korrelation zwischen gemessener und parametrisierter solarer Einstrahlung, die Mittelwerte und die Standardabweichungen der Differenzen zwischen Messwerten und Parametrisierungen bestimmt. Die Koeffizienten wurden so gewählt, dass die mittlere Differenz zwischen Messung und Parametrisierung 0 W/m^2 ergibt, die Korrelation zwischen Messung und Parametrisierung möglichst hoch und die Standardabweichung der Differenzen möglichst niedrig ist. Die Koeffizienten wurden dabei in einem Bereich von ± 2 variiert und die statistischen Eigenschaften für jede mögliche Kombination bestimmt.

Nach diesem Prinzip ergaben sich folgende Parameter für die modifizierte Schewski Parametrisierung (mSP_0):

| θ | | a | b_N | b_{TWP} | c_N | c_{TWP} | d_N | d_{TWP} |
|----------|---------|--------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|
| 30° | oSP | 0.514 | -0.1612 | 0.0611 | 0.2242 | -1.6097 | -0.2687 | 2.992 |
| | mSP_0 | 0.6269 | -0.1112 | 0.5011 | 0.2691 | -2.5147 | -0.3587 | 2.997 |
| 40° | oSP | 0.6323 | -0.1712 | 0.0688 | 0.2267 | -1.5792 | -0.2730 | 3.0055 |
| | mSP_0 | 0.6276 | -0.2188 | 0.5248 | -0.1623 | -2.1282 | -0.274 | 2.0065 |
| 50° | oSP | 0.6044 | -0.1812 | 0.074 | 0.2258 | -1.5052 | -0.2749 | 2.938 |
| | mSP_0 | 0.5936 | 0.2638 | 0.579 | -0.2141 | -2.0562 | -0.2799 | 1.938 |
| 60° | oSP | 0.5625 | -0.1834 | 0.0731 | 0.2104 | -1.3627 | -0.267 | -2.727 |
| | mSP_0 | 0.545 | -0.0774 | 0.5791 | 0.2554 | -1.9732 | -0.336 | 1.617 |
| 70° | oSP | 0.4966 | -0.1559 | 0.0604 | 0.1482 | -1.1030 | -0.2300 | 2.2258 |
| | mSP_0 | 0.5191 | -0.0499 | 0.6514 | 0.1482 | -2.212 | -0.324 | 2.1218 |
| 80° | oSP | 0.3875 | -0.0615 | 0.0337 | -0.0113 | -0.7152 | -0.1303 | 1.4101 |
| | mSP_0 | 0.4197 | 0.0295 | 0.4947 | -0.0003 | -1.7542 | -0.1843 | 1.3211 |

Tabelle 3.2: Koeffizienten für die original und die modifizierte SP für Sonnenzenitwinkel von 30°, 40°, 50°, 60°, 70° und 80°.

3.2 Parametrisierung nach Zillman

Die solare Einstrahlung am Boden hängt, wie schon in Kapitel 2.1 beschrieben, sehr stark vom Sonnenzenitwinkel ab. Diese Abhängigkeit wird in der SP nur in soweit berücksichtigt, als dass für die neun verschiedenen Sonnenzenitwinkel in 10° Schritten Parametrisierungskoeffizienten berechnet wurden. Für den wolkenfreien Fall sind Bedeckungsgrad und Wolkenflüssigwasser null. Daher ergibt sich in diesem Fall:

$$F = a \cdot F_{TOA}. \quad (3.12)$$

Um die Zenitwinkelabhängigkeit der solaren Einstrahlung besser zu berücksichtigen, wird der Koeffizient a durch die Zillman-Parametrisierung für den wolkenfreien Fall ersetzt.

Die Zillman Parametrisierung ist eine 2 Schritt-Parametrisierung [Zillman(1972)]. Sie berechnet die solare Einstrahlung am Boden in Abhängigkeit der Solarkonstante S_0 , dem Sonnenzenitwinkel θ , dem Wasserdampfdruck p_W sowie dem Bedeckungsgrad N. Zunächst wird die Einstrahlung $Q_{SW}(0)$ mit Hilfe der Transmissivität T_0 für den wolkenfreien Fall berechnet:

$$Q_{SW}(0) = Q_0 \cdot T_0, \quad \text{mit } Q_0 = S_0 \cdot \cos \theta. \quad (3.13)$$

Die Transmissivität errechnet sich aus dem Wasserdampfdruck auf Bodenhöhe:

$$T_0 = \frac{\cos \theta}{(\cos \theta + a)p_W 10^{-3} + b \cos \theta + c}. \quad (3.14)$$

Den Wasserdampf bestimmt man mit Hilfe der Lufttemperatur t in Bodennähe und der relativen Feuchte r nach der Magnusformel:

$$p_W = \frac{r}{100} \cdot 6.1078 \cdot e^{\frac{17.08085 \cdot t}{234.175+t}}. \quad (3.15)$$

Die Koeffizienten in der Parametrisierung errechnete Zillman mit Hilfe von Messdaten zu $a = 2.7$, $b = 1.805$ und $c = 0.1$. Damit diese Parametrisierung auch auf Fälle mit Wolken angewendet werden kann, wurde sie im zweiten Schritt erweitert auf:

$$Q_{SW}(N) = Q_{SW}(0) \cdot T_W, \quad \text{mit } T_W = 1.0 - d \cdot N^3 \quad (3.16)$$

mit dem Koeffizienten $d = 0.6$, dem Bedeckungsgrad N und dem Wolkenfaktor T_W [Laevastu(1960)]. Diese Parametrisierung ist also unabhängig von der Wolkenart und eignet sich daher gut für größere Datensätze, bei denen keine Beobachtungen über den Wolkentyp vorliegen. Außerdem treten bei der Klassifizierung je nach Beobachter große Abweichungen und damit Fehler in der Berechnung der solaren Einstrahlung auf.

Diese Zillman-Parametrisierung wurde von John Kalisch im Rahmen seiner Diplomarbeit weiter modifiziert [Kalisch(2005)]. Die Koeffizienten wurden an einen Datensatz angepasst, der auf Forschungsfahrten im Atlantik während des Meridional Ocean Radiation Experiments (MORE) erstellt wurde. Danach ergaben sich $a = 1.5$, $b = 1.14$ und $c = 0.08$ für den unbewölkten Fall. In Tabelle 3.3 sind die mittleren Differenzen, Standardabweichungen und Korrelationen zwischen gemessenen und parametrisierten solaren Einstrahlungen dargestellt.

| | $\overline{\Delta Q}$ [W/m^2] | σ_5 [W/m^2] | corr |
|--------------|-----------------------------------|------------------------|--------|
| Zillman | 18.4163 | 120.99 | 0.7801 |
| Modifikation | 3.8121 | 111.59 | 0.8214 |

Tabelle 3.3: Mittlere Differenz $\overline{\Delta Q}$, Standardabweichung und Korrelation zwischen dem einminütigen Mittel der gemessenen und berechneten Einstrahlung [Kalisch und Macke(2008)]

Diese neuen Koeffizienten wurden mit einem Datensatz von Sylt untersucht und auch hier ergaben sich für die modifizierte Parametrisierung von Kalisch bessere Korrelationen, niedrigere Standardabweichungen und geringere mittlere Fehler. In dieser Arbeit werden die modifizierten Koeffizienten für den wolkenfreien Fall benutzt.

Als neue Parametrisierung ergibt sich daraus die SP mit Zillman für den unbewölkten Fall ($mSPZ_0$):

$$F_{SW} = Q_{SW}(0) + \left(\sum_{j=1}^n b_j \sqrt{C_j} + c_j C_j + d_j C_j^2 \right) \cdot F_{TOA}. \quad (3.17)$$

Die Koeffizienten für diese Parametrisierung sind in Tabelle 3.4 aufgelistet.

| Parametrisierung | b_N | b_{TWP} | c_N | c_{TWP} | d_N | d_{TWP} |
|------------------|---------|-----------|--------|-----------|---------|-----------|
| 30° | -0.1623 | 0.1711 | 0.1736 | -1.6537 | -0.3797 | 1.886 |
| 40° | -0.2747 | 0.1798 | 0.1357 | -1.5187 | -0.384 | 2.8945 |
| 50° | -0.1783 | 0.184 | 0.1808 | -1.4052 | -0.3849 | 2.328 |
| 60° | -0.1731 | 0.1831 | 0.1704 | -0.7527 | -0.377 | -2.713 |
| 70° | -0.3093 | 0.1714 | 0.2592 | -0.992 | -0.291 | -2.2837 |
| 80° | -0.1863 | 0.1447 | 0.0482 | -0.8247 | -0.2413 | 0.2991 |

Tabelle 3.4: Koeffizienten für die $mSPZ_0$ für Sonnenzenitwinkel von 30°, 40°, 50°, 60°, 70° und 80°.

Kapitel 4

Daten

In dieser Arbeit wurden Messungen vom Richard Aßmann Observatorium (RAO) in Lindenberg/Deutschland und von der Forschungsfahrt ANT-XXIV-1 des Forschungsschiffes Polarstern benutzt, um die auf der Basis von Modelldaten erstellte Schewski Parametrisierung zu testen und zu verbessern.

4.1 Lindenberg

Das Richard Aßmann Observatorium oder Meteorologisches Observatorium Lindenberg (MOL) wurde 1905 gegründet. Es ist seit 1990 Teil des DWDs. Lindenberg liegt in der Nähe von Berlin bei 52.2° Nord und 14.1° Ost.

Es wurden jeweils zehn Minuten-Mittel der Globalstrahlung, des Cloud Liquid Water (CLW), der Temperatur und der relativen Feuchte und Instantanwerte des Bedeckungsgrads jede 10 Minuten verwendet. Die Koeffizienten der SP wurden mit den Daten für Februar bis Dezember 2007 angepasst und mit den Daten für Januar bis September 2006 getestet. Zwischen Oktober 2006 und Februar 2007 wurde der Mikrowellen-Profilier gewartet. Deswegen gibt es für diesen Zeitraum keine CLW-Daten und dementsprechend keine Berechnungen für die solare Einstrahlung am Boden. Außerdem gibt es noch eine Datenlücke vom 4. bis zum 9. April 2007.

Die Globalstrahlung wurde mit einem Pyranometer CM22 von der Firma *Kipp&Zonen* gemessen (Abbildung 4.1). Pyranometer sind Sensoren, die die Globalstrahlung messen. Globalstrahlung ist die Summe aus der direkten Sonneneinstrahlung und der diffusen, also an Atmosphärgasen, Aerosolen und Wolkenpartikeln gestreuten, kurzwelligen Strahlung. Das Pyranometer misst die solare Strahlungsflussdichte auf einer glatten Oberfläche im Wellenlängenbereich zwischen 0.3 und $3 \mu m$. Das Gerät hat einen Sichtwinkel von 180° und misst die elektromagnetischen Wellen im solaren Spektralbereich, die aus dem oberen Halbraum auf das Pyranometer fallen. Das Pyranometer besteht aus einer Thermosäule mit schwarzem Gehäuse, so dass der Sensor alle solare Strahlung absorbiert, und einer Glaskuppel.



Abbildung 4.1: Pyranometer CM22 von der Firma Kipp und Zonen [Kipp und Zonen(2008)]

Die Messungen des CLWs wurden mit einem Mikrowellenprofiler TP/WVP-3001 gemacht (Abbildung 4.2). Das Radiometer misst die Temperatur und die Feuchte bis in 10 km Höhe automatisch auch bei Bewölkung. Außerdem ist es unabhängig von der Tageszeit. Allerdings kommt es bei Regen zu fehlerhaften Messungen. Deshalb wurden Daten, die bei Regen gemessen wurden, in dieser Arbeit nicht verwendet. Der Profiler hat 12 Kanäle im Mikrowellenspektrum, das hauptsächlich von Wasserdampf, CLW und molekularer Sauerstoffemission dominiert wird ([Ware et al.(2003)]). Die benutzten Frequenzen sind 22.035, 22.235, 23.835, 26.235, 30, 51.25, 52.28, 53.85, 54.94, 56.66, 57.29 und 58.8 GHz. Die Frequenzen bis 30 GHz werden vom Wasserdampf beeinflusst, die darüber von der Temperatur. Das CLW hat Einfluss auf alle Kanäle. Außerdem beinhaltet der Profiler noch einen Zenit-Infrarot-, einen Temperatur-, einen Feuchte- und einen Drucksensor. Durch Messungen mit Frequenzen in der Sauerstoffbande kann das Temperaturprofil, durch Messungen in der Nähe der Wasserdampflinie das Feuchteprofil errechnet werden. Dies geschieht mit Hilfe von Fernerkundungsalgorithmen. Ein Vergleich mit Radiosondenaufstiegen zeigt, dass die Genauigkeit bei der Berechnung nach Güldner und Spänkuch (2001) bei 0.6 K in Bodennähe und bei weniger als 1.6 K in der Höhe für die Temperatur und bei $0.2 - 0.3 \text{ g/m}^3$ am Boden und bei $0.8 - 1 \text{ g/m}^3$ ab 1 km Höhe für Wasserdampf liegt. Wolkentropfen emittieren ebenfalls elektromagnetische Strahlung. Daher kann auch das CLW aus den Mikrowellenmessungen bestimmt werden. Dazu sind allerdings weitere Informationen, wie zum Beispiel die Wolkenhöhe [DWD(2005)], die mit Hilfe der Wolkenunterkantentemperatur berechnet werden kann und Radiosondenaufstiege nötig.

Die Wolkenbedeckungsgrade wurden aus den Bildern eines *VIS/NIR Daylight Whole Sky*



Abbildung 4.2: 12 Kanal Mikrowellenprofiler [Ware et al.(2003)]

Imagers (WSI) berechnet. Der WSI wurde am Marine Physical Laboratory (MPL) des Scripps Instituts für Ozeanographie in San Diego, Kalifornien, entwickelt und fand unter anderem Anwendung im ARM (Atmospheric Radiation Monitoring) Programm. Der WSI nimmt nur zwischen Sonnenauf- und Sonnenuntergang Fotografien auf. Das Gerät besteht aus einer Digitalkamera, einem Linsensystem, einem Fischauge mit einem Sichtfeld von 180° und einer Scheibe zur Abschattung der direkten Sonne. Die gestreute solare Strahlung aus dem gesamten oberen Halbraum trifft auf das Fischauge, geht durch das Filtersystem und erreicht schließlich die Kamera. Die Filter für die in dieser Arbeit verwendeten Bilder sind im blauen, roten und nahem infraroten Bereich. Jede Aufnahme besteht aus 980×980 Bildpunkten und 4096 Graustufen. Die Pixelauflösung geht von 0.15° im Zenit bis 0.25° in Horizontnähe. Die Kamera macht alle zehn Minuten eine Himmelsaufnahme. Aus den Fotos im Blauen und Roten werden die Bedeckungsgrade berechnet. Dabei wird zwischen wolkenfrei, dünnen und dicken Wolken unterschieden. Aus dem Verhältnis von blau zu rot können die undurchsichtigen dicken Wolken auf Grund ihrer spektralen Eigenschaften ermittelt werden. Zur Bestimmung der wolkenfreien Pixel gibt es eine Bibliothek mit wolkenfreien Aufnahmen bei verschiedenen Sonnenzenitwinkeln, von denen ebenfalls das Verhältnis von blau zu rot ausgerechnet wird und mit dem aktuellen Foto verglichen wird. Wenn das blau-rot-Verhältnis eines Pixels um mehr als 20% größer ist als das für den wolkenfreien Fall, wird es als dünne Wolke klassifiziert. Sind die Bildpunkte heller oder dunkler als vordefinierte Grenzwerte, werden sie nicht berücksichtigt. Genauere Informationen finden sich bei [Feister und Shields(2005)].



Abbildung 4.3: VIS/NIR Daylight Whole Sky Imager am RAO Lindenberg

4.2 Polarstern

Um nicht nur die zeitliche Variation an einem Ort für die Parametrisierung in Betracht zu ziehen, sondern auch die räumlichen Schwankungen und die maritime Bewölkung, wurde die SP auch auf Daten einer Forschungsfahrt angewandt. Verwendet wurden die Messergebnisse, die auf der Fahrt des FS Polarstern von Bremerhaven nach Kapstadt vom 26. Oktober bis zum 26. November 2007 gewonnen wurden. Die Fahrtroute ist in Abbildung 4.4 gezeigt. So erhält man Ergebnisse für die gemäßigten Breiten, die Subtropen und die Tropen.

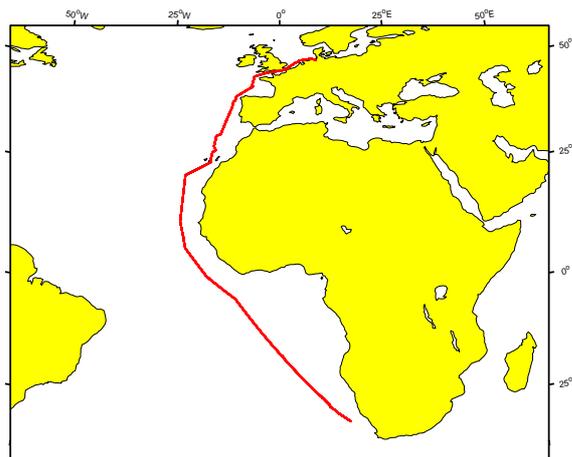


Abbildung 4.4: Fahrtroute von Bremerhaven nach Kapstadt

Während der Fahrt wurden in 15 Sekunden Abständen Aufnahmen mit einer Wolkenka-

mera gemacht. In Abbildung 4.5 ist ein Bild, das mit der Wolkenkamera aufgenommen wurde dargestellt. Das Foto entstand am 4. November 2007. Um den Bedeckungsgrad aus einem solchen Foto zu errechnen wird zunächst eine Maske über das Bild gelegt, die die Schiffsaufbauten herauschneidet, damit diese nicht fälschlicherweise als bewölktes Pixel interpretiert werden. Aus dem Verhältnis der Blau- und Rotwerte eines jeden Pixels kann mit Hilfe eines Schwellwertes bestimmt werden, ob es sich um ein Wolkenpixel oder um blauen Himmel handelt [Kalisch(2005)]. Außerdem wurde noch eine Korrektur für den Fall von direktem Sonnenlicht durchgeführt. Fällt direkte solare Strahlung auf die Glaskuppel der Wolkenkamera, dann kommt es zu Dispersion. Die Fotos wurden nach grünen und roten Pixeln abgesucht. Gibt es mehr als 100 solcher Pixel handelt es sich höchstwahrscheinlich um direkte Sonneneinstrahlung und der Bedeckungsgrad wird im 9% verringert. Der Berechnungsfehler für den Bedeckungsgrad liegt bei 50% der Fälle unter 10%. Bei Sonnenauf- und Sonnenuntergang kann es zu Fehlern bis zu 50% kommen. Eine genauere Beschreibung zur Berechnung des Bedeckungsgrades aus den Wolkenfotos findet sich bei [Kalisch und Macke(2008)].



Abbildung 4.5: Aufnahme der Wolkenkamera am 4.11.2007 um 15 : 59 Uhr

Die LWP-Daten stammen von Messungen mit einem Mikrowellenradiometer (HATPRO = *Humidity and Temperature Profiler*), das auf 14 verschiedenen Frequenzen die thermische Emission entlang der Absorptionslinien von Sauerstoff und Wasserdampf misst. Das Gerät ist in Abbildung 4.6 gezeigt. Bisher wurde das Mikrowellenradiometer nur an Land eingesetzt. Für die Nutzung auf See ist vom Hersteller *Radiometer Physics* eine wasserbeständige Folie für das Gerät installiert worden. Außerdem musste ein Standort auf dem Schiff gewählt werden, der die Beeinflussung der Messung durch Gegenstände oder andere Geräte ausschließt. Nähere Informationen zur Qualität der Messung auf See finden sich bei [Wassmann(2008)]. Für die Feuchteprofile der Atmosphäre werden Frequenzen im Bereich von 22.2 GHz bis 31.4 GHz benutzt. Durch einen Vergleich von zwei Kanälen aus diesem Bereich lässt sich der LWP bestimmen. Hier wird zur Berechnung des LWPs ein

Fernerkundungsalgorithmus verwendet, der auf holländischen Radiosondenaufstiegen beruht. Da bei Anwendung dieses Algorithmus' bei wolkenfreien Fällen positive LWP-Werte und teilweise auch negative LWP-Werte auftreten, wurden sie in der Diplomarbeit von Yann Zoll mit Hilfe einer nichtlinearen Verbesserungsmethode korrigiert. Hierbei wurden die wolkenfreien Zeitpunkte herausgesucht und die Fehler für diese Fälle bestimmt. Zwischen zwei wolkenfreien Zeitpunkten wird für jeden Punkt ein Korrekturwert bestimmt. Dabei wird jede dieser Differenzen mit ihrer zeitlichen Entfernung vom aktuellen Punkt gewichtet. Die Gewichtungsfunktion ist eine Gauss-Verteilung. Alle negativen LWPs, die nach dieser Korrektur noch vorhanden sind, werden auf null gesetzt. Eine detaillierte Beschreibung dieser Methode findet sich bei [Zoll(2008)].

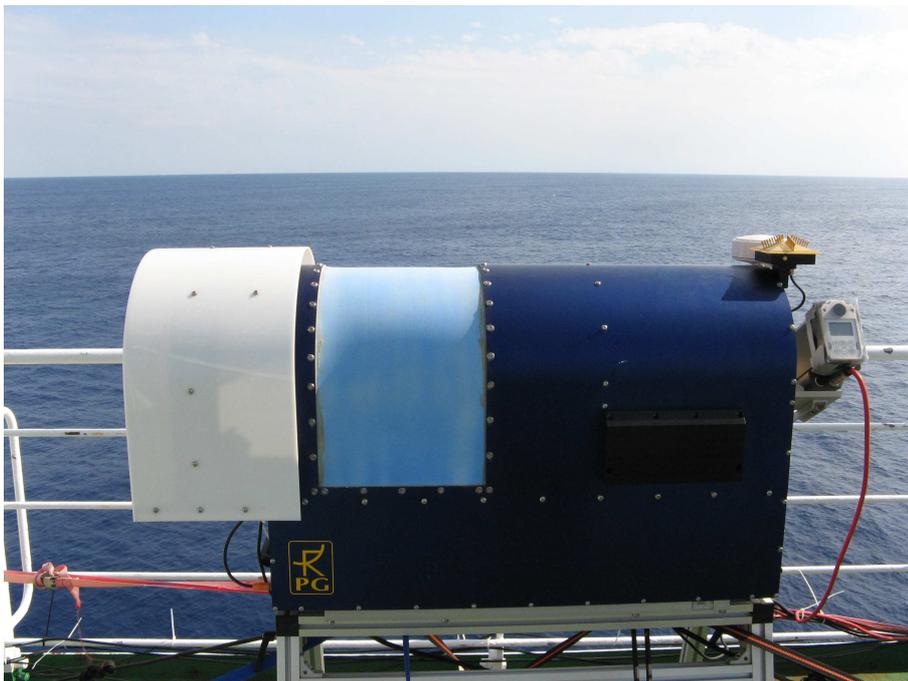


Abbildung 4.6: Mikrowellenradiometer HATPRO auf dem FS Polarstern

Die solare Einstrahlung wurde mit einem Pyranometer der Firma *Kipp&Zonen* gemessen. Die relative Feuchte und die Temperatur wurden mit fest installierten Geräten an Bord der Polarstern gemessen.

Kapitel 5

Auswertung

In dieser Arbeit wird die auf dem GESIMA-Modell und dem Monte-Carlo Strahlungstransportmodell basierende Schewski Parametrisierung auf gemessene Daten vom RAO Lindenberg angewendet und anschließend angepasst. Die solare Strahlung F_{SW} , die den Boden erreicht, errechnet sich mit Hilfe der am Oberrand der Atmosphäre eintreffenden Einstrahlung F_0 wie folgt:

$$F_{SW} = F_0 \cdot T_{tot} \quad (5.1)$$

mit T_{tot} = totale Transmission.

Diese berechnete solare Einstrahlung wird mit der gemessenen verglichen. Durch Berechnung der Korrelation zwischen den beiden, lässt sich erkennen, wie gut die Parametrisierung die Messungen wiedergeben kann. Hierbei wurde die *Spearman-Rangkorrelation* verwendet, weil diese auch für nichtlineare Zusammenhänge gilt und durch einzelne Ausreißer nicht so stark beeinflusst wird wie die normalerweise verwendete lineare Korrelation nach Pearson. Eine genauere Beschreibung der Berechnung der Spearman-Rangkorrelation findet sich in [Press(1999)]. Es wurden zwei verschiedene Korrelationen betrachtet: Erstens die Korrelation, die den Tagesgang enthält. Sie wird im folgenden Text mit $korr_{mT}$ bezeichnet. Zweitens die Korrelation, die nur die Abweichungen der solaren Strahlung vom Tagesgang enthält. Der Tagesgang wurde errechnet, indem das laufende Mittel über einen Zeitraum von jeweils einer halben beziehungsweise einer Stunde vor und nach dem Zeitpunkt gebildet wurde. Dieser Tagesgang wurde dann von den Messungen und Parametrisierungen abgezogen und die Korrelationen der Differenzen berechnet. Diese beiden Korrelationen werden im folgenden Text mit $korr_{oT30}$ und $korr_{oT60}$ bezeichnet. Außerdem wurden die Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenzen zwischen Parametrisierung und Messung berechnet, um auch Aussagen über die Genauigkeit der verschiedenen Parametrisierungen machen zu können.

Bei den Messwerten aus Lindenberg vom 30. und 31. Mai 2007 treten zum Teil sehr große Abweichungen zwischen Messung und Parametrisierung auf (Abbildung 5.1). Gezeigt sind die Messwerte der solaren Strahlung für die beiden Tage auf der linken Seite als schwarze Kurve. Auf der rechten Seite ist der Bedeckungsgrad in rot und das CLW in blau dargestellt. Der Bedeckungsgrad zeigt sehr schnelle Sprünge zwischen null und acht

Achteln. Diese Schwankungen finden sich weder in den CLW-Daten noch in den Messungen der solaren Einstrahlung. Dies lässt auf einen Fehler in der Erkennung der Bewölkung durch das Berechnungsprogramm für den Bedeckungsgrad schließen. Da nur an diesen beiden Tagen so starke Schwankungen im Bedeckungsgrad auftreten und damit dieser Fehler die Statistik nicht verfälscht, wurden der 30. und 31. Mai 2007 bei der Auswertung nicht mitbetrachtet.

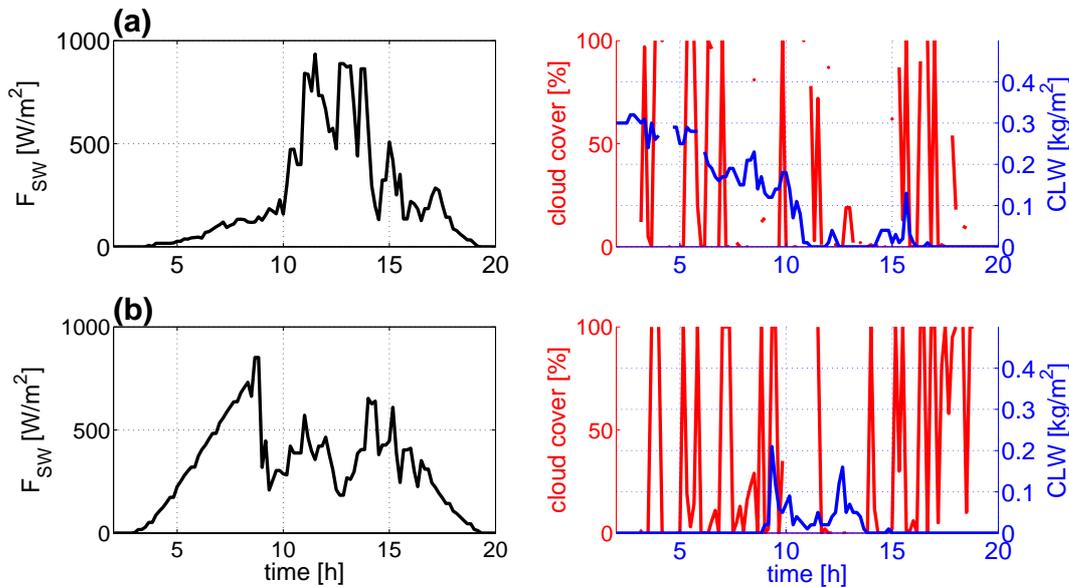


Abbildung 5.1: Messung und Parametrisierung der solaren Einstrahlung (linke Seite) und Bedeckungsgrad und CLW (rechte Seite) für den 30. (a) und 31. (b) Mai 2007 in Lindenberg

5.1 Original Schewski-Parametrisierung

Zunächst wird die original SP der Form

$$T_{tot} = a + \sum_{j=1}^n b_j \sqrt{C_j} + c_j C_j + d_j C_j^2 \quad (5.2)$$

mit den von Mario Schewski bestimmten Koeffizienten zur Berechnung der totalen Transmission T_{tot} auf die Daten von Februar bis Dezember 2007 angewandt. Ein Vergleich zwischen der parametrisierten und der mit dem Pyranometer gemessenen kurzwelligigen Strahlung gibt Aufschluss darüber, ob die modellbasierende Parametrisierung die Messungen gut wiedergeben kann.

In Abbildung 5.2 ist die mit der original SP berechnete gegen die gemessene solare Strahlung aufgetragen. Unterschiedliche Farben stehen für verschiedene Monate von rot für Februar bis violett für Dezember. Im Winter ist die Einstrahlung natürlich wesentlich kleiner als im Sommer. So gibt es im Dezember nur Werte bis zu 300 W/m^2 , während im

Juli Einstrahlungen bis zu 1050 W/m^2 gemessen wurden. Die rote Gerade ist die Linie, an der Messungen und Berechnungen überein stimmen. Für alle Punkte, die oberhalb der roten Gerade liegen wurden die Messungen durch die SP unterschätzt, für alle Punkte unterhalb der Referenzlinie wurden die Messungen überschätzt.

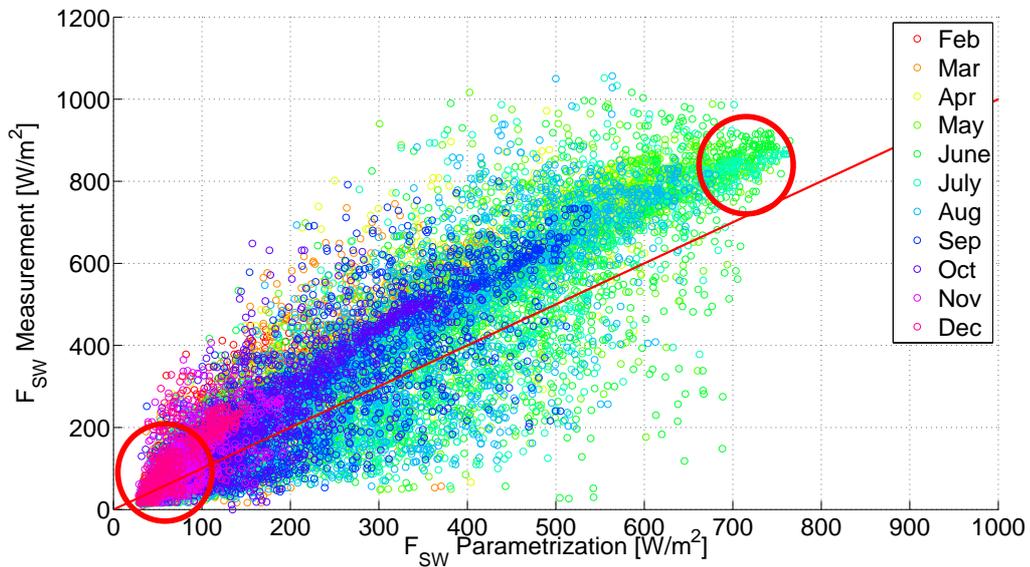


Abbildung 5.2: Vergleich zwischen der gemessenen und nach der original SP berechneten solaren Einstrahlung. Verschiedene Farben stehen für verschiedene Monate.

Die Parametrisierung unterschätzt für alle Monate größtenteils die Messungen. Für die Monate Mai und Juni gibt es Ausreißer. Es ergibt sich eine Überschätzung der geringen Messwerte und eine Unterschätzung der hohen Messwerte durch die oSP. Die Differenzen zwischen Messung und Parametrisierung sind allerdings für mittlere solare Einstrahlungen am größten. In diesem Bereich treten aber sowohl Über- als auch Unterschätzungen auf.

| | $\overline{\Delta Q} [\text{W/m}^2]$ | $\sigma [\text{W/m}^2]$ | $korr_{mT}$ | $korr_{\sigma T30}$ | $korr_{\sigma T60}$ |
|-------------|--------------------------------------|-------------------------|-------------|---------------------|---------------------|
| original SP | -68.18 | 117.49 | 0.875 | 0.786 | 0.754 |

Tabelle 5.1: Statistische Auswertung der original SP mit dem Mittelwert der Differenzen zwischen Parametrisierung und Messung ($\overline{\Delta Q}$), deren Standardabweichung (σ) und den Rangkorrelationen nach Spearman mit und ohne Tagesgang

In Tabelle 5.1 ist die Statistik der Fehler der original SP gezeigt. Der Mittelwert der Differenzen zwischen der gemessenen und parametrisierten solaren Einstrahlung beträgt -68.18 W/m^2 , also eine deutliche Unterschätzung der Messwerte durch die Parametrisierung. Die Standardabweichung liegt bei 117.49 W/m^2 . Die Spearman-Rangkorrelation

mit Tagesgang beträgt 0.875. Die Korrelation ohne Tagesgang ist, wie zu erwarten war, deutlich niedriger. Für das laufende Mittel über eine Stunde ($korr_{\sigma T_{30}}$) ergibt sich eine Korrelation von 0.786. Für das laufende Mittel über zwei Stunden ist sie etwas niedriger und liegt bei 0.754. Eine Betrachtung der Korrelationen in Abhängigkeit des Bedeckungsgrades, des CLWs und des Sonnenzenitwinkels wird in Kapitel 5.4 durchgeführt.

Um festzustellen, wo die Schwachstellen der SP liegen, werden nun an Hand von einigen Beispieltagen verschiedene Bewölkungsszenarien untersucht.

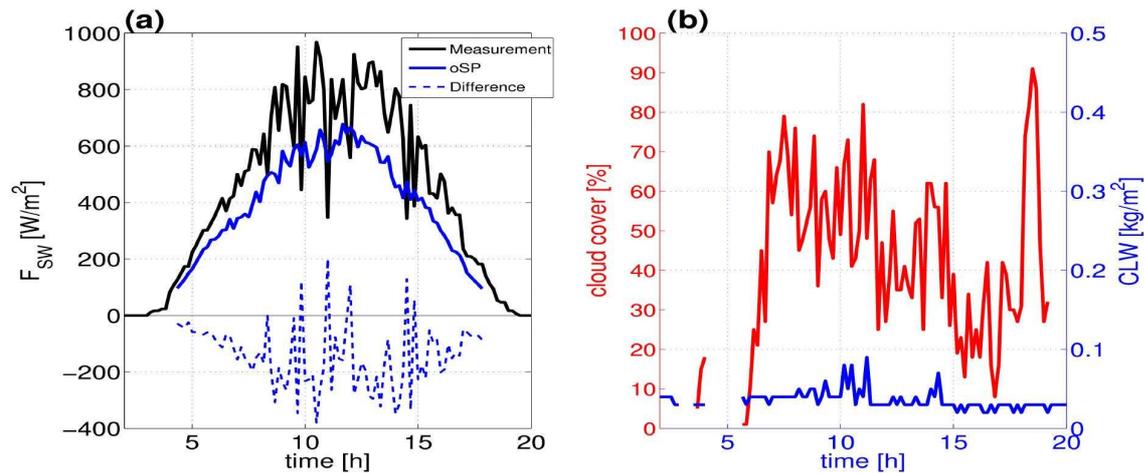


Abbildung 5.3: Schnell wechselnde Bewölkung am 8. Juli 2007: (a) gemessene (schwarze Linie) und mit der original SP berechnete (durchgezogene blaue Linie) kurzwellige Einstrahlung und deren Differenz (gestrichelte blaue Linie), (b) Bedeckungsgrad (rote Linie) und CLW (blaue Linie).

Zunächst wird der 8. Juli 2007 in Abbildung 5.3 betrachtet. In Abbildung 5.3 (a) sind die Messwerte der solaren Einstrahlung in schwarz eingezeichnet. Die durchgezogene blaue Linie stellt die Parametrisierung dar und die gestrichelte blaue Linie gibt die Differenz zwischen Messung und Berechnung an. Der Bedeckungsgrad in Prozent und der Wolkenflüssigwassergehalt in kg/m^2 sind in Abbildung 5.3 (b) als rote beziehungsweise blaue Linie dargestellt.

Der Flüssigwassergehalt ist über den ganzen Tag relativ konstant und liegt zwischen $0.03 kg/m^2$ und $0.09 kg/m^2$. Der Bedeckungsgrad variiert stark. Gegen 6 Uhr morgens ist es annähernd wolkenfrei. Bis mittags sind immer zwischen 40% und 80% des Himmels bedeckt. Nachmittags nimmt die Bedeckung wieder etwas ab und schwankt zwischen 10% und 60% bevor gegen 19 Uhr ein maximaler Bedeckungsgrad von 90% erreicht wird. Die Ergebnisse der Parametrisierung liegen fast den ganzen Tag deutlich unter der gemessenen solaren Einstrahlung. Außerdem ist die Parametrisierung nicht in der Lage, die starken Schwankungen der Messwerte wiederzugeben.

Ein anderes Szenario ist in Abbildung 5.4 für den 27. Juli 2007 gezeigt. Hier schwankt der Bedeckungsgrad in Abbildung 5.4 (b) mit einer geringeren Frequenz, aber mit einer wesentlich höheren Amplitude. Bis ca. 5 Uhr ist es weitestgehend bedeckt, danach fol-

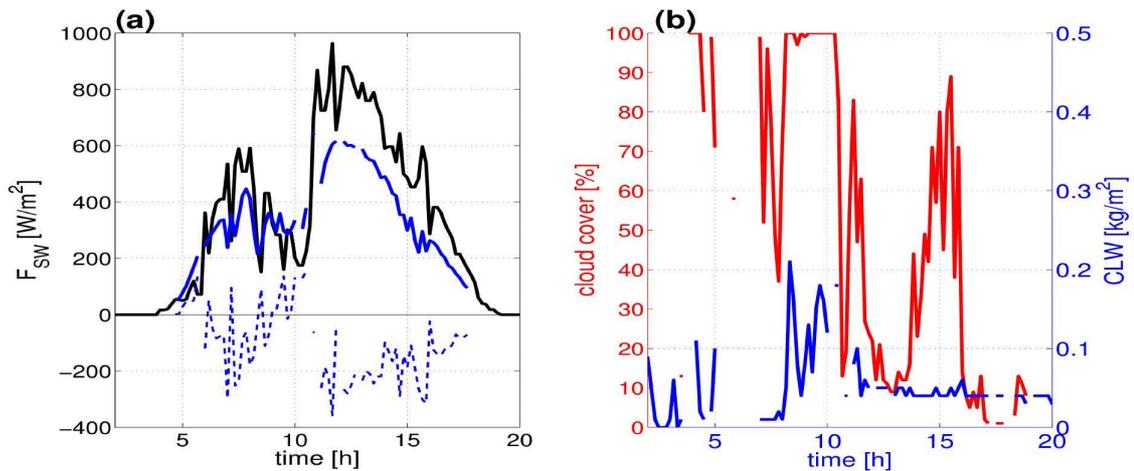


Abbildung 5.4: Wechselnde Bewölkung am 27. Juli 2007: (a) gemessene (schwarze Linie) und mit der original SP berechnete (durchgezogene blaue Linie) kurzwellige Einstrahlung und deren Differenz (gestrichelte blaue Linie), (b) Bedeckungsgrad (rote Linie) und CLW (blaue Linie).

gen eineinhalb Stunden mit Bedeckungsgraden meist unter 20%. Anschließend schwankt es für eineinhalb Stunden zwischen 40% und 100%. Von 8 bis 11 Uhr ist der Himmel vollständig bedeckt. Den Rest des Tages liegt der Bedeckungsgrad zwischen 10% und 90% und gegen Abend gibt es noch wolkenfreien Himmel. Das CLW liegt bis 8 Uhr unter $0.1 \text{ kg}/m^2$. Während der komplett bedeckten Stunden variieren die CLW-Werte zwischen $0.05 \text{ kg}/m^2$ und $0.2 \text{ kg}/m^2$. Den Rest des Tages ist das CLW relativ konstant zwischen $0.04 \text{ kg}/m^2$ und $0.05 \text{ kg}/m^2$. Die Messwerte der solaren Einstrahlung steigen zunächst an bis auf $600 \text{ W}/m^2$ und erreichen dann zur Zeit der kompletten Bewölkung ein Minimum von $190 \text{ W}/m^2$. Mit stark abnehmender Bewölkung steigt die kurzwellige Strahlung deutlich auf über $1000 \text{ W}/m^2$ an. Danach folgt sie mit einigen kleineren Schwankungen dem Sonnenverlauf.

Die Parametrisierung unterschätzt auch hier die Messwerte fast immer. Am größten ist die Unterschätzung bei nahezu unbedecktem Himmel am Mittag. Nur bei vollständig bedecktem Himmel liegen die berechneten solaren Einstrahlungen über den vom Pyranometer gemessenen. Die Parametrisierung hängt stark vom CLW ab. Das wird daran deutlich, dass die parametrisierte Kurve vormittags bei schwankendem CLW ebenfalls schwankt, während sie nachmittags bei annähernd konstantem CLW einen relativ glatten Verlauf zeigt. Der Einfluss der Bewölkung scheint vor allem am Nachmittag gering zu sein, da die parametrisierte Kurve trotz fast zu 90% bedecktem Himmel nur leicht von ihrem glatten Verlauf abweicht.

Nun sollen noch zwei Extremfälle betrachtet werden. Im ersten Fall ist der Himmel fast den ganzen Tag vollständig bedeckt. Im zweiten Fall gibt es fast keine Wolken.

Abbildung 5.5 zeigt die Einstrahlung, den Bedeckungsgrad und das CLW vom 5. Februar 2007. Der Bedeckungsgrad betrug fast den ganzen Tag 100%. Das CLW liegt in Abbildung 5.5 (b) fast immer über $0.1 \text{ kg}/m^2$ und erreicht maximal $0.3 \text{ kg}/m^2$. Bis ungefähr 12 Uhr

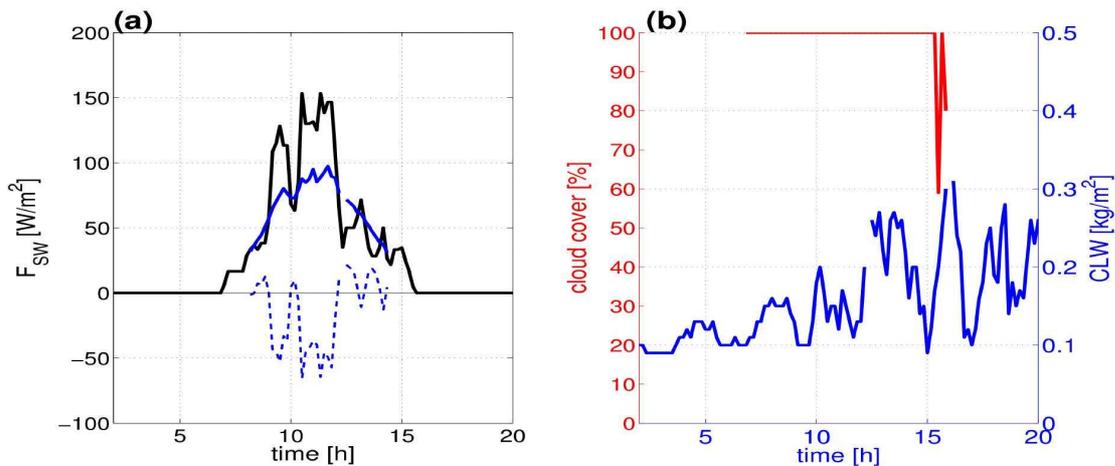


Abbildung 5.5: *Komplett bedeckter Himmel am 5. Februar 2007: (a) gemessene (schwarze Linie) und mit der original SP berechnete (durchgezogene blaue Linie) kurzwellige Einstrahlung und deren Differenz (gestrichelte blaue Linie), (b) Bedeckungsgrad (rote Linie) und CLW (blaue Linie).*

schwankt das CLW nur leicht zwischen 0.1 kg/m^2 und 0.2 kg/m^2 , nachmittags variiert es stärker zwischen 0.1 kg/m^2 und 0.3 kg/m^2 . In Abbildung 5.5 (a) erreicht die am Boden gemessene solare Einstrahlung nur einen Maximalwert von 150 W/m^2 . Das entspricht ungefähr 30% der kurzwelligen Strahlung, die zu diesem Zeitpunkt ohne Bewölkung am Boden ankommen würde. Die Parametrisierung unterschätzt auch hier die Messung und kann den schnellen Schwankungen der Messwerte nicht folgen. Sie ergibt eher eine glatte Kurve. Außerdem kann die oSP den starken durch die plötzliche Zunahme des CLWs verursachten Abfall der solaren Strahlung gegen 12 Uhr nicht wiedergeben und überschätzt dort die Messung.

Als Gegenstück dazu soll nun ein fast wolkenfreier Tag betrachtet werden. Bei unbedecktem Himmel ist die Einstrahlung meist größer als bei Bewölkung. Außerdem unterliegt die Einstrahlung kaum Schwankungen durch den Einfluss von Wolken. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 5.6 mit dem 16. April 2007 dargestellt. Der Bedeckungsgrad ist immer kleiner als 10% mit Ausnahme von 10 bis 13 Uhr, wo er maximal 20% erreicht, so dass man diesen Tag als annähernd wolkenfrei ansehen kann. Der Flüssigwassergehalt liegt immer unter 0.02 kg/m^2 . Das heißt, dass die Konstante a in der oSP für diesen Fall eine große Rolle spielt, weil alle anderen Terme relativ klein sind. Die Parametrisierung unterschätzt die Messwerte den ganzen Tag über. Die größten Abweichungen treten bei den größten Messwerten auf. Im Mittel liegt die Unterschätzung bei etwa 27%. Das deutet darauf hin, dass die Koeffizienten a nicht optimal gewählt wurden. In der gemessenen Kurve treten minimale Schwankungen der solaren Einstrahlung auf. Diese Schwankungen finden sich in der Parametrisierung allerdings nicht wieder. Dadurch wird die Korrelation ohne Tagesgang erniedrigt.

In Tabelle 5.2 findet sich die statistische Betrachtung der einzelnen Beispieltage. Berech-

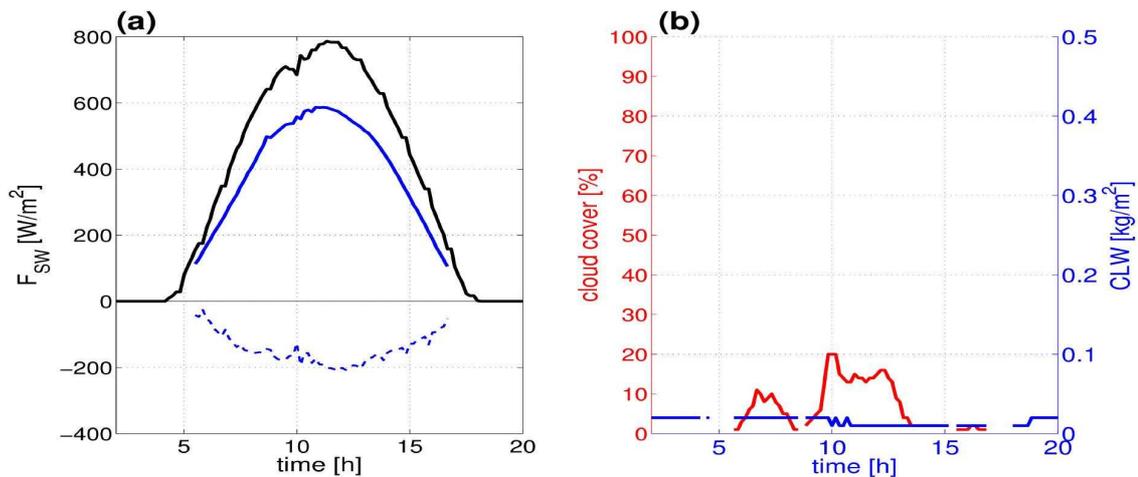


Abbildung 5.6: Nahezu unbewölkt am 16. April 2007: (a) gemessene (schwarze Linie) und mit der original SP berechnete (durchgezogene blaue Linie) kurzweilige Einstrahlung und deren Differenz (gestrichelte blaue Linie), (b) Bedeckungsgrad (rote Linie) und CLW (blaue Linie).

net wurden die Mittelwerte der Differenzen von Parametrisierung und Messwerten, deren Standardabweichung und die Rangkorrelation mit und ohne Tagesgang nach Spearman der beiden Zeitreihen.

An allen Tagen ist der Mittelwert der Differenzen negativ. Die größte mittlere Differenz ergibt sich für den wolkenfreien Tag am 16. April. Ähnliche große Abweichungen gibt es bei den beiden wechselhaft bewölkten Tagen im Juli. Dies zeigt deutlich, dass die original SP bei wolkenfreien und nur teilweise bedeckten Szenarien zu kleine solare Einstrahlungen am Boden berechnet, weil sie mit Hilfe von eher stark bewölkten Fällen erstellt wurde. Die Koeffizienten der Parametrisierung und insbesondere die Konstante a , die die Berechnung für den wolkenfreien angibt, müssen neu angepasst werden um die negative Tendenz der Parametrisierung auszugleichen. Dass die mittlere Differenz bei dem vollständig bewölkten Tag am 5. Februar sehr klein ist, hat zwei Gründe: Zum einen ist die Einstrahlung zu diesem Zeitpunkt im Jahr und durch die Bewölkung sehr gering. Sie erreicht nur ein Maximum von $150 W/m^2$. Zum anderen unterschätzt und überschätzt die Parametrisierung die Messung gleichermaßen, so dass sich im Mittel eine kleine Abweichung ergibt. Die mittlere quadratische Abweichung (*RMS-Fehler*) ist mit $30 W/m^2$ doppelt so groß wie $\overline{\Delta Q}$.

Die Standardabweichung ist aus denselben Gründen im Vergleich zu den anderen Tagen klein mit $27.66 W/m^2$, allerdings in der Relation zur tatsächlichen Einstrahlung groß. Die Standardabweichung ist für die beiden teilweise bedeckten Tage mit $113.22 W/m^2$ beziehungsweise $126.43 W/m^2$ relativ groß. Das liegt daran, dass die Parametrisierung den schnellen Schwankungen der Messwerte nicht folgen und die starken Maxima und Minima nicht erreicht. Außerdem ist die Einstrahlung im Juli auf Grund des Sonnenstandes höher als im Februar und deswegen können auch höhere Fehler und Standardabweichungen auftreten. An dem annähernd wolkenlosen Tag ist die Standardabweichung gering,

weil es eine sehr glatte Kurve ohne starke Schwankungen ist.

Die Korrelation mit Tagesgang ist wie zu erwarten war für den wolkenfreien mit 0.968 deutlich höher als für die anderen Tage. Die Korrelation ohne Tagesgang ist allerdings für diesen Tag am niedrigsten. Es gibt in der Einstrahlungskurve kleine Schwankungen, die parametrisierte Kurve ist eher glatt. Deshalb beträgt die Korrelation ohne Tagesgang nur $korr_{oT30} = 0.585$ und $korr_{oT60} = 0.679$. Für den ganztägig bewölkten Fall ist die Korrelation mit Tagesgang am niedrigsten mit 0.882. Die teilweise bewölkten Tage im Juli liegen knapp darüber. $korr_{oT30}$ und $korr_{oT60}$ sind für den 27. Juli am größten, gefolgt vom 8. Juli.

| Tag | $\overline{\Delta Q}$ [W/m^2] | σ [W/m^2] | $korr_{mT}$ | $korr_{oT30}$ | $korr_{oT60}$ |
|----------------------------|-----------------------------------|----------------------|-------------|---------------|---------------|
| 8.7., schnell wechs. Bew. | -139.51 | 113.22 | 0.85 | 0.693 | 0.659 |
| 27.7., langsam wechs. Bew. | -103.37 | 126.43 | 0.893 | 0.746 | 0.697 |
| 5.2., komplett bedeckt | -14.41 | 27.66 | 0.882 | 0.61 | 0.61 |
| 16.4., fast wolkenfrei | -143.8 | 46.0 | 0.968 | 0.585 | 0.679 |

Tabelle 5.2: Statistische Auswertung der original SP für die Tage 8. und 27. Juli, 5. Februar und 16. April 2007 mit dem Mittelwert der Differenzen zwischen Parametrisierung und Messung ($\overline{\Delta Q}$), deren Standardabweichung (σ) und den Rangkorrelationen nach Spearman mit und ohne Tagesgang

5.2 Modifizierte SP

Nun sollen die Koeffizienten a , b_j, c_j und d_j so an den Datensatz angepasst werden, dass die mittlere Differenz zwischen Messung und Berechnung $0 W/m^2$ beträgt. Weiterhin soll eine möglichst hohe Korrelation mit Tagesgang und eine möglichst geringe Standardabweichung erreicht werden. Diese modifizierte Parametrisierung wird mSP_0 genannt.

Abbildung 5.7 zeigt den Vergleich zwischen der gemessenen und der mit der mSP_0 parametrisierten solaren Einstrahlung am Boden. Bei dieser Parametrisierung werden sowohl die sehr hohen als auch die niedrigen Strahlungswerte gut wiedergegeben. Der Großteil der berechneten Werte liegt in der Nähe der roten Geraden, die angibt, wo Messwerte und Parametrisierung gleich sind. Die Ausreißer im Mai und Juni sind allerdings immer noch vorhanden.

| Parametrisierung | $\overline{\Delta Q}$ [W/m^2] | σ [W/m^2] | $korr_{mT}$ | $korr_{oT30}$ | $korr_{oT60}$ |
|------------------|-----------------------------------|----------------------|-------------|---------------|---------------|
| oSP | -68.18 | 117.49 | 0.875 | 0.786 | 0.754 |
| mSP_0 | 0 | 102.01 | 0.91 | 0.743 | 0.717 |

Tabelle 5.3: Statistische Auswertung der mSP_0 mit dem Mittelwert der Differenzen zwischen Parametrisierung und Messung ($\overline{\Delta Q}$), deren Standardabweichung (σ) und den Rangkorrelationen nach Spearman mit und ohne Tagesgang

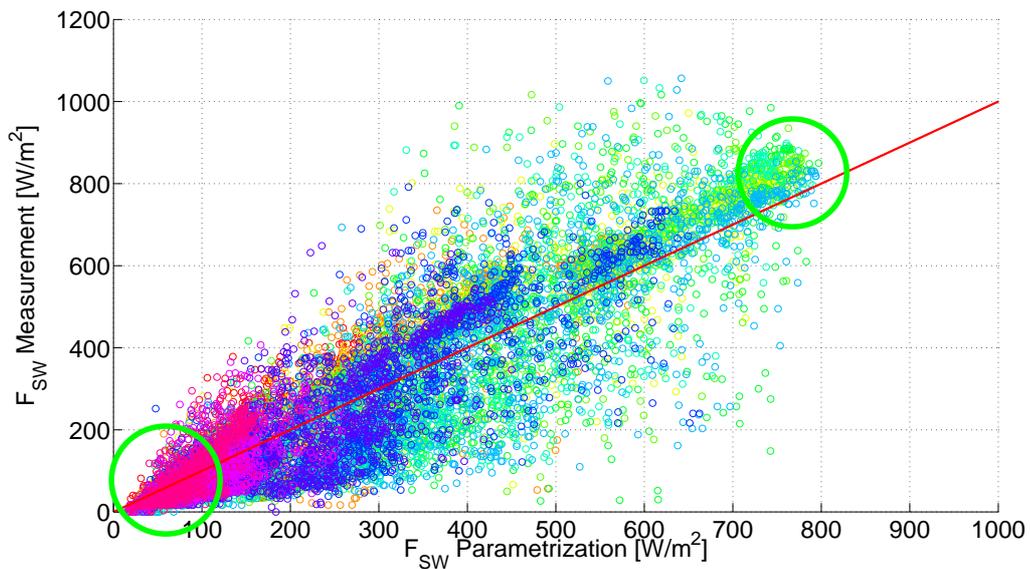


Abbildung 5.7: Vergleich zwischen der nach der mSP_0 berechneten und gemessenen solaren Einstrahlung. Verschiedene Farben stehen für verschiedene Monate.

Die modifizierten Koeffizienten wurden so gewählt, dass die mittlere Differenz zwischen Messung und Berechnung 0 W/m^2 beträgt. Die Standardabweichung wurde im Vergleich zur oSP um mehr als 15 W/m^2 auf 102.01 W/m^2 reduziert. Die Korrelation mit Tagesgang ist von 0.875 auf 0.91 gestiegen. Allerdings ist im Gegensatz dazu die Korrelation ohne Tagesgang sowohl beim laufenden Mittel über eine als auch über zwei Stunden um ca. 0.4 gesunken. Die vom Tagesgang unabhängige Variabilität kann also durch die modifizierte nicht so gut wiedergegeben werden wie durch die original Schewski Parametrisierung. In Abbildung 5.8 sind wieder die vier Beispieltage dargestellt. Die roten Linien in den linken Bildern geben die Berechnung und die Differenz zwischen Berechnung und Messung mit der mSP_0 an.

Für den 8. Juli in Abbildung 5.8 (a) stimmt die mit der mSP_0 berechneten Kurve gut mit der gemessenen überein. Die Unterschätzung der Messwerte ist im Vergleich zur oSP deutlich geringer. Die starken Peaks in den Messungen werden zwar auch nicht erreicht, aber sie werden ein bißchen besser wiedergegeben als von der vorhergehenden Parametrisierung.

Am 27. Juli (Abbildung 5.8 (b)) zeigt die neue Version ebenfalls bessere Ergebnisse als die alte. Die modifizierte SP_0 kann allerdings auch hier den Bereich zwischen 8 und 11 Uhr, in dem acht Achtel Bewölkung herrschte, nicht gut wiedergeben. Hier werden die Messwerte stark überschätzt. In den restlichen Bereichen stimmt die Kurve der Parametrisierung besser mit der der Messwerten überein.

Für den durchgehend bewölkten Fall vom 5. Februar in Abbildung 5.8 (c) passt der Verlauf der parametrisierten Kurve deutlich besser zu den Messwerten als für die oSP, allerdings überschätzt die Parametrisierung die Messung besonders für den Zeitraum nach 12

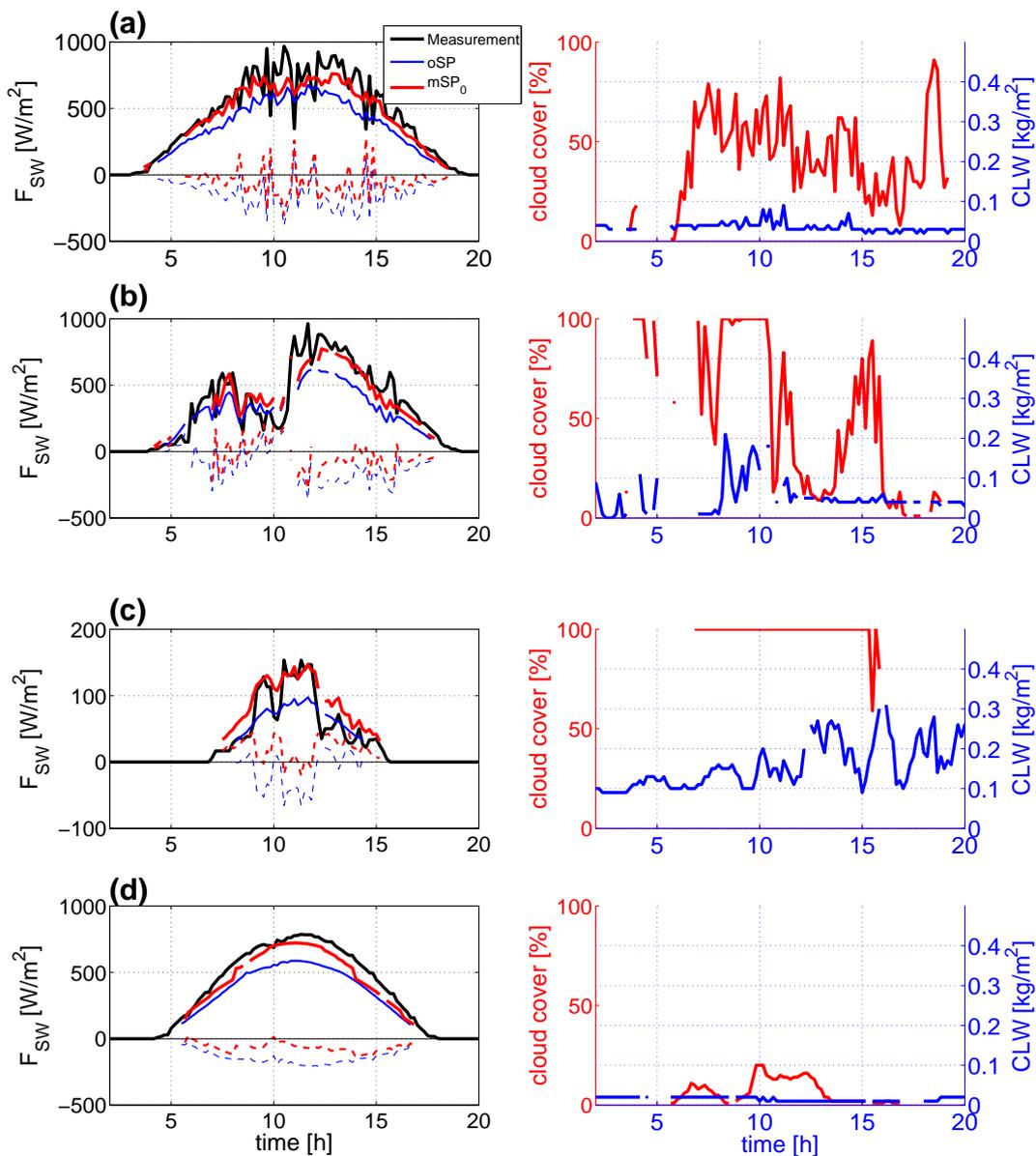


Abbildung 5.8: 8. (a) und 27. (b) Juli, 5. Februar (c) und 16. April (d) 2007; links: Messwerte und Parametrisierungen für die solare Einstrahlung (durchgezogene Linie) und deren Differenzen (gestrichelte Linie), die roten Linien stehen für die mSP_0 ; rechts: Bedeckungsgrad in % und CLW in kg/m^2

Uhr, wo das CLW deutlich höher ist als am Vormittag. Diese Überschätzung ist auch um 10 Uhr zu sehen. Auch dort steigt das CLW kurz an und die solare Einstrahlung hat an dieser Stelle dementsprechend ein Minimum. Die Parametrisierung zeigt einen glatteren Kurvenverlauf an dieser Stelle und kann das Minimum nicht erreichen.

In Abbildung 5.8 (d), in der der fast wolkenfreie 16. April gezeigt ist, liegt die Parametrisierung weiterhin deutlich unter der Messung. Im Vergleich zur oSP ist die Differenz

allerdings auf ungefähr ein Drittel gesunken.

In der statistischen Auswertung der mSP_0 in Tabelle 5.4 für die vier Beispieltage bestätigt sich das, was in den Bildern schon zu erkennen war.

Am 8. Juli wurde die Differenz im Vergleich zur oSP auf fast ein Drittel verringert auf -47.81 W/m^2 . Die Standardabweichung ist auf 107.07 W/m^2 gesunken. Die Korrelation mit Tagesgang hat sich minimal auf 0.853 verbessert. Deutlicher verbessert hat sich die Korrelation ohne Tagesgang bei einem laufenden Mittel über eine Stunde. Sie ist durch die Modifikation von 0.693 für die oSP auf 0.715 gestiegen. $Korr_{oT60}$ ist mit 0.647 um 0.012 kleiner als für die oSP.

Für den 27. Juli wurde die mittlere Differenz um mehr als 70 W/m^2 auf -28.7 W/m^2 verringert. Die Standardabweichung beträgt nur noch 110.05 W/m^2 . Damit ist sie mehr als 15 W/m^2 kleiner als bei der oSP. Die Korrelation mit Tagesgang wurde durch die Modifikation auf 0.9 erhöht. $Korr_{oT30}$ und $korr_{oT60}$ sind in etwa so groß wie für die oSP. Die Korrelation mit Tagesgang ist für den vollkommen bedeckten Tag am 5. Februar minimal besser als bei der original Parametrisierung und beträgt jetzt 0.89. Die Differenz zwischen Messung und Berechnung ist mit 19.59 W/m^2 aber betragsmäßig deutlich größer als für die oSP. Die Standardabweichung ist kleiner geworden und beträgt nur noch 16.99 W/m^2 . $Korr_{oT30}$ und $korr_{oT60}$ sind wesentlich verbessert worden durch die Anpassung der Koeffizienten. Sie wurden um 0.168 beziehungsweise 0.156 auf 0.778 und 0.766 erhöht. Die Schwankungen in der solaren Einstrahlung am Boden, die durch den Einfluss der Wolken entstehen, können also durch die modifizierte SP besser wiedergegeben werden als durch die originale.

| Tag | $\overline{\Delta Q} [\text{W/m}^2]$ | $\sigma [\text{W/m}^2]$ | $korr_{mT}$ | $korr_{oT30}$ | $korr_{oT60}$ |
|----------------------------|--------------------------------------|-------------------------|-------------|---------------|---------------|
| 8.7., schnell wechs. Bew. | -47.81 | 107.07 | 0.853 | 0.715 | 0.647 |
| 27.7., langsam wechs. Bew. | -28.7 | 110.05 | 0.9 | 0.747 | 0.685 |
| 5.2., komplett bedeckt | 19.59 | 16.99 | 0.89 | 0.778 | 0.766 |
| 16.4., fast wolkenfrei | -64.77 | 32.91 | 0.946 | 0.578 | 0.648 |

Tabelle 5.4: Statistische Auswertung der mSP_0 für die Tage 8. und 27. Juli, 5. Februar und 16. April 2007 mit dem Mittelwert der Differenzen zwischen Parametrisierung und Messung ($\overline{\Delta Q}$), deren Standardabweichung (σ) und den Rangkorrelationen nach Spearman mit und ohne Tagesgang

Der fast unbewölkte Fall am 16. April wird in Abbildung 5.8 (d) dargestellt. Die mittlere Differenz und die Standardabweichung sind deutlich geringer im Vergleich zur original Schewski Parameterisierung. Die Korrelation mit Tagesgang beträgt aber nur 0.946. Die Korrelationen ohne Tagesgang sind ebenfalls etwas niedriger. Sie sind mit 0.578 für $korr_{oT30}$ und 0.648 für $korr_{oT60}$ deutlich kleiner als in den anderen drei Fällen. An dem wolkenlosen Tag gibt es zwar nur geringe Schwankungen in der Einstrahlungskurve, aber die Parametrisierung ist nicht in der Lage diese zu berechnen.

Insgesamt ergab sich durch die Anpassung der Koeffizienten eine deutliche Verbesserung. Die mittlere Differenz wurde auf 0 W/m^2 gesetzt, die Standardabweichung redu-

ziert und die Korrelation mit Tagesgang erhöht. Nur die Korrelationen ohne Tagesgang sind geringer geworden. Auch für die vier Beispieltage sind fast alle statistischen Parameter durch die Verwendung der neuen Koeffizienten im Vergleich zur original Schewski Parametrisierung verbessert worden.

Um eine bessere Parametrisierung insbesondere für den wolkenfreien Fall zu erhalten wird im nächsten Kapitel die Konstante a durch die Parametrisierung nach Zillman ersetzt.

5.3 Modifizierte SP mit Zillman für den unbewölkten Fall

Nach Einsetzen der Parametrisierung nach Zillman in die Schewski Parametrisierung ergibt sich folgende Gleichung:

$$F = Q_{SW}(0) + \left(\sum_{j=1}^n b_j \sqrt{C_j} + c_j C_j + d_j C_j^2 \right) \cdot F_{TOA}. \quad (5.3)$$

$Q_{SW}(0)$ wird nach Zillman berechnet:

$$Q_{SW}(0) = \frac{S_0 \cdot \cos \theta^2}{(\cos \theta + 1.5)p_W 10^{-3} + 1.14 \cdot \cos \theta + 0.08}. \quad (5.4)$$

Die hier verwendeten Koeffizienten in der Parametrisierung nach Zillman für den wolkenfreien Fall wurden von John Kalisch berechnet. Die übrigen Koeffizienten b_j , c_j und d_j wurden wieder so an den Datensatz von 2007 angepasst, dass die mittlere Differenz zwischen Berechnung und Messung 0 W/m^2 beträgt, die Standardabweichung möglichst klein und die Korrelation mit Tagesgang möglichst hoch ist. Diese Parametrisierung wird im folgenden Text mit $mSPZ_0$ bezeichnet.

Abbildung 5.9 zeigt die mit der $mSPZ_0$ berechneten im Vergleich zur gemessenen solaren Einstrahlung. Die meisten Punkte liegen nahe bei der roten Gerade, die angibt, wo Messwerte und Berechnung gleich sind. Sowohl hohe als auch niedrige solare Einstrahlung kann von der Parametrisierung gut bestimmt werden.

Die statistische Auswertung der $mSPZ_0$ zeigt Tabelle 5.5. Die mittlere Differenz wurde durch die Wahl der Koeffizienten auf null gesetzt. Die Standardabweichung ist fast genauso groß wie für die mSP_0 . Sie beträgt 102.04 W/m^2 . Die Korrelation mit Tagesgang zwischen Messung und Berechnung ergibt 0.9. Damit ist sie deutlich höher als für die original Schewski Parametrisierung, aber niedriger als für die modifizierte Version. $Korr_{oT30}$ und $korr_{oT60}$ sind mit 0.748 und 0.718 in dem Bereich der mSP_0 . Die Variabilität in der solaren Einstrahlung, die nicht durch den Tagesgang sondern durch Wolken verursacht wird, kann demzufolge am besten von der oSP reproduziert werden. Allerdings hat diese Parametrisierung eine Tendenz zur Unterschätzung der Messwerte, die höchste Standardabweichung und die niedrigste Korrelation mit Tagesgang. Unter Berücksichtigung aller statistischen Parameter sind die modifizierten Parametrisierungen besser geeignet um die solare Einstrahlung, die durch die Atmosphäre hindurchgeht, zu ermitteln.

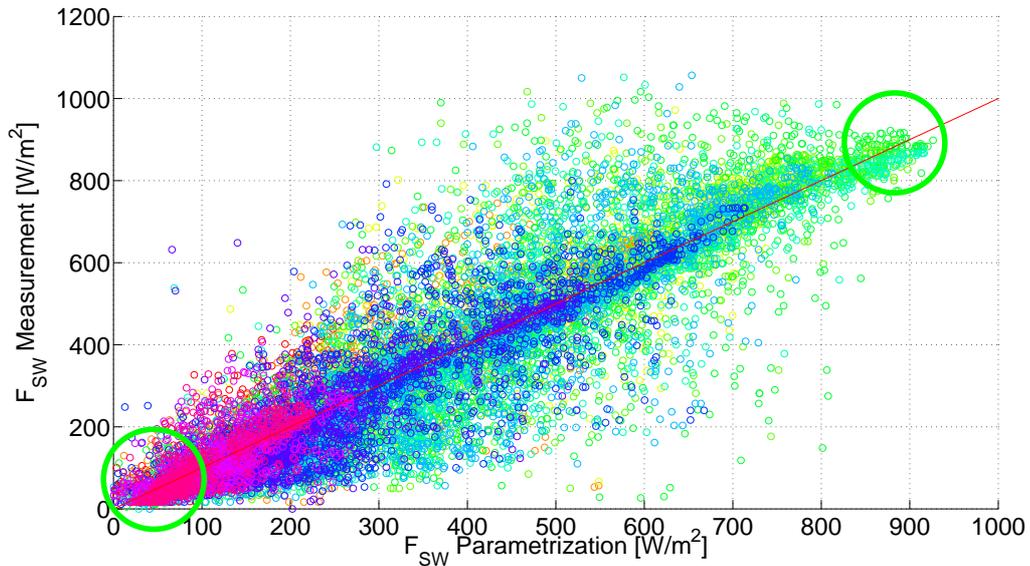


Abbildung 5.9: Vergleich zwischen der nach der $mSPZ_0$ berechneten und gemessenen solaren Einstrahlung. Verschiedene Farben stehen für verschiedene Monate.

| Parametrisierung | $\overline{\Delta Q}$ [W/m^2] | σ [W/m^2] | $korr_{mT}$ | $korr_{oT30}$ | $korr_{oT60}$ |
|------------------|-----------------------------------|----------------------|-------------|---------------|---------------|
| oSP | -68.18 | 117.49 | 0.875 | 0.786 | 0.754 |
| mSP_0 | 0 | 102.01 | 0.91 | 0.743 | 0.717 |
| $mSPZ_0$ | 0 | 102.04 | 0.9 | 0.748 | 0.718 |

Tabelle 5.5: Statistische Auswertung der mSP_0 mit dem Mittelwert der Differenzen zwischen Parametrisierung und Messung ($\overline{\Delta Q}$), deren Standardabweichung (σ) und den Rangkorrelationen nach Spearman mit und ohne Tagesgang

Die vier Beispieltage sind in Abbildung 5.10 gezeigt. Die durchgezogenen grünen Linien repräsentieren die solare Einstrahlung parametrisiert nach der $mSPZ_0$. Die gestrichelten grünen Linien zeigen die Differenzen zwischen der $mSPZ_0$ und den Messungen.

Für den Fall der durchbrochenen Bewölkung am 8. Juli in Abbildung 5.10 (a) passt die $mSPZ_0$ im Mittel gut zu der gemessenen Kurve. Allerdings sind auch hier, wie schon bei den anderen beiden Parametrisierungen, die Variabilitäten in der kurzwelligen Einstrahlung wesentlich schwächer ausgeprägt als es bei den Messungen tatsächlich der Fall ist. Um diese Schwankungen besser darstellen zu können, müsste der Einfluss des Bedeckungsgrads auf die Einstrahlung in der Parametrisierung erhöht werden. Um weiterhin eine mittlere Differenz von $0 W/m^2$ zu haben müsste aber gleichzeitig der Einfluss des CLWs verringert werden. Das würde an Tagen mit gleichmäßiger Bedeckung aber variierendem CLW zu schlechteren Ergebnissen führen.

Der 27. Juli ist in Abbildung 5.10 (b) gezeigt. Die Parametrisierung folgt grob dem Verlauf der Messkurve, aber die kleinen Variabilitäten können auch hier nicht wiedergegeben

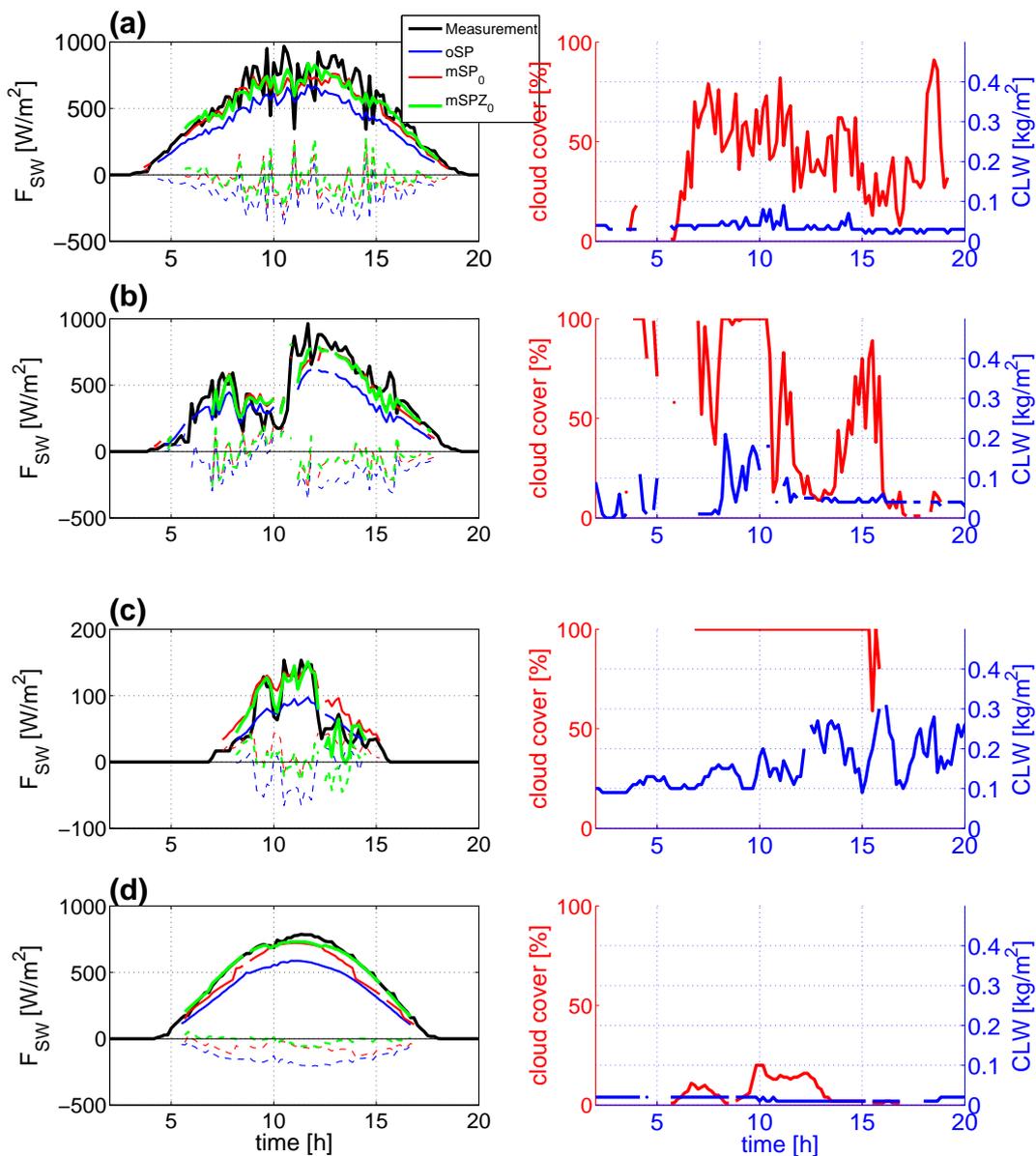


Abbildung 5.10: 8. (a) und 27. (b) Juli, 5. Februar (c) und 16. April (d) 2007; links: Messwerte und Parametrisierungen für die solare Einstrahlung (durchgezogene Linie) und deren Differenzen (gestrichelte Linie), die grünen Linien stehen für die $mSPZ_0$; rechts: Bedeckungsgrad in % und CLW in kg/m^2

werden. In der Zeit zwischen 8 und 11 Uhr bei komplett bedecktem Himmel überschätzt die $mSPZ_0$ ebenso wie die anderen Parametrisierungen die Messung. Allerdings ist diese Überschätzung etwas geringer als für die mSP_0 .

Am vollständig bedeckten 5. Februar in Abbildung 5.10 (c) ist die Differenz zwischen den Messwerten und der Berechnungen durch die Hinzunahme der Parametrisierung für

den wolkenfreien Fall deutlich geringer geworden. Während der ersten Hälfte des Tages passen die Verläufe der Kurven für die Messung und die $mSPZ_0$ sehr gut zusammen. Nachmittags gibt es mit steigendem CLW allerdings deutliche Unterschätzungen durch die Parametrisierung.

Auch für den wolkenfreien Fall am 16. April ergibt sich durch die $mSPZ_0$ eine Reduzierung der Differenz zwischen gemessener und parametrisierter solarer Einstrahlung. Allerdings verläuft die grüne Kurve sehr glatt, während die Messung viele kleine Schwankungen aufweist. Die Korrelation ist dadurch wieder etwas schlechter geworden.

| Tag | $\overline{\Delta Q} [W/m^2]$ | $\sigma [W/m^2]$ | $korr_{mT}$ | $korr_{oT30}$ | $korr_{oT60}$ |
|----------------------------|-------------------------------|------------------|-------------|---------------|---------------|
| 8.7., schnell wechs. Bew. | -34.28 | 111.19 | 0.84 | 0.702 | 0.647 |
| 27.7., langsam wechs. Bew. | -25.85 | 112.82 | 0.853 | 0.778 | 0.799 |
| 5.2., komplett bedeckt | -1.21 | 21.2 | 0.784 | 0.598 | 0.683 |
| 16.4., fast wolkenfrei | -11.57 | 24.77 | 0.967 | 0.661 | 0.724 |

Tabelle 5.6: Statistische Auswertung der $mSPZ_0$ für die Tage 8. und 27. Juli, 5. Februar und 16. April 2007 mit dem Mittelwert der Differenzen zwischen Parametrisierung und Messung ($\overline{\Delta Q}$), deren Standardabweichung (σ) und den Rangkorrelationen nach Spearman mit und ohne Tagesgang

Was in den Abbildungen 5.10 (a) bis (d) zu erkennen ist wird in der statistischen Auswertung in Tabelle 5.6 zusammengefasst.

Am 8. Juli verringert sich die Differenz im Vergleich zur mSP_0 noch einmal um $13 W/m^2$ auf $-34.28 W/m^2$. Die Standardabweichung verschlechtert sich hingegen auf $111.19 W/m^2$. Damit ist sie zwar besser als für oSP, aber schlechter als die mSP_0 . $korr_{mT}$ ist mit 0.84 für die Schewski Parametrisierung mit Zillman am niedrigsten. Der Unterschied zu den anderen beiden ist aber nur maximal 0.01. Die Korrelationen ohne Tagesgang betragen 0.702 für das einstündige und 0.644 für das zweistündige Mittel. Damit liegt $korr_{oT30}$ ziemlich genau zwischen den Korrelationen für die oSP (0.693) und die mSP_0 (0.715). Für das zweistündige Mittel erreicht die Korrelation den schlechtesten Wert von allen drei Parametrisierungen. Durch die Hinzunahme der Parametrisierung nach Zillman wurde in dem Fall mit schnell wechselnder Bewölkung die mittlere Differenz verringert und die Korrelation mit Tagesgang verschlechtert. Die Variabilitäten, die nicht durch den Tagesgang verursacht werden, können auch nicht so gut wiedergegeben werden wie von der mSP_0 .

Ein anderes Bild zeigt sich für den 27. Juli. Dort liefert die $mSPZ_0$ die besten Korrelationen ohne Tagesgang mit $korr_{oT30} = 0.778$ und $korr_{oT60} = 0.799$. Auch die mittlere Differenz wurde verbessert. Sie beträgt $-25.85 W/m^2$. Im Vergleich zur original Schewski Parametrisierung ist die Differenz um einen Faktor von 5 kleiner geworden. Die Standardabweichung ist ca. $3 W/m^2$ größer als für die mSP_0 und die Korrelation mit Tagesgang 0.05 kleiner.

Für den 5. Februar wurde durch die Hinzunahme der Parametrisierung nach Zillman zwar die mittlere Differenz auf $-1.21 W/m^2$ reduziert, alle anderen statistischen Para-

meter sind aber schlechter geworden. $Korr_{mT}$ und $korr_{oT30}$ sind mit 0.784 und 0.598 sogar niedriger als für die oSP.

Da die Koeffizienten für die Parametrisierung nach Zillman exta für den wolkenfreien Himmel berechnet wurden, müsste sich eine deutlich Verbesserung in der Statistik für den 16. April zeigen. Dies ist auch zumindest bei der Betrachtung der mittleren Differenz und der Standardabweichung der Fall. Die Koeffizienten für die Zillman Parametrisierung wurden so ausgewählt, dass Differenz und Standardabweichung möglichst gering sind. Dass die mittlere Differenz trotzdem noch -11.57 W/m^2 beträgt, liegt daran, dass es nicht den ganzen Tag durchgehend wolkenfrei war. Die Korrelation mit Tagesgang liegt mit 0.967 etwa in der Größenordnung von der oSP. Die Korrelationen ohne Tagesgang wurden im Vergleich zu den beiden anderen Parametrisierungen deutlich verbessert. Sie betragen 0.661 beziehungsweise 0.724.

Durch das Einsetzen der Zillman Parametrisierung ergab sich keine deutliche Verbesserung im Vergleich zur mSP_0 . Die Korrelation mit Tagesgang wurde deutlich verschlechtert. Die Standardabweichung und die Korrelationen ohne Tagesgang sind in etwa gleich geblieben. Auch für die Beispieltage kann keine eindeutige Aussage darüber getroffen werden, welche der beiden modifizierten Versionen die bessere ist.

5.4 Vergleich der drei Parametrisierungen

Im vorigen Kapitel wurde gezeigt, dass die Parametrisierungen für verschiedene Wetterlagen unterschiedlich gut sind. Deshalb wird in diesem Kapitel die Abhängigkeit der drei Varianten der Schewski Parametrisierung vom Bedeckungsgrad, vom CLW und vom Sonnenzenitwinkel untersucht. Um die unterschiedlichen Bedeckungsgrade vergleichen zu können, wurden sie in neun Klassen von null bis acht Achtel Bedeckung eingeteilt. Die CLWs wurden in 0.05 kg/m^2 Schritten von 0 kg/m^2 bis 0.35 kg/m^2 unterteilt. Die entsprechenden statistischen Auswertungen sind im Anhang zu finden.

In Abbildung 5.11 sind die statistischen Eigenschaften Korrelation, mittlere Differenz und Standardabweichung der Parametrisierungen in Abhängigkeit des Bedeckungsgrads dargestellt. Die oSP wird durch die blauen, die mSP_0 durch die roten und die $mSPZ_0$ durch die grünen Linien repräsentiert. Die gestrichelten Linien geben die Mittelwerte der jeweiligen Größe und Parametrisierung an.

Zunächst soll die Korrelation zwischen Messung und Berechnung in Abhängigkeit des Bedeckungsgrades in Abbildung 5.11 (a) betrachtet werden. Der Verlauf der Kurven ist für alle drei Parametrisierungen ähnlich. Die beste Korrelation ergibt sich für wolkenfreien Himmel. In diesem Fall wird die solare Einstrahlung nicht durch Wolken beeinflusst und die Korrelation ist dementsprechend hoch mit 0.993 für die modifizierten Versionen und die anderen Parametrisierungen knapp darunter. Bis hin zu sieben Achteln nimmt die Korrelation stetig ab. Die mSP_0 liegt dabei immer über den beiden anderen. Die oSP ergibt für alle Bedeckungsgrade die schlechteste Korrelation zwischen Messwerten und Berechnungen mit Ausnahme von zwei Achteln. Bei allen drei Parametrisierungen ist das Minimum der Korrelation bei sieben Achtel Bedeckungsgrad. Das liegt daran, dass die

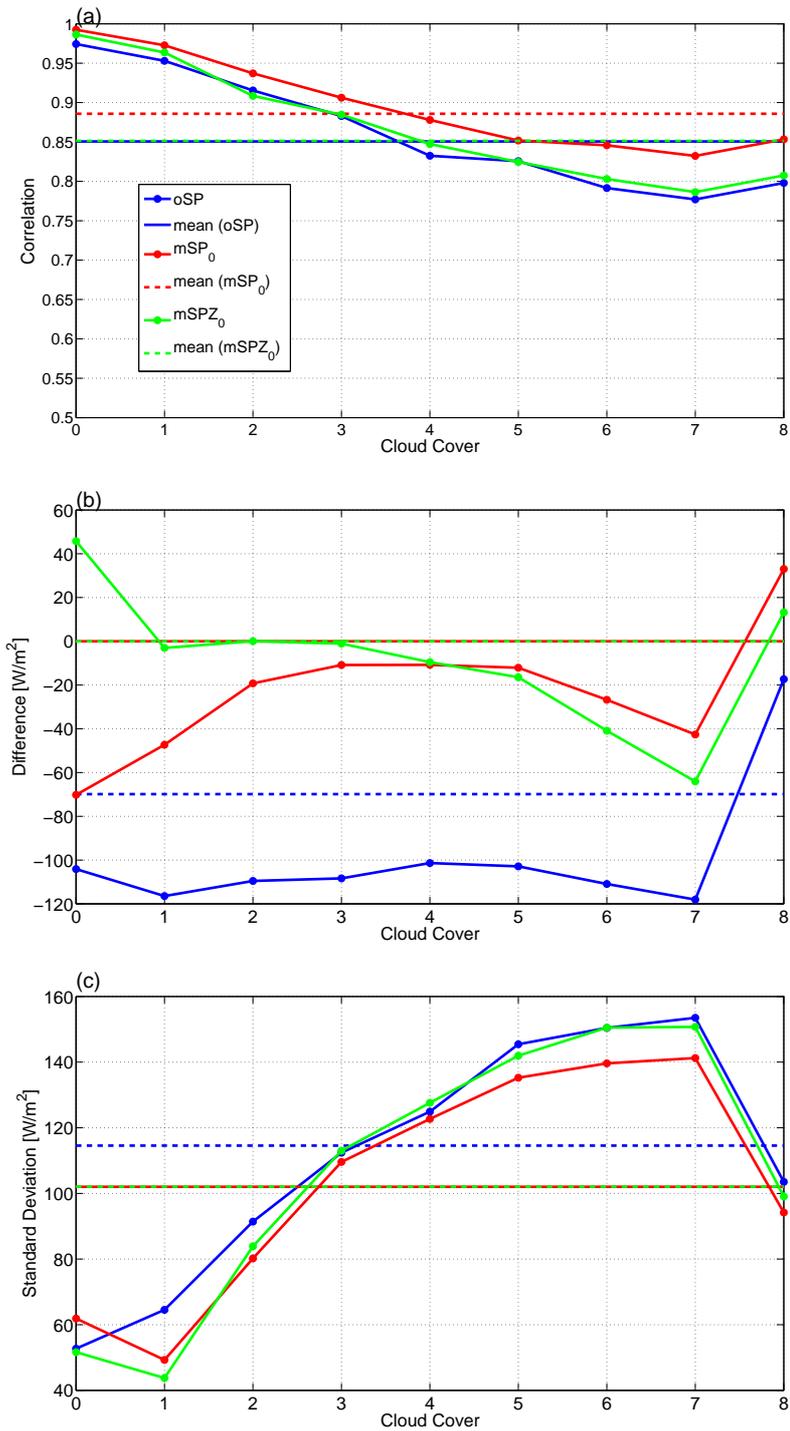


Abbildung 5.11: Korrelation (a), Differenz zwischen Parametrisierung und Messung (b) und Standardabweichung (c) und deren Mittelwerte (gestrichelte Linien) für die oSP, die mSP₀ und die mSPZ₀ in Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad

solare Einstrahlung bei durchbrochener Bewölkung stärker variiert, die Parametrisierungen den plötzlichen Schwankungen aber nicht folgen können. Bei vollständig bedecktem Himmel ist die Korrelation wieder etwas größer. Dort treten nicht mehr so viele plötzliche Schwankungen auf, weil die Wolkendecke annähernd homogen ist.

Im Mittel ist die Korrelation für die mSP_0 mit 0.886 am größten, gefolgt von der für die $mSPZ_0$ mit 0.852. Die niedrigste Korrelation ergibt sich für die oSP mit 0.851.

In Abbildung 5.11 (b) sind die Differenzen zwischen den Parametrisierungen und den Messungen gezeigt. Für die oSP sind die Differenzen für alle Bedeckungsgrade negativ. Das heißt, die Berechnungen unterschätzen die Messwerte. Für null bis sieben Achtel bleiben die Differenzen relativ konstant zwischen -100 W/m^2 und -120 W/m^2 . Für acht Achtel ist der Unterschied zwischen Parametrisierung und Messung wesentlich kleiner mit -17 W/m^2 . Das könnte daran liegen, dass die oSP auf Modelldaten beruht, in denen häufig komplette Bedeckung auftritt. Im Mittel liegt die Differenz bei -68.18 W/m^2 . Für die mSP_0 ist die mittlere Differenz durch die Wahl der Koeffizienten auf null gesetzt. Sie sinkt für null bis vier Achtel von -70.21 W/m^2 auf -10.08 W/m^2 und steigt dann bis sieben Achtel wieder auf -42.61 W/m^2 an. Für acht Achtel überschätzt die Parametrisierung die Messung. Die $mSPZ_0$ überschätzt die Messung für Bedeckungsgrade von null, zwei und acht Achtel. Ansonsten unterschätzt sie die Messwerte insbesondere bei sechs und sieben Achteln Bedeckung. Der Mittelwert der Differenzen wurde auch hier auf null gesetzt.

Die Standardabweichung in Abbildung 5.11 (c) ist für jede der drei Parametrisierungen bei nahezu wolkenfreien Bedingungen am geringsten. Sie liegt zwischen 43 W/m^2 für die $mSPZ_0$ und 65 W/m^2 für die oSP bei einem Achtel Bedeckungsgrad. Danach steigt sie stetig an. Bei sieben Achteln Bedeckungsgrad ist sie am größten und liegt für die mSP_0 bei etwa 141 W/m^2 . Für die anderen beiden Parametrisierungen liegt sie etwas darüber. Dass die Standardabweichung für größere Bedeckungsgrade größer wird, liegt daran, dass die solare Einstrahlung am Boden mit steigender Bewölkung stärker variiert. Für komplett bedeckten Himmel wird die Standardabweichung wieder kleiner, weil die Einstrahlung durch die annähernd homogene Bewölkung weniger so stark variiert. Im Mittel zeigt die mSP_0 mit 102.01 W/m^2 die geringste Standardabweichung, gefolgt von der $mSPZ_0$ mit 102.04 W/m^2 . Für die oSP beträgt die mittlere Standardabweichung 117.49 W/m^2 und ist somit am größten.

Die Schewski Parametrisierung verwendet außer dem Bedeckungsgrad noch das Wolkenflüssigwasser. In Abbildung 5.12 ist die Korrelation (a), die Differenz (b) zwischen Messung und Parametrisierung und die Standardabweichung (c) in Abhängigkeit vom CLW gezeigt.

Für CLW Werte nahe 0 kg/m^2 ist die Korrelation zwischen Messung und Parametrisierung fast 1. Für die modifizierte SP ist sie mit 0.993 am höchsten. Auch für alle anderen CLWs ist die Korrelation für diese Version höher als für die anderen beiden. Im Mittel liegt sie bei 0.89. Für die original Schewski Parametrisierung ergibt sich der zweithöchste Mittelwert mit 0.853. Die Korrelation ist für alle CLWs größer als 0.8 außer für die höchsten erreichten Werte bei ca. 0.35 kg/m^2 . Dort fällt sie stark ab auf nur 0.633. Allerdings gehen in die Berechnung der Korrelation für 0.35 kg/m^2 auch nur 22 Werte ein. Die Kor-

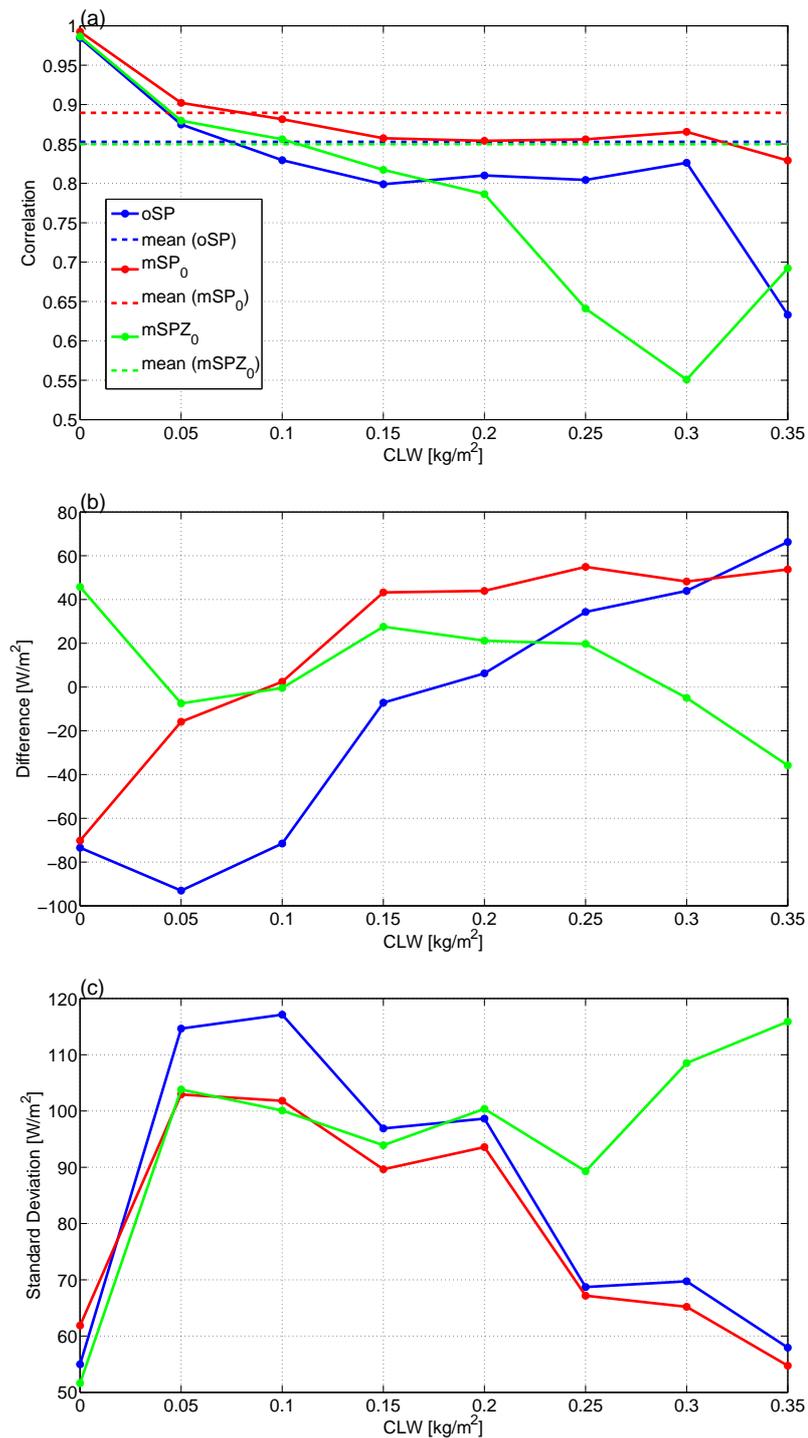


Abbildung 5.12: Korrelation (a), Differenz zwischen Parametrisierung und Messung (b) und Standardabweichung (c) und deren Mittelwerte (gestrichelte Linien) für die oSP, die mSP₀ und die mSPZ₀ in Abhängigkeit vom CLW

relationskurve für die $mSPZ_0$ verläuft bis zu einem CLW von 0.2 kg/m^2 ähnlich wie die beiden anderen. Sie liegt zwischen 0.786 und 0.986. Für größere CLW scheint diese Parametrisierung allerdings nicht geeignet zu sein. Die Korrelation zwischen Messwerten und Berechnungen liegt für CLWs größer als 0.2 kg/m^2 unter 0.7.

Die Differenzen zwischen Messung und Parametrisierung in Abbildung 5.12 (b) sind für die oSP bis 0.15 kg/m^2 negativ und für größere CLWs positiv. Die betragsmäßig größten Differenzen ergeben sich für CLWs zwischen 0 kg/m^2 und 0.15 kg/m^2 . Bei niedrigen CLW Werte sind auch nur wenig oder dünne Wolken vorhanden. Die Parametrisierungen von Schewski wurde aber mit Hilfe von Stratocumulus und Cumuluswolken erstellt. Diese enthalten viel Flüssigwasser. Deshalb funktioniert die oSP bei hohen CLWs besser als bei niedrigen. Die modifizierte Version unterschätzt die Messung für CLWs bis 0.05 kg/m^2 . Für $CLW = 0.1 \text{ kg/m}^2$ ist die Differenz fast 0 W/m^2 und für größere CLWs relativ konstant zwischen 40 W/m^2 und 60 W/m^2 . Die meisten Messwerten lagen zwischen 0.05 und 0.1 kg/m^2 . In diesem Bereich liegt die modifizierte SP und auch die $mSPZ_0$ wesentlich näher an den Messwerten als das Original. Durch die Zunahme der Zillman Parametrisierung für den unbewölkten Fall kommt es nun zu einer Überschätzung der Messung bei $CLW = 0 \text{ kg/m}^2$. Diese ist mit 45 W/m^2 aber deutlich kleiner als die Unterschätzung der beiden anderen Parametrisierungen. Ein weiterer Unterschied zu den ersten beiden Versionen ist, dass die $mSPZ_0$ die Messungen für CLWs größer als 0.25 kg/m^2 unterschätzt.

Die Kurven der Standardabweichungen für die original und die modifizierte SP verlaufen sehr ähnlich. Die größten Standardabweichungen von über 95 W/m^2 ergeben sich für CLWs zwischen 0.05 kg/m^2 und 0.2 kg/m^2 . Das sind meist Fälle durchbrochener Bewölkung und infolge dessen stark variierender solarer Einstrahlung. Diese Variationen können von den Parametrisierungen nicht so gut wiedergegeben werden. Für den wolkenfreien Fall bei $CLW = 0 \text{ kg/m}^2$ und die stark bewölkten Szenarien mit CLWs über 0.2 kg/m^2 sind die Standardabweichungen deutlich niedriger. Die mSP_0 weist für fast alle Fälle eine niedrigere Standardabweichung auf als die oSP . Für die $mSPZ_0$ ist die Standardabweichung auch für große CLWs höher als 90 W/m^2 , weil diese Parametrisierung eher auf geringe Bewölkung abgestimmt ist.

Die solare Einstrahlung am Boden hängt außer vom Bedeckungsgrad und einigen anderen Größen auch noch vom Sonnenzenitwinkel θ ab. Ist der Sonnenzenitwinkel klein, so muss die Sonnenstrahlung einen kürzeren Weg durch die Atmosphäre zurücklegen als bei großen Sonnenzenitwinkeln. Daher kann sie bei niedrigen Sonnenständen, also hohen Zenitwinkeln, stärker durch die Wolken beeinflusst werden.

In Abbildung 5.13 (a) ist die Korrelation zwischen Messung und Berechnung in Abhängigkeit des Zenitwinkels für alle drei Parametrisierungen gezeigt. In allen Fällen ist die Korrelation für $\theta = 30^\circ$ am niedrigsten. Sie liegt dort zwischen 0.71 und 0.76. Dies ist der maximal erreichte Sonnenstand und demzufolge der Umkehrpunkt in der Kurve der solaren Einstrahlung, wenn keine Wolken vorhanden sind. Deshalb kommt es hier manchmal zu gegensätzlichen Verläufen der Messkurve und der Berechnung und somit zu einer niedrigeren Korrelation als bei größeren Sonnenzenitwinkeln. Bis $\theta = 70^\circ$ steigen die Korrelationen für alle drei Parametrisierungen an, wobei die mSP_0 und die

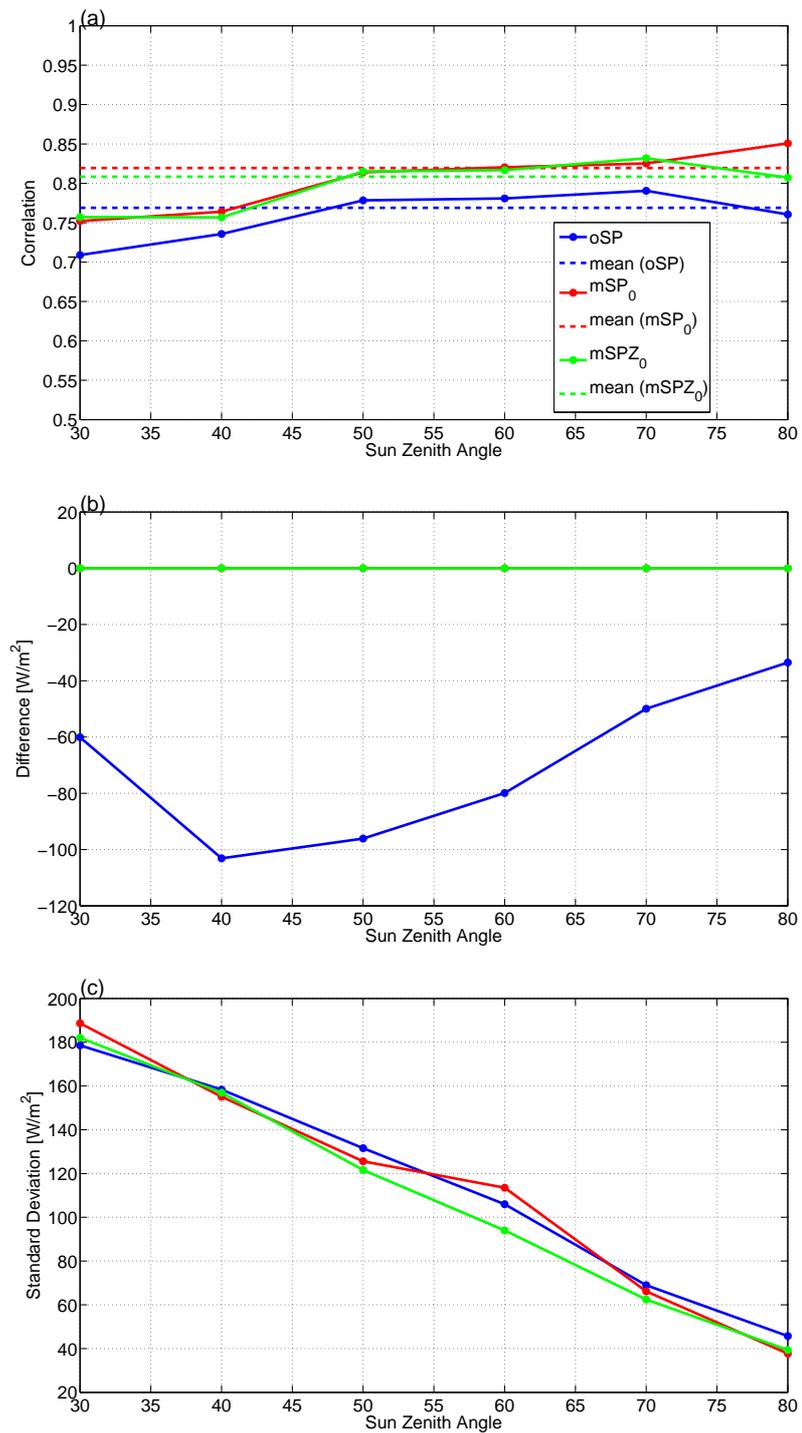


Abbildung 5.13: Korrelation (a), Differenz zwischen Parametrisierung und Messung (b) und Standardabweichung (c) und deren Mittelwerte (gestrichelte Linien) für die oSP, die mSP₀ und die mSPZ₀ in Abhängigkeit vom Sonnenzenitwinkel

$mSPZ_0$ stets besser mit den Messungen korreliert ist als die Originalversion. Bei $\theta = 80^\circ$ sinken die oSP und die $mSPZ_0$ wieder etwas ab und haben nur noch Korrelationen von 0.761 beziehungsweise 0.807. Für die mSP_0 erreicht die Korrelation ihr Maximum bei $\theta = 80^\circ$ mit 0.851. Im Mittel liegt die Korrelation für die mSP_0 mit 0.82 deutlich über denen für die anderen beiden Parametrisierungen. Sie betragen nur 0.808 für $mSPZ_0$ und 0.768 für die oSP.

Die Differenz zwischen Messwerten und Berechnungen nimmt für die oSP kontinuierlich für steigende Sonnenzenitwinkel ab. Eine Ausnahme bildet dabei nur die Differenz bei $\theta = 30^\circ$. Bei allen anderen Parametrisierung wurden die Koeffizienten so gewählt, dass die mittlere Differenz für jeden Sonnenzenitwinkel 0 W/m^2 beträgt.

Die Standardabweichung nimmt kontinuierlich für alle drei Parametrisierungen mit wachsendem Zenitwinkel ab.

Die Korrelation, Differenz und Standardabweichung in Abhängigkeit von Bedeckungsgrad, CLW und Sonnenzenitwinkel wurde durch die Verwendung der modifizierten Parametrisierung deutlich verbessert. Durch die Hinzunahme der Parametrisierung nach Zillman wurde nur die Korrelation in Abhängigkeit vom Sonnenzenitwinkel merklich verbessert. Die Differenz wurde für jeden Sonnenzenitwinkel auf null gesetzt. Die Standardabweichung wurde für beide neuen Versionen verringert.

In diesem Kapitel wurde gezeigt, dass durch die Anpassung der Koeffizienten an den Datensatz eine Verbesserung der Parametrisierung erzielt wurde. Nun muss noch untersucht werden, ob die modifizierten Schewski Parametrisierungen auch bei unabhängigen Daten bessere Ergebnisse liefern als das Original.

5.5 Anwendung auf unabhängige Daten

Zunächst werden die Daten aus Lindenberg für Januar bis September 2006 betrachtet. In Abbildung 5.14 ist der Vergleich zwischen der gemessenen und berechneten solaren Einstrahlung am Boden in W/m^2 für alle drei Parametrisierungen abgebildet. Die unterschiedlichen Farben stehen für verschiedene Monate von rot für Januar bis magenta für September. In Tabelle 5.7 ist die statistische Auswertung der drei Parametrisierungen angegeben.

Abbildung 5.14 (a) zeigt die oSP aufgetragen gegen die Messwerte der kurzwelligen Strahlung. Wie schon für die Daten aus Lindenberg von 2007 (siehe Abbildung 5.2) liegen die meisten Punkte oberhalb der roten Linie, die anzeigt, wo die Messwerte gleich den Berechnungen sind. Das heißt, dass die Parametrisierung die Messung größtenteils unterschätzt. Das zeigt sich auch bei der mittleren Differenz zwischen Berechnung und Messung. Sie wird in Tabelle 5.7 als -85.37 W/m^2 angegeben. Für kleinere solare Einstrahlung funktioniert die original SP besser als für hohe. Die Standardabweichung beträgt 118.14 W/m^2 und die Korrelation mit Tagesgang zwischen gemessener und parametrisierter Strahlung ergibt 0.883. $Korr_{oT30}$ und $korr_{oT60}$ sind ähnlich und liegen bei 0.767 und 0.737.

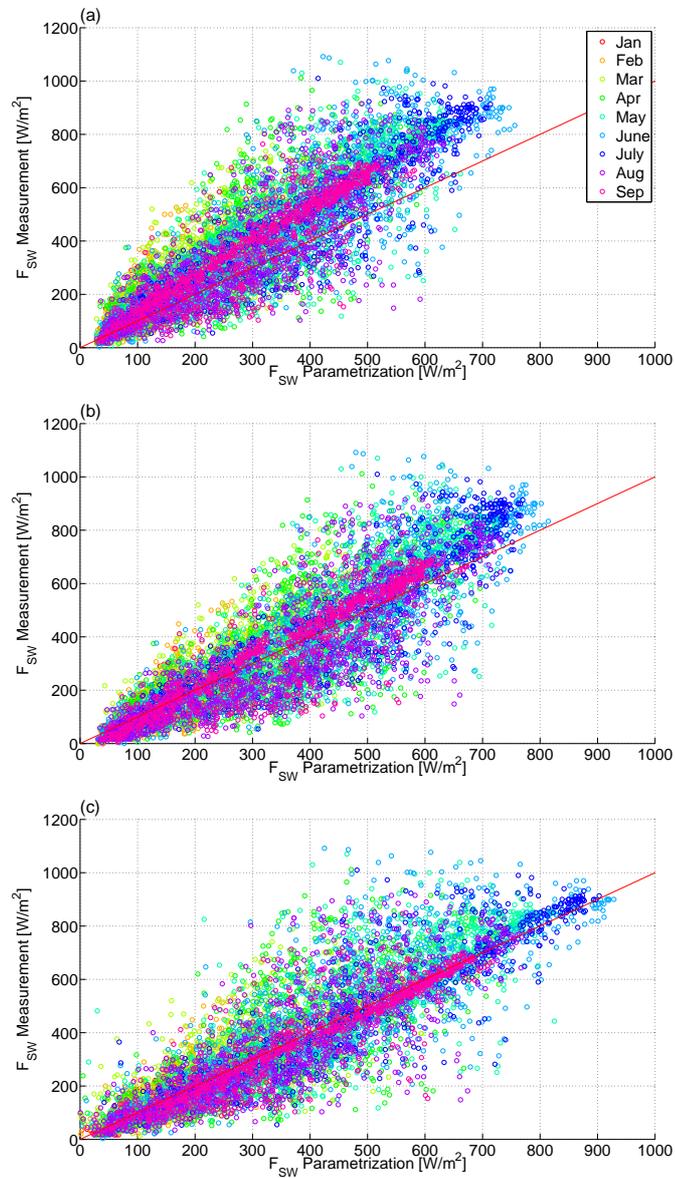


Abbildung 5.14: Vergleich der solaren Einstrahlung berechnet nach der oSP (a), der mSP_0 (b) und der $mSPZ_0$ (c) mit den Messwerten. Die verschiedene Farben stehen für verschiedene Monate.

| Parametrisierung | $\overline{\Delta Q}$ [W/m^2] | σ [W/m^2] | $korr_{mT}$ | $korr_{oT30}$ | $korr_{oT60}$ |
|-------------------------|-----------------------------------|----------------------|-------------|---------------|---------------|
| <i>oSP</i> | -85.37 | 118.14 | 0.883 | 0.767 | 0.737 |
| <i>mSP₀</i> | -10.49 | 109.89 | 0.904 | 0.71 | 0.704 |
| <i>mSPZ₀</i> | -11.72 | 110.59 | 0.887 | 0.745 | 0.719 |

Tabelle 5.7: Statistische Auswertung der drei Parametrisierungen für die Daten aus Lindenberg 2006 mit dem Mittelwert der Differenzen zwischen Parametrisierung und Messung ($\overline{\Delta Q}$), deren Standardabweichung (σ) und den Rangkorrelationen nach Spearman mit und ohne Tagesgang

In Abbildung 5.14 (b) ist die *mSP₀* gegen die Messung aufgetragen. Auch hier zeigt sich ein ähnliches Ergebnis wie für 2007. Die Punkte liegen näher an der roten Geraden und sowohl hohe als auch niedrige solare Einstrahlungen werden gut wiedergegeben, wobei bei den hohen Werten immer noch eine leichte Unterschätzung der Messwerte zu erkennen ist. Der Mittelwert der Differenzen beträgt $-10.49 W/m^2$. Dass die Differenz nicht, wie für 2007, bei $0 W/m^2$ liegt, kann in etwas anderen Wetterlagen begründet sein. Der Sommer war beispielweise 2006 deutlich wärmer als 2007 und der Herbst ist in den Daten nicht berücksichtigt. Die Standardabweichung wurde auf $109.89 W/m^2$ reduziert. Die Korrelation mit Tagesgang beträgt 0.904 und ist somit ungefähr genauso gut wie für 2007. Die Korrelation ohne Tagesgang wurde durch die Verwendung der *mSP₀* wie schon 2007 etwas verschlechtert und beträgt 0.71 für das einstündige laufende Mittel und 0.704 für das zweistündige. Insgesamt betrachtet liefert die *mSP₀* auf Grund der deutlich niedrigeren Differenz und Standardabweichung und der höheren Korrelation mit Tagesgang ein besseres Ergebnis als die *oSP*.

Durch die Hinzunahme der Zillman Parametrisierung für den unbewölkten Fall wird die mittlere Differenz noch einmal reduziert. Sie beträgt nun $-11.72 W/m^2$. Das zeigt sich auch in der Abbildung 5.14 (c). Sowohl hohe als auch niedrige solare Einstrahlungen werden gut wiedergegeben. Allerdings ist die Standardabweichung mit $110.59 W/m^2$ größer als für die *mSP₀*. Die Korrelation ist ebenfalls schlechter als für die beiden anderen modifizierten Parametrisierung. Sie liegt mit 0.887 nur knapp über der der *oSP*. $korr_{oT30}$ und $korr_{oT60}$ liegen für die *mSPZ₀* zwischen den für die anderen beiden Version.

Insgesamt betrachtet liefert die auf den gebietsgemittelten Bedeckungsgraden und CLW-Werten basierende *mSP₀* die besten Ergebnisse.

Auch für das Jahr 2006 wurden die statistischen Eigenschaften der drei Parametrisierungen in Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad (Abbildung 5.15 links), vom Sonnenzenitwinkel (Mitte) und vom CLW (rechts) untersucht, um vom Tagesgang der solaren Einstrahlung unabhängige Ergebnisse zu bekommen. Die blauen Linien stehen für die *oSP*, die roten für die *mSP₀* und die grünen für *mSPZ₀*. Die passenden Werte zu den Abbildung finden sich im Anhang.

In Abbildung 5.15 (a) ist die Korrelation zwischen den Parametrisierungen und den Messwerten in Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad dargestellt. Der Verlauf der Kurven entspricht in etwa dem für 2007 (Abbildung 5.11 (a)). Die beste Korrelation ergibt sich für wolkenlosen Himmel. Die Korrelation nimmt dann kontinuierlich ab bis zu einem

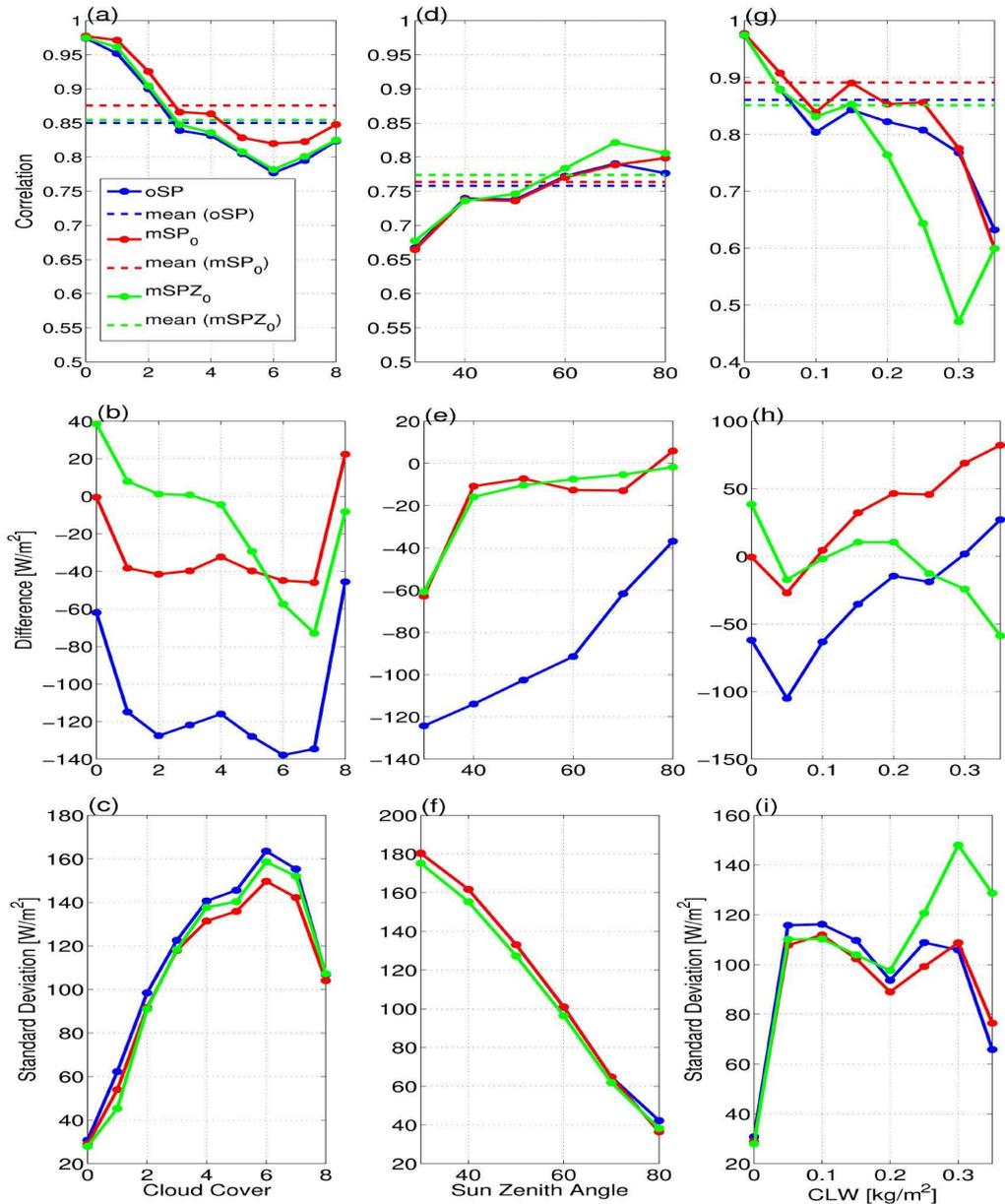


Abbildung 5.15: Korrelation (oben), Differenz zwischen Parametrisierung und Messung (Mitte) und Standardabweichung (unten) und deren Mittelwerte (gestrichelte Linien) für die oSP, die mSP₀ und die mSPZ₀ in Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad (links), vom Sonnenzenitwinkel (Mitte) und vom CLW (rechts) für 2006

Bedeckungsgrad von sechs Achteln. Für sieben und acht Achtel sind die Parametrisierungen wieder besser mit den Messwerten korreliert. Für 2007 war die Korrelation im Gegensatz dazu für sieben Achtel etwas schlechter als für sechs Achtel. Die mSP₀ zeigt für alle Bedeckungsgrade die größte Korrelation mit den Messungen mit 0.876 im Mittel, gefolgt von der mSPZ₀ mit 0.854. Die schlechteste Korrelation ergibt sich für die original

Schewski Parametrisierung mit 0.85.

Auch der Verlauf der Differenzen zwischen Messung und Berechnung in Abbildung 5.15 (b) ähnelt dem der Daten für 2007 in Abbildung 5.11 (b). Für die oSP liegen sie alle im negativen Bereich. Bei wolkenfreiem Himmel beträgt die Differenz -61.99 W/m^2 . Bis zu einem Bedeckungsgrad von sieben Achteln sind sie betragsmäßig größer als 100 W/m^2 , für komplett bedeckten Himmel beträgt sie -45.55 W/m^2 . Für die mSP_0 liegen die Differenzen für Bedeckungsgrade kleiner als sieben Achtel im negativen Bereich, sind aber betragsmäßig kleiner als für die original SP. Für vollständige Bedeckung überschätzt die Parametrisierung die Messung und die Differenz wird positiv. Die mittlere Differenz ist mit (-10.49 W/m^2) für die modifizierte SP kleiner als für die modifizierte SP mit Zillman (-11.72 W/m^2) und deutlich geringer als die Differenz zwischen oSP und Messung. Allerdings liegt keine der mittleren Differenzen wie 2007 bei 0 W/m^2 , sondern alle zeigen eine leicht negative Tendenz.

Die Standardabweichung in Abbildung 5.15 (c) sieht der in Abbildung 5.11 (c) ebenfalls sehr ähnlich. Sie steigt für alle drei Parametrisierungen von null bis sechs Achtel an und ist für komplette Bedeckung wieder etwas geringer. Im Mittel ist die Standardabweichung für die modifizierte SP am geringsten. Die größte Standardabweichung weist die oSP auf.

Die Korrelation zwischen Parametrisierung und Messung in Abhängigkeit vom Sonnenzenitwinkel zeigt Abbildung 5.15 (d). Die Korrelation steigt für alle drei Parametrisierungen bis zu einem Sonnenzenitwinkel von 70° und ist für $\theta = 80^\circ$ wieder kleiner. Allerdings ist hier die $mSPZ_0$ am besten mit den Messungen korreliert. Die mittlere Korrelation in Abhängigkeit vom Zenitwinkel beträgt 0.774.

Für die mittlere Differenz in Abbildung 5.15 (e) ergibt sich durch die Modifizierung eine deutliche Verbesserung. Für die original SP liegt sie zwischen -36 W/m^2 und -125 W/m^2 , für die modifizierte SP zwischen -62 W/m^2 und 6 W/m^2 . und für die $mSPZ_0$ zwischen -61 W/m^2 und -1 W/m^2 .

Die Standardabweichung nimmt in Abbildung 5.15 (f) mit steigendem Sonnenzenitwinkel kontinuierlich ab, da die solare Strahlung, die am Boden ankommt, auch mit niedrigerem Sonnenstand kleiner wird. Auch hier zeigt sich eine Verbesserung durch die Modifizierung der Koeffizienten, wie für das Jahr 2007 in Abbildung 5.13 (c). Auch dieses Mal weist die mSP_0 die kleinste Standardabweichung auf. Sie beträgt 109.89 W/m^2 . Die Standardabweichung bei der $mSPZ_0$ liegt mit 110.59 W/m^2 deutlich unter der für die oSP mit 118.14 W/m^2 und ist minimal größer als für die mSP_0 . Der Unterschied zwischen den mittleren Standardabweichungen für die Jahre 2006 und 2007 ist sehr gering und liegt bei der modifizierten Schewski-Parametrisierung bei nicht einmal 8 W/m^2 .

Die Korrelation in Abhängigkeit vom CLW in Abbildung 5.15 (g) ist für die mSP_0 mit 0.891 deutlich höher als für die beiden anderen Varianten. Der Verlauf der drei Kurven ähnelt dem von 2007 in Abbildung 5.12 (a). Der einzige Unterschied ist, dass die Korrelation bei der mSP_0 2006 für CLWs über 0.3 kg/m^2 deutlich geringer ist als für 2007. Allerdings gehen in diese Berechnung auch nur 49 Werte ein, 2007 sogar nur 22.

Auch die mittleren Differenzen sehen denen für 2007 ähnlich. Eine Ausnahme ist die sehr geringe Differenzen bei 0 kg/m^2 für die modifizierte Parametrisierung.

Die Standardabweichung in Abbildung 5.15 (i) ist für alle drei Parametrisierung bis zu 0.2 kg/m^2 relativ ähnlich. Für höhere CLWs zeigt die $mSPZ_0$ deutlich höhere Standardabweichungen als die anderen beiden Parametrisierungen. Die niedrigsten Standardabweichungen ergeben sich für den wolkenfreien Fall mit $CLW = 0 \text{ kg/m}^2$. Sie liegen zwischen 27 W/m^2 für die modifizierte und 31 W/m^2 für die original Version.

Durch die Anwendung der modifizierten SP ergibt sich sowohl in den verschiedenen Korrelationen zwischen Parametrisierung und Messung, in der Differenz zwischen den beiden, als auch in der Standardabweichung eine Verbesserung.

Um zu testen, ob die modifizierten Parametrisierungen auch für andere geographische Orte bessere Ergebnisse liefert als die original SP, wurden sie auf einige Tagessätze der Forschungsfahrt ANTXXIV-1 im November 2007 von Bremerhaven nach Kapstadt angewandt. Es wurden die Messdaten der Tage 30. Oktober, 1., 2., 4., 5., 10., 12. bis 14. und 16. November 2007 benutzt.

In Lindenberg gab es nur Sonnenzenitwinkel bis zu 30° . Deswegen wurden die Koeffizienten auch nur für $\theta = 30^\circ$ bis 80° angepasst. Für kleinere Winkel wurden weiterhin die Koeffizienten der oSP benutzt.

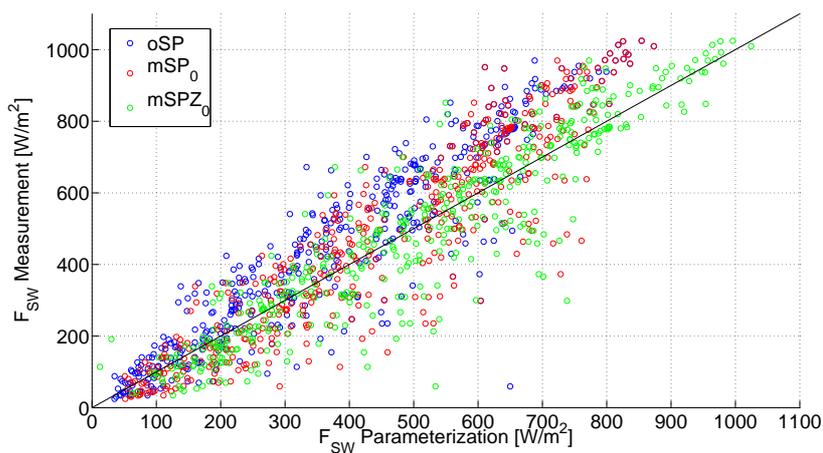


Abbildung 5.16: Vergleich der solaren Einstrahlung berechnet nach der oSP (blau), der mSP_0 (rot) und der $mSPZ_0$ (grün) mit den Messwerten für die Polarsternfahrt ANTXXIV-1.

In Abbildung 5.16 sind die berechneten gegen die gemessenen solaren Einstrahlungen für alle drei Parametrisierungen aufgetragen. Die blauen Kreise stehen für die oSP, die roten für die mSP_0 und die grünen für die $mSPZ_0$. Die original SP liegt wieder größtenteils oberhalb der schwarze Linie und unterschätzt somit die Messungen sowohl für niedrige als auch für hohe solare Einstrahlungen. Die modifizierte SP liefert bessere Ergebnisse. Sie liegt näher an der schwarzen Geraden, aber immer noch im Mittel darüber. Die $mSPZ_0$ tendiert eher zur Überschätzung der Messwerte, liegt aber insgesamt gesehen am nächsten an der schwarzen Linie.

Diesen Eindruck bestätigt auch die Statistik in Tabelle 5.8. Der Mittelwert für die Dif-

ferenz zwischen original SP und Messung liegt bei -73.98 W/m^2 . Das entspricht einer deutlichen Unterschätzung der Messwerte. Die mSP_0 weist mit -25.81 W/m^2 eine kleinere Unterschätzung auf. Die $mSPZ_0$ überschätzt die Messung im Mittel, aber betragsmäßig nicht so stark wie die anderen Parametrisierungen. $\overline{\Delta Q}$ beträgt mit 9.9 W/m^2 nur noch etwa 13% des Fehlers der original SP.

Die Standardabweichung ist für die $mSPZ_0$ ebenfalls mit 101.34 W/m^2 am geringsten. Allerdings ist hier die mSP_0 mit ungefähr 112 W/m^2 sogar höher als die original Schewski-Parametrisierung. Für diese beträgt die Standardabweichung 106.52 W/m^2 .

| Parametrisierung | $\overline{\Delta Q} [\text{W/m}^2]$ | $\sigma [\text{W/m}^2]$ | $korr_{mT}$ | $korr_{\sigma T30}$ | $korr_{\sigma T60}$ |
|------------------|--------------------------------------|-------------------------|-------------|---------------------|---------------------|
| oSP | -73.98 | 106.52 | 0.94 | 0.711 | 0.677 |
| mSP_0 | -25.81 | 111.8 | 0.907 | 0.674 | 0.636 |
| $mSPZ_0$ | 9.9 | 101.34 | 0.918 | 0.73 | 0.682 |

Tabelle 5.8: Statistische Auswertung der drei Parametrisierungen für die Daten der Forschungsfahrt mit dem Mittelwert der Differenzen zwischen Parametrisierung und Messung ($\overline{\Delta Q}$), deren Standardabweichung (σ) und den Rangkorrelationen nach Spearman mit und ohne Tagesgang

Die Korrelation mit Tagesgang wird durch die Verwendung der neuen Parametrisierungen schlechter. Sie liegt bei 0.904 für die mSP_0 und bei 0.918 für die $mSPZ_0$. Die Messungen sind am besten mit der original Schewski Parametrisierung mit $korr_{mT} = 0.94$ korreliert. Die Korrelationen sind mit Ausnahme der mSP_0 sogar etwas höher als für Lindenberg, obwohl hier ein größerer geographischer Raum betrachtet wird, auf den die Koeffizienten nicht abgestimmt sind. Allerdings gab es während der Forschungsfahrt mehr wolkenlose Fälle, was zu dieser hohen Korrelation führt. $Korr_{\sigma T30}$ ist für die $mSPZ_0$ am größten. $Korr_{\sigma T60}$ ist ebenfalls für diese Parametrisierung am höchsten.

Die modifizierten Koeffizienten führen bei den Polarsternfahrten zwar zu einer geringeren mittleren Differenz zwischen Messung und Parametrisierung, die anderen statistischen Parameter werden aber gar nicht oder nicht entscheidend verbessert. Es müssten für andere Klimazonen neue Koeffizienten ermittelt werden.

Am 5. November (Abbildung 5.17 (a)) ist es morgens wechselhaft bewölkt, mittags wolkenfrei und abends wieder leicht bewölkt. Das CLW wird trotzdem für den ganzen Tag als nahe null angegeben. Für die bewölkten Teile passt die original SP relativ gut mit den Messwerten überein. Die anderen zwei Parametrisierungen liegen fast immer darüber. Für die unbewölkte Phase passt die $mSPZ_0$ gut, während die oSP und die mSP_0 zu niedrige Werte angeben. Die mittlere Differenz ist für die modifizierte SP mit -4.1 W/m^2 am geringsten (Tabelle 5.9). Betragsmäßig liegen die Differenzen für die anderen beiden Parametrisierungen zwischen 40 W/m^2 und 62 W/m^2 . Die Standardabweichung ist für die $mSPZ_0$ und die oSP am niedrigsten und beträgt 98.36 W/m^2 . Die Korrelationen mit Tagesgang unterscheiden sich für alle drei Parametrisierungen nur minimal und liegen zwischen 0.952 für die mSP_0 und 0.97 für die oSP. Auch $korr_{\sigma T30}$ verändert sich geringfügig für die verschiedenen Parametrisierungen. Sie liegt zwischen 0.751 für die original

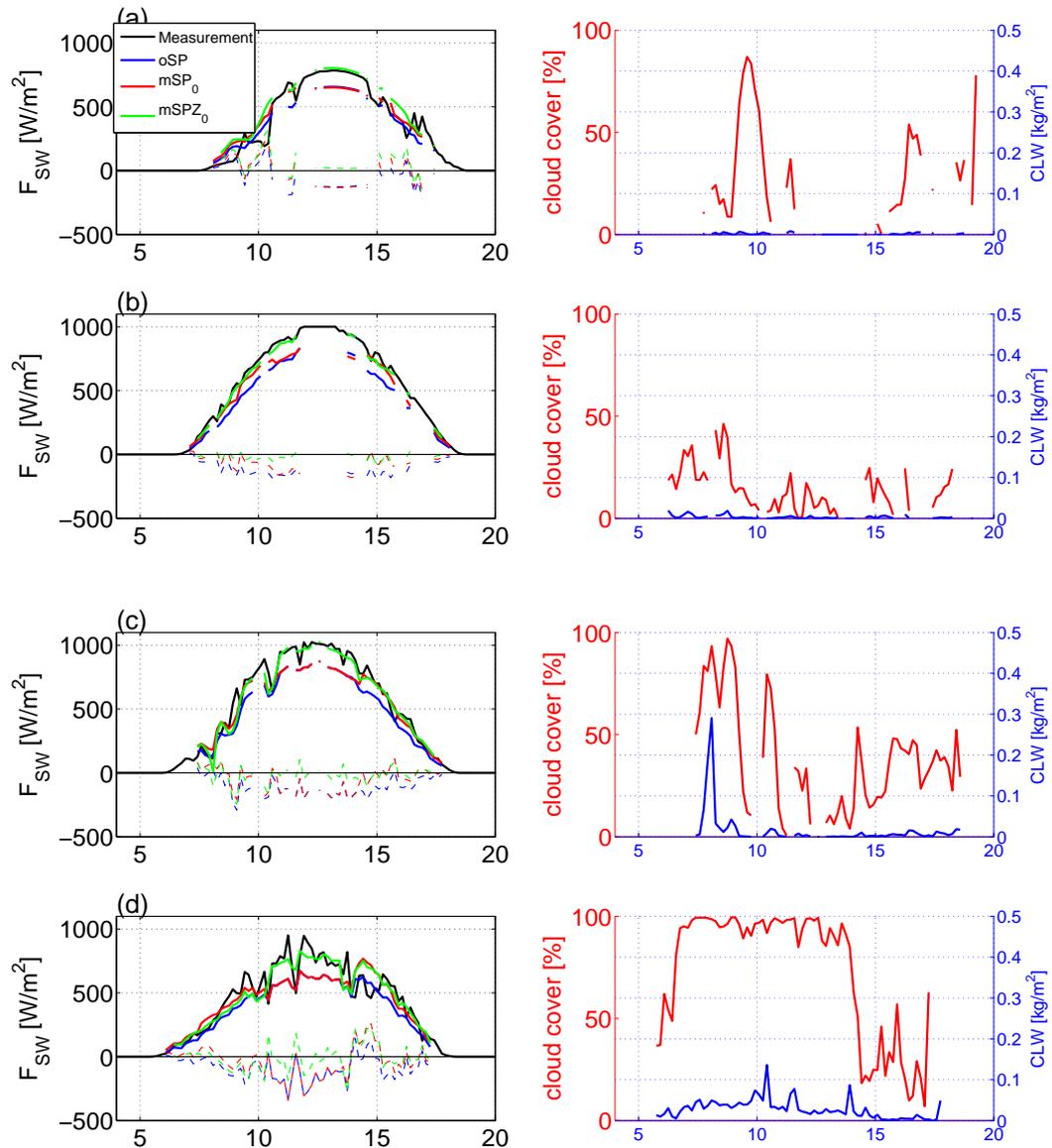


Abbildung 5.17: 5. (a), 12. (b), 14. (c) und 16. November (d) 2007; links: Messwerte und Parametrisierungen für die solare Einstrahlung (durchgezogene Linie) und deren Differenzen (gestrichelte Linie); rechts: Bedeckungsgrad in % und CLW in kg/m^2

SP und 0.705 für die mSP_0 . Die $korr_{OT60}$ steigt von 0.667 für die oSP auf 0.693 für die mSP_0 an. Für diesen Tag lässt sich keine eindeutige Aussage darüber machen, welche der drei Parametrisierungen am besten ist.

Abbildung 5.17 (b) zeigt den 12. November 2007. An diesem Tag war der Bedeckungsgrad gering. Er lag fast den ganzen Tag unter 20%. Das CLW ist die ganze Zeit nahe $0 kg/m^2$. Die original Schewski Parametrisierung unterschätzt die Messwerte durchweg.

| Datum | Parametr. | $\overline{\Delta Q}$ [W/m^2] | σ [W/m^2] | $korr_{mT}$ | $korr_{oT30}$ | $korr_{oT60}$ |
|----------|-----------|-----------------------------------|----------------------|-------------|---------------|---------------|
| 5.11.07 | oSP | -40.42 | 98.36 | 0.97 | 0.751 | 0.672 |
| | mSP_0 | -4.1 | 108.35 | 0.952 | 0.705 | 0.693 |
| | $mSPZ_0$ | 61.71 | 98.36 | 0.96 | 0.717 | 0.667 |
| 12.11.07 | oSP | -115.46 | 54.1 | 0.99 | 0.589 | 0.503 |
| | mSP_0 | -66.58 | 59.48 | 0.935 | 0.58 | 0.586 |
| | $mSPZ_0$ | -20.11 | 25.58 | 0.986 | 0.546 | 0.413 |
| 14.11.07 | oSP | -105.69 | 73.31 | 0.966 | 0.671 | 0.679 |
| | mSP_0 | -54.87 | 90.3 | 0.959 | 0.69 | 0.633 |
| | $mSPZ_0$ | -16.74 | 65.11 | 0.968 | 0.716 | 0.698 |
| 16.11.07 | oSP | -90.76 | 95.43 | 0.903 | 0.737 | 0.677 |
| | mSP_0 | -42.05 | 120.59 | 0.747 | 0.754 | 0.661 |
| | $mSPZ_0$ | -10.36 | 98.14 | 0.922 | 0.723 | 0.605 |

Tabelle 5.9: Statistische Auswertung vom 5., 12., 14. und 16. November 2007

Die mittlere Differenz liegt bei $-115.46 W/m^2$. Für die anderen zwei Parametrisierungen sind die Differenzen wesentlich geringer. Sie liegen bei $-66.58 W/m^2$ für die mSP_0 und bei $-20.11 W/m^2$ für die $mSPZ_0$. Die Standardabweichung beträgt für die original SP $54.1 W/m^2$ und für die mSP_0 $59.48 W/m^2$, für die Parametrisierung mit Zillman ungefähr $30 W/m^2$ weniger. Die Korrelation mit Tagesgang zwischen Messung und Berechnung ist mit 0.99 für die oSP am größten. Die $mSPZ_0$ liegt knapp darunter. Die mSP_0 ist am schlechtesten mit $korr_{mT} = 0.935$. Die Korrelationen ohne Tagesgang erreichen für keine der drei Varianten Werte über 0.6. Die durch die wenigen Wolken verursachte kleinskalige Variabilität kann also nicht wiedergegeben werden.

Die Bewölkung am 14. November in Abbildung 5.17 (c) ist den ganzen Tag wechselhaft und umfasst den ganzen Bereich von 0% bis 100%. Das CLW zeigt gegen 8 Uhr ein starkes Maximum von über $0.3 kg/m^2$. Auch hier unterschätzt die original SP die Messungen wieder fast durchweg. Der Mittelwert der Differenzen beträgt $-105.69 W/m^2$. Die modifizierte Parametrisierung passt vormittags und abends besser zu der Messkurve und weist sehr viel geringere Differenzen auf. Nachmittags bei niedrigem CLW und Bedeckungsgrad unterschätzt sie jedoch ebenfalls die Messungen. Die $mSPZ_0$ liegt den ganzen Tag nahe der Messkurve und es ergibt sich ein mittlerer Fehler von $-16.74 W/m^2$. Die Standardabweichungen ist für die veränderte Schewski-Parametrisierung ohne Zillman mit $90.3 W/m^2$ deutlich höher als für die original SP. Die $mSPZ_0$ hat mit $65.11 W/m^2$ die niedrigste Standardabweichung. Die größte Korrelation mit Tagesgang zeigt ebenfalls die $mSPZ_0$. Sie liegt bei 0.968. $Korr_{oT30}$ und $korr_{oT60}$ sind auch für die $mSPZ_0$ mit 0.716 und 0.698 am größten, so dass diese Variante der Parametrisierung am 14. November eindeutig die Messungen am besten wiedergeben kann.

Am 16. November in Abbildung 5.17 (d) ist es von morgens bis nachmittags gegen 14 Uhr fast komplett bewölkt. Danach klart es auf. Das CLW liegt zwischen $0 kg/m^2$ und

0.14 kg/m^2 . Die original SP liegt wieder fast die ganze Zeit unterhalb der Messkurve. Am besten passt die $mSPZ_0$ zur Messkurve bis auf den Bereich zwischen 14 und 15 Uhr, in dem sie die Messwerte überschätzt. Sie hat auch die geringste mittlere Differenz zwischen Messung und Berechnung mit -10.36 W/m^2 und die beste Korrelation mit Tagesgang mit 0.922. Die Standardabweichung ist allerdings etwa 3 W/m^2 größer als 95.43 W/m^2 für die oSP. Die Korrelationen ohne Tagesgang sind für die $mSPZ_0$ am niedrigsten, so dass sich wieder keine klare Aussage darüber machen lässt, welche die beste Parametrisierung ist.

Insgesamt lässt sich sagen, dass die Modifizierung der Schewski Parametrisierung die Differenzen zwischen Messung und Berechnung stark reduziert hat. Die Änderung der Koeffizienten hat in diesem Fall aber keine große Verbesserung in den anderen statistischen Parametern gebracht. Es müssten Breitengradabhängige Koeffizienten bestimmt werden, um eine Verbesserung zu erzielen. Durch die Hinzunahme der Parametrisierung nach Zillman für den wolkenfreien Fall wurden alle statistischen Parameter mit Ausnahme der Korrelation mit Tagesgang verbessert.

5.6 Tagesmittel

Für numerische Modelle sind meist längere Zeitskalen als zehn Minuten interessant. Deshalb werden noch die Tagesmittelwerte für die Jahre 2006 und 2007 betrachtet. Zunächst wird das Jahr 2007 analysiert, auf das die Koeffizienten der verschiedenen Parametrisierungen angepasst wurden.

Der Vergleich der Minutenmittel zwischen der Messung und den verschiedenen Parametrisierungen der solaren Einstrahlung für das Jahr 2007 ist in Abbildung 5.18 dargestellt. Die schwarze Kurve gibt die Messwerte an, die dicke gestrichelte farbige Kurve die Parametrisierung und die dünne gestrichelte farbige Kurve die Differenz zwischen beiden. In Abbildung 5.18 (a) ist der Vergleich zwischen Messung und der oSP gezeigt. Die Parametrisierung unterschätzt die Messung wie zu erwarten war. Die mittlere Differenz ist durch die Mittelung über den ganzen Tag auf -22.88 W/m^2 gesunken (siehe Tabelle 5.10). Die Standardabweichung beträgt 32.53 W/m^2 und die Korrelation 0.952.

Durch die Anwendung der modifizierten SP in Abbildung 5.18 (b) wurde die mittlere Differenz auf 1.56 W/m^2 reduziert. Die Standardabweichung ist im Vergleich zur oSP um ca. 6 W/m^2 gesunken. Die Korrelation ist etwas besser geworden und beträgt 0.955. Für die $mSPZ_0$, die außer dem Bedeckungsgrad und dem CLW noch die Lufttemperatur in Bodennähe, die relative Feuchte und die geographische Breite nutzt, beträgt die mittlere Differenz nur noch 1.12 W/m^2 und entspricht damit fast dem Idealfall. Der Vergleich zwischen Messung und $mSPZ_0$ ist in Abbildung 5.18 (c) dargestellt. Die Standardabweichung errechnet sich zu 17.65 W/m^2 . Das ist ungefähr die Hälfte der Standardabweichung für die original SP. Auch die Korrelation wird noch einmal verbessert auf 0.974.

Bei der Berechnung der Tagesmittel der solaren Einstrahlung erzielt also die modifizierte Schewski Parametrisierung mit Zillman für den unbewölkten Fall die besten Ergebnisse. Diese Resultate werden jetzt an Hand der Tagesmittel für 2006 überprüft.

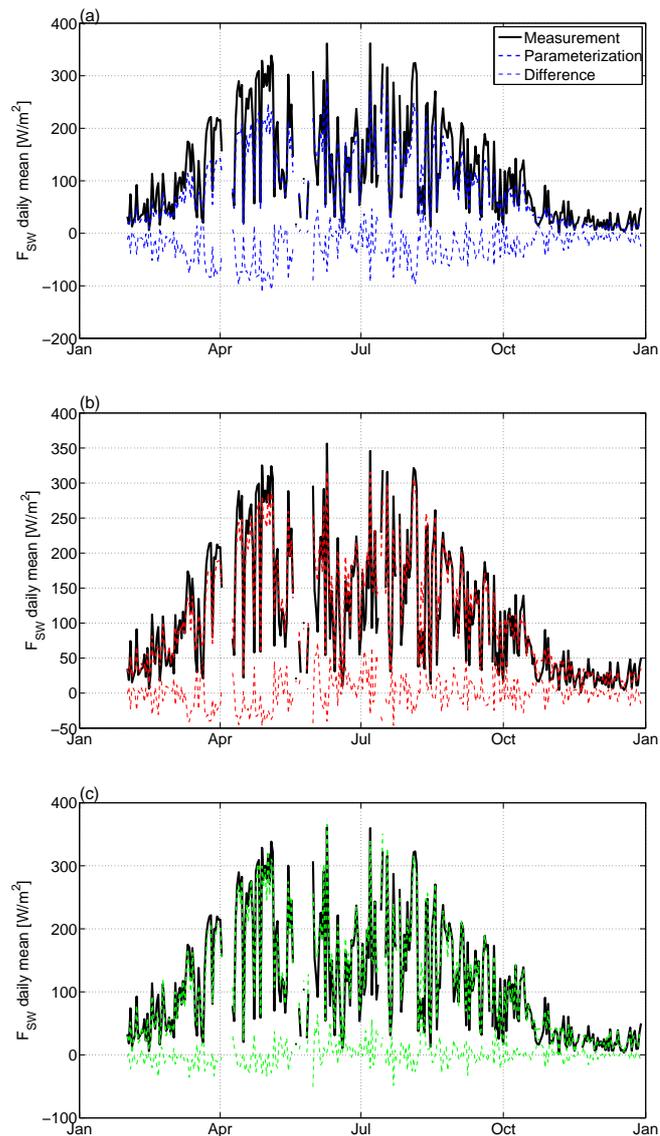


Abbildung 5.18: Vergleich zwischen den Tagesmitteln der Messung der solaren Einstrahlung am Boden mit der oSP (a), der mSP_0 (b) und der $mSPZ_0$ (c) für 2007.

In Abbildung 5.19 zeigt sich das gleiche Ergebnis wie in Abbildung 5.18. Die oSP (Abb. 5.19 (a)) unterschätzt die Messung größtenteils und ergibt im Mittel eine Abweichung von -31.11 W/m^2 . Tabelle 5.11 zeigt die statistische Auswertung für 2006. Die Standardabweichung der Differenz errechnet sich zu 30.53 W/m^2 und die Korrelation zwischen Messung und Parametrisierung zu 0.973.

In Abbildung 5.19 (b) ist der Vergleich zwischen Messung und mSP_0 abgebildet. Die mittlere Differenz ist wieder deutlich geringer als für die oSP und beträgt jetzt -2.97 W/m^2 . Die Standardabweichung ist um 6 W/m^2 auf 24.38 W/m^2 gesunken. Die Korrelation

| Parametrisierung | $\overline{\Delta Q}$ [W/m^2] | σ [W/m^2] | $korr_{mT}$ |
|-------------------------|-----------------------------------|----------------------|-------------|
| <i>oSP</i> | -22.88 | 32.53 | 0.952 |
| <i>mSP₀</i> | 1.56 | 24.19 | 0.955 |
| <i>mSPZ₀</i> | 1.12 | 17.65 | 0.974 |

Tabelle 5.10: Statistische Auswertung der drei Parametrisierungen für die Tagesmittelwerte für 2007 mit dem Mittelwert der Differenzen zwischen Parametrisierung und Messung ($\overline{\Delta Q}$), deren Standardabweichung (σ) und den Rangkorrelationen nach Spearman

wurde auch verbessert auf 0.976.

Das beste Ergebnis zeigt sich wie für 2007 auch hier für die *mSPZ₀*. Die Differenz ist zwar mit $-3.72 W/m^2$ etwas höher als im vorigen Fall, die Standardabweichung ist aber mit $18.3 W/m^2$ deutlich geringer. Die Korrelation ist minimal größer als für die anderen beiden Parametrisierung. Sie beträgt 0.979.

Für die Tagesmittel ist demzufolge die *mSPZ₀* am besten geeignet. Die modifizierte Schewski Parametrisierung zeigt aber nicht viel schlechtere Ergebnisse, obwohl dort wesentlich weniger Informationen eingehen. Sie eignet sich also ebenfalls gut zur Verwendung in Modellen.

| Parametrisierung | $\overline{\Delta Q}$ [W/m^2] | σ [W/m^2] | $korr_{mT}$ |
|-------------------------|-----------------------------------|----------------------|-------------|
| <i>oSP</i> | -31.11 | 30.53 | 0.973 |
| <i>mSP₀</i> | -2.97 | 24.38 | 0.976 |
| <i>mSPZ₀</i> | -3.72 | 18.3 | 0.979 |

Tabelle 5.11: Statistische Auswertung der drei Parametrisierungen für die Tagesmittelwerte für 2006 mit dem Mittelwert der Differenzen zwischen Parametrisierung und Messung ($\overline{\Delta Q}$), deren Standardabweichung (σ) und den Rangkorrelationen nach Spearman

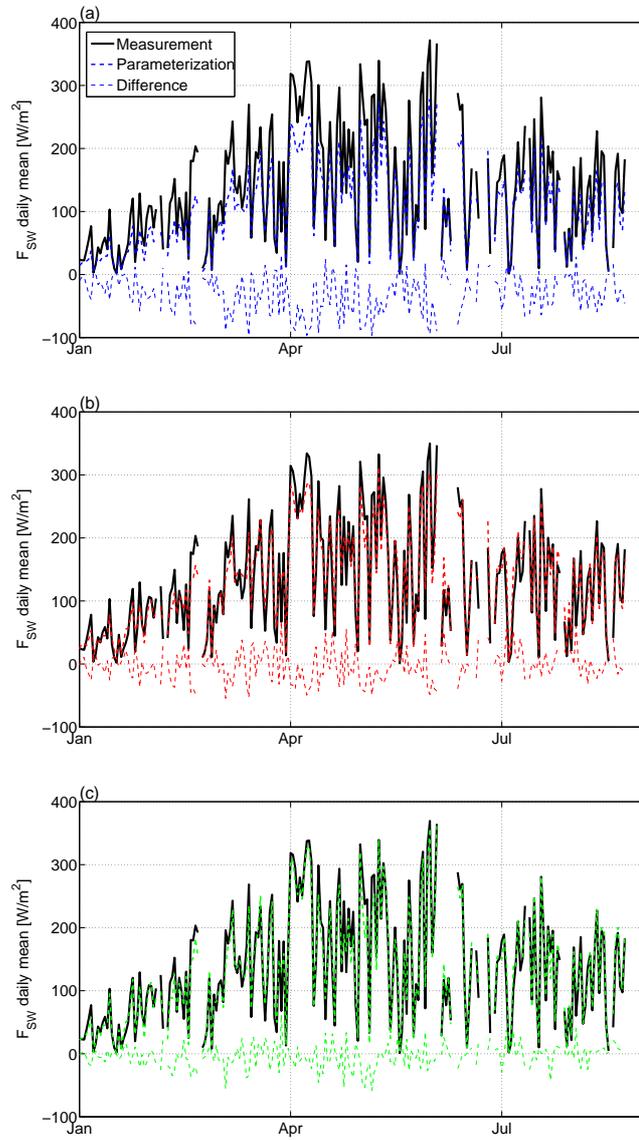


Abbildung 5.19: Vergleich zwischen den Tagesmitteln der Messung der solaren Einstrahlung am Boden mit der oSP (a), der mSP_0 (b) und der $mSPZ_0$ (c) für 2006.

Kapitel 6

Schlussbetrachtung

In dieser Arbeit wurde die Qualität einer auf Modellrechnungen basierenden Wolken-Strahlungsparametrisierung (SP) durch Anwendung auf Messdaten untersucht. Erstellt wurde die Schewski Parametrisierung zum einen mit Hilfe des mesoskaligen Atmosphärenmodells GESIMA, um die physikalischen Wolkeneigenschaften zu berechnen, zum anderen mit Hilfe des Strahlungstransportmodells GRIMALDI für die optischen Eigenschaften der Wolke. Daraus ergab sich eine Parametrisierung für die Transmission der solaren Strahlung in der Atmosphäre in Abhängigkeit des gebietsgemittelten Bedeckungsgrads und Flüssigwasserpfads beziehungsweise des Wolkenflüssigwassers.

Um zu testen, ob diese Parametrisierung auch bei Anwendung auf reale Messungen gute Ergebnisse liefert, wurde ein Datensatz aus Lindenberg für Februar bis Dezember 2007 benutzt. Für die Berechnung wurden jeweils 10-Minuten-Mittel verwendet.

Insgesamt ergab sich für den Lindenberg-Datensatz von 2007 eine deutliche Unterschätzung der Messungen durch die Parametrisierung. Insbesondere für den wolkenfreien Fall, der bei der Erstellung der Parametrisierung nicht berücksichtigt wurde, ist diese Unterschätzung über den ganzen Tag zu erkennen. Um diese Tendenz zu eliminieren und um Verbesserungen bei der Standardabweichung und der Korrelation zu erlangen wurden alle Koeffizienten in der Schewski Parametrisierung an den Datensatz aus Lindenberg von 2007 angepasst. In Folge dessen wurde die Standardabweichung im Vergleich zu oSP um mehr als 10% verringert und beträgt nun 102.01 W/m^2 . Die Korrelation mit Tagesgang wurde ebenfalls verbessert auf 0.91. Nur $korr_{\sigma T30}$ und $korr_{\sigma T60}$ sind mit 0.76 beziehungsweise 0.732 niedriger als für die original SP. Für den wolkenfreien Fall, betrachtet am Beispiel des 16. April, ergaben sich für alle beiden Parametrisierung relativ große Differenzen zwischen Messung und Berechnung. Deshalb wurde der Koeffizient a in der Schewski Parametrisierung durch die Parametrisierung nach Zillman ersetzt und die übrigen Koeffizienten wieder neu angepasst. Die Parametrisierung nach Zillman ist abhängig vom Sonnenzenitwinkel, der Temperatur am Boden und der relativen Feuchte. Die Koeffizienten für den wolkenfreien Fall wurden von Kalisch (2008) bestimmt. Obwohl diese Koeffizienten für Datensätze über dem Ozean bestimmt wurden, passen sie auch für Lindenberg sehr gut. Für unbedeckten Himmel passen Messungen und Berechnungen nach dieser Veränderung besser überein. Die mittlere Differenz ist

kleiner als 12 W/m^2 und die Korrelation mit Tagesgang beträgt 0.967. Allerdings gibt es beim unbewölkten Fall kleine Variationen in der solaren Einstrahlung, die alle drei Parametrisierungen nicht gut wiedergeben können. Die Korrelation ohne Tagesgang erreicht maximal 0.724 für die $mSPZ_0$. Bei Betrachtung aller Tage liefert die $mSPZ_0$ allerdings ein etwas schlechteres Ergebnis als die mSP_0 .

Bei der Betrachtung der statistischen Eigenschaften in Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad ergab sich, dass die modifizierte Parametrisierung am besten funktioniert. Die Korrelation zwischen Messung und Berechnung liegt für wolkenfreien Himmel nahe bei 1. Mit steigendem Bedeckungsgrad nimmt die Korrelation immer weiter ab. Für sieben Achtel ist sie am geringsten und liegt knapp unter 0.85. Die Standardabweichung verhält sich gegenläufig dazu und nimmt von einem bis zu sieben Achtel Bedeckungsgrad zu. Je inhomogener die Bedeckung ist, desto schneller und stärker schwankt die solare Einstrahlung am Boden. Diese Schwankungen können durch die Parametrisierung nicht wiedergegeben werden und führen daher zu den größeren Standardabweichungen und niedrigeren Korrelationen für höhere Bedeckungsgrade. Bei vollständig bedecktem Himmel ist die Bewölkung wieder eher homogen und kann durch die Parametrisierung besser wiedergegeben werden. Deshalb gibt es hierfür wieder niedrigere Standardabweichungen und höhere Korrelationen. Der Verlauf der Kurven für die Standardabweichung und für die Korrelation ist für alle drei Parametrisierungen ähnlich. Die Differenzen zwischen Messung und Berechnung sind für alle Parametrisierungen außer der oSP am geringsten für Bedeckungsgrade zwischen zwei und fünf Achteln. Die Werte der solaren Einstrahlung im wolkenfreien und im stark bewölkten Fall können die Parametrisierungen nicht so gut berechnen. Insgesamt wurden durch die Modifizierung der Koeffizienten in der Schewski Parametrisierung alle hier betrachteten statistischen Eigenschaften in Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad verbessert.

Durch die Veränderungen der Koeffizienten in der modifizierten SP wird auch die Korrelation in Abhängigkeit vom CLW im Vergleich zur original Version um 0.037 auf 0.89 verbessert. Die $mSPZ_0$ zeigt allerdings keine Verbesserung. Auffällig ist die besonders niedrige Korrelation und hohe Standardabweichung der $mSPZ_0$ für CLW-Werte größer als 0.2 kg/m^2 . Ein möglicher Grund hierfür ist, dass die hier verwendete Zillman-Parametrisierung auf wolkenfreien Konditionen abgestimmt ist.

Alle drei Eigenschaften, Korrelation, Differenz und Standardabweichung in Abhängigkeit vom Sonnenzenitwinkel wurden durch die Modifizierungen verbessert. Die Standardabweichung nimmt mit steigendem Sonnenzenitwinkel ab, da auch der Wert der Einstrahlung an sich geringer wird. Die Korrelation zwischen Berechnung und Messung nimmt mit steigendem Zenitwinkel bis $\theta = 70^\circ$ zu. Für die oSP und die $mSPZ_0$ nimmt sie für $\theta = 80^\circ$ wieder etwas ab. Im Mittel ist sie mit 0.82 für die modifizierte Schewski Parametrisierung besser als für die anderen beiden.

Diese Verbesserung durch die Anpassung der Koeffizienten wurde durch die Anwendung auf einen Datensatz aus Lindenberg von Januar bis September 2006 bestätigt. Auch hier zeigten sich deutliche Verbesserungen in der Standardabweichung und der Korrelation. Die mittlere Differenz ist hierbei nicht 0 W/m^2 . Das könnte an unterschiedlichen Wetterlagen in den beiden Jahren liegen. 2006 war der Sommer beispielsweise wärmer als

2007. Außerdem fehlt bei den Daten von 2006 der komplette Herbst. Demzufolge gab es mehr wolkenfreie Zeiträume, was zu einer Unterschätzung der Messungen führen könnte. Die Korrelation ohne Tagesgang wurde ein wenig verschlechtert. Für die $mSPZ_0$ ist zwar die Differenz am niedrigsten, die Standardabweichung und die Korrelation mit Tagesgang sind aber schlechter als für die mSP_0 . $Korr_{oT30}$ und $korr_{oT60}$ liegen für beide Parametrisierung unter dem Original.

Außerdem wurde die verbesserte Parametrisierung noch auf einen maritimen Datensatz angewandt. Diese Daten wurden auf der Forschungsfahrt ANTXXIV-1 mit dem FS Polarstern von Bremerhaven nach Kapstadt gesammelt. Auch hier wurden die mittleren Differenzen zwischen Berechnung und Messung für die zwei bearbeiteten Parametrisierungen deutlich reduziert. Die Standardabweichung wurde aber nur für die $mSPZ_0$ verbessert, die Korrelation mit Tagesgang hat sich für beide neuen Parametrisierungen verschlechtert. Die Korrelationen ohne Tagesgang sind für die Parametrisierung mit Zillman am höchsten. Die $mSPZ_0$ eignet sich demnach für diesen Datensatz besser als die zwei anderen. In späteren Arbeiten könnte überprüft werden, ob sich durch eine neue Berechnung der Koeffizienten in der original Schewski Parametrisierung ohne Zillman für andere Klimazonen ebenfalls bessere Ergebnisse erreichen lassen.

Bei der Berechnung der Tagesmittel liefert die $mSPZ_0$ ebenfalls die besten Ergebnisse. Aber auch die mSP_0 gibt die Messungen gut wieder, so dass sie in numerischen Modellen durchaus verwendet werden kann. Das hat den Vorteil, dass man nur die Informationen über den Bedeckungsgrad und das CLW benötigt.

Insgesamt liefert die Berechnung der solaren Einstrahlung mit der modifizierten Schewski Parametrisierung, die von den gebietsgemittelten Eigenschaften Bedeckungsgrad und CLW abhängt, bessere Ergebnisse als das Original. Ein Vergleich mit Parametrisierungen von Kalisch (2008) und Sinitsyn, die im Rahmen des Meridional Ocean Radiative Experiments (MORE) verwendet wurden ([Sinitsyn und Sokov(2006)]), soll in naher Zukunft durchgeführt werden und wird zeigen, wie gut diese modellgebundene Parametrisierung tatsächlich ist.

Anhang A

Ergänzung zu Kapitel 5

| Bedeckungsgrad [Achteln] | # Werte | oSP | mSP_0 | $mSPZ_0$ |
|--------------------------|---------|-------|---------|----------|
| 0 | 139 | 0.974 | 0.993 | 0.986 |
| 1 | 2750 | 0.953 | 0.973 | 0.964 |
| 2 | 713 | 0.915 | 0.937 | 0.909 |
| 3 | 533 | 0.883 | 0.906 | 0.884 |
| 4 | 445 | 0.832 | 0.878 | 0.847 |
| 5 | 469 | 0.826 | 0.852 | 0.826 |
| 6 | 605 | 0.792 | 0.846 | 0.803 |
| 7 | 747 | 0.777 | 0.832 | 0.786 |
| 8 | 6622 | 0.798 | 0.853 | 0.808 |

Tabelle A.1: Korrelation für die Daten aus Lindenberg 2007 in Abhängigkeit des Bedeckungsgrads

| Bedeckungsgrad [Achteln] | # Werte | oSP | mSP_0 | $mSPZ_0$ |
|--------------------------|---------|---------|---------|----------|
| 0 | 139 | -104.12 | -70.21 | 45.74 |
| 1 | 2750 | -116.44 | -47.29 | -3.05 |
| 2 | 713 | -109.55 | -19.23 | 0.02 |
| 3 | 533 | -108.38 | -10.86 | -1.07 |
| 4 | 445 | -101.35 | -10.8 | -9.52 |
| 5 | 469 | -102.85 | -12.08 | -16.46 |
| 6 | 605 | -110.93 | -26.75 | -40.88 |
| 7 | 747 | -118.07 | -42.61 | -64.07 |
| 8 | 6622 | -17.33 | 33.04 | 13.21 |

Tabelle A.2: Differenz [W/m^2] für die Daten aus Lindenberg 2007 in Abhängigkeit des Bedeckungsgrads

| Bedeckungsgrad [Achteln] | # Werte | oSP | mSP_0 | $mSPZ_0$ |
|--------------------------|---------|--------|---------|----------|
| 0 | 139 | 52.71 | 61.88 | 51.63 |
| 1 | 2750 | 64.54 | 49.25 | 43.77 |
| 2 | 713 | 91.4 | 83.89 | 83.89 |
| 3 | 533 | 112.41 | 109.56 | 113.01 |
| 4 | 445 | 124.91 | 122.69 | 127.6 |
| 5 | 469 | 145.44 | 135.23 | 141.96 |
| 6 | 605 | 150.42 | 139.63 | 150.51 |
| 7 | 747 | 153.49 | 141.23 | 150.73 |
| 8 | 6622 | 103.51 | 94.17 | 99.06 |

Tabelle A.3: Standardabweichung [W/m^2] für die Daten aus Lindenberg 2007 in Abhängigkeit des Bedeckungsgrads

| CLW [kg/m^2] | # Werte | oSP | mSP_0 | $mSPZ_0$ |
|------------------|---------|-------|---------|----------|
| 0 | 139 | 0.984 | 0.993 | 0.986 |
| 0.05 | 7597 | 0.875 | 0.902 | 0.88 |
| 0.1 | 2767 | 0.829 | 0.882 | 0.856 |
| 0.15 | 1151 | 0.8 | 0.857 | 0.817 |
| 0.2 | 601 | 0.81 | 0.854 | 0.786 |
| 0.25 | 452 | 0.804 | 0.856 | 0.641 |
| 0.3 | 294 | 0.826 | 0.865 | 0.551 |
| 0.35 | 22 | 0.633 | 0.829 | 0.692 |

Tabelle A.4: Korrelation für die Daten aus Lindenberg 2007 in Abhängigkeit des CLWs

| CLW [kg/m^2] | # Werte | oSP | mSP_0 | $mSPZ_0$ |
|------------------|---------|--------|---------|----------|
| 0 | 139 | -73.43 | -70.21 | 45.74 |
| 0.05 | 7597 | -93.04 | -15.89 | -7.5 |
| 0.1 | 2767 | -71.52 | 2.41 | -0.44 |
| 0.15 | 1151 | -7.17 | 43.25 | 27.56 |
| 0.2 | 601 | 6.24 | 43.94 | 21.18 |
| 0.25 | 452 | 34.3 | 54.94 | 19.73 |
| 0.3 | 294 | 43.93 | 48.22 | -4.88 |
| 0.35 | 22 | 66.28 | 53.74 | -35.8 |

Tabelle A.5: Differenz [W/m^2] für die Daten aus Lindenberg 2007 in Abhängigkeit des CLWs

| CLW [kg/m^2] | # Werte | oSP | mSP_0 | $mSPZ_0$ |
|------------------|---------|--------|---------|----------|
| 0 | 139 | 54.98 | 61.88 | 51.63 |
| 0.05 | 7579 | 114.66 | 102.94 | 103.82 |
| 0.1 | 2767 | 117.12 | 101.82 | 100.8 |
| 0.15 | 1151 | 96.9 | 89.64 | 93.92 |
| 0.2 | 601 | 98.64 | 93.58 | 100.38 |
| 0.25 | 452 | 68.71 | 67.18 | 89.29 |
| 0.3 | 294 | 69.73 | 65.2 | 108.52 |
| 0.35 | 22 | 57.95 | 54.74 | 115.88 |

Tabelle A.6: Standardabweichung [W/m^2] für die Daten aus Lindenberg 2007 in Abhängigkeit des CLWs

| Sonnenzenitwinkel [°] | # Werte | <i>oSP</i> | <i>mSP</i> ₀ | <i>mSPZ</i> ₀ |
|-----------------------|---------|------------|-------------------------|--------------------------|
| 30 | 684 | 0.709 | 0.752 | 0.757 |
| 40 | 1669 | 0.736 | 0.764 | 0.757 |
| 50 | 2111 | 0.778 | 0.814 | 0.815 |
| 60 | 2841 | 0.781 | 0.82 | 0.817 |
| 70 | 3652 | 0.791 | 0.825 | 0.832 |
| 80 | 2066 | 0.761 | 0.851 | 0.807 |

Tabelle A.7: Korrelation für die Daten aus Lindenberg 2007 in Abhängigkeit des Sonnenzenitwinkels

| Sonnenzenitwinkel [°] | # Werte | <i>oSP</i> | <i>mSP</i> ₀ | <i>mSPZ</i> ₀ |
|-----------------------|---------|------------|-------------------------|--------------------------|
| 30 | 684 | -60.11 | 0 | 0 |
| 40 | 1669 | -103.12 | 0 | 0 |
| 50 | 2111 | -96.08 | 0 | 0 |
| 60 | 2841 | -79.9 | 0 | 0 |
| 70 | 3652 | -49.93 | 0 | 0 |
| 80 | 2066 | -33.52 | 0 | 0 |

Tabelle A.8: Differenz [W/m^2] für die Daten aus Lindenberg 2007 in Abhängigkeit des Sonnenzenitwinkels

| Sonnenzenitwinkel [°] | # Werte | <i>oSP</i> | <i>mSP</i> ₀ | <i>mSPZ</i> ₀ |
|-----------------------|---------|------------|-------------------------|--------------------------|
| 30 | 684 | 178.54 | 188.68 | 182.03 |
| 40 | 1669 | 158.37 | 155.09 | 156.94 |
| 50 | 2111 | 131.58 | 125.59 | 121.59 |
| 60 | 2841 | 105.97 | 113.53 | 94.01 |
| 70 | 3652 | 68.95 | 66.16 | 62.43 |
| 80 | 2066 | 45.72 | 37.7 | 39.38 |

Tabelle A.9: Standardabweichung [W/m^2] für die Daten aus Lindenberg 2007 in Abhängigkeit des Sonnenzenitwinkels

| Bedeckungsgrad [Achteln] | # Werte | oSP | mSP_0 | $mSPZ_0$ |
|--------------------------|---------|-------|---------|----------|
| 0 | 94 | 0.974 | 0.977 | 0.975 |
| 1 | 1858 | 0.952 | 0.971 | 0.961 |
| 2 | 536 | 0.9 | 0.926 | 0.905 |
| 3 | 388 | 0.839 | 0.866 | 0.848 |
| 4 | 409 | 0.832 | 0.863 | 0.836 |
| 5 | 433 | 0.805 | 0.829 | 0.808 |
| 6 | 529 | 0.777 | 0.82 | 0.782 |
| 7 | 660 | 0.795 | 0.823 | 0.801 |
| 8 | 4441 | 0.822 | 0.848 | 0.825 |

Tabelle A.10: Korrelation für die Daten aus Lindenberg 2006 in Abhängigkeit des Bedeckungsgrads

| Bedeckungsgrad [Achteln] | # Werte | oSP | mSP_0 | $mSPZ_0$ |
|--------------------------|---------|---------|---------|----------|
| 0 | 94 | -61.99 | -0.49 | 38.52 |
| 1 | 1858 | -114.88 | -38.28 | 7.95 |
| 2 | 536 | -127.56 | -41.5 | 1.15 |
| 3 | 388 | -121.84 | -39.71 | 0.67 |
| 4 | 409 | -115.96 | -32.29 | -4.44 |
| 5 | 433 | -127.97 | -39.77 | -29.37 |
| 6 | 529 | -137.85 | -44.85 | -57.43 |
| 7 | 660 | -134.57 | -45.95 | -72.97 |
| 8 | 4441 | -45.55 | 22.38 | -8.14 |

Tabelle A.11: Differenz [W/m^2] für die Daten aus Lindenberg 2006 in Abhängigkeit des Bedeckungsgrads

| Bedeckungsgrad [Achteln] | # Werte | oSP | mSP_0 | $mSPZ_0$ |
|--------------------------|---------|--------|---------|----------|
| 0 | 94 | 30.76 | 28.94 | 27.93 |
| 1 | 1858 | 62.26 | 53.96 | 45.31 |
| 2 | 536 | 98.43 | 91.66 | 90.97 |
| 3 | 388 | 122.56 | 117.96 | 118.41 |
| 4 | 409 | 140.69 | 131.42 | 137.72 |
| 5 | 433 | 145.55 | 135.87 | 140.34 |
| 6 | 529 | 163.53 | 149.68 | 158.59 |
| 7 | 660 | 155.31 | 142.24 | 152.04 |
| 8 | 4441 | 106.78 | 104.09 | 107.24 |

Tabelle A.12: Standardabweichung [W/m^2] für die Daten aus Lindenberg 2006 in Abhängigkeit des Bedeckungsgrads

| CLW [kg/m^2] | # Werte | oSP | mSP_0 | $mSPZ_0$ |
|------------------|---------|-------|---------|----------|
| 0 | 94 | 0.974 | 0.977 | 0.95 |
| 0.05 | 6507 | 0.879 | 0.908 | 0.879 |
| 0.1 | 1193 | 0.804 | 0.839 | 0.831 |
| 0.15 | 703 | 0.843 | 0.89 | 0.853 |
| 0.2 | 398 | 0.822 | 0.853 | 0.764 |
| 0.25 | 236 | 0.808 | 0.856 | 0.644 |
| 0.3 | 203 | 0.768 | 0.775 | 0.471 |
| 0.35 | 14 | 0.632 | 0.6 | 0.599 |

Tabelle A.13: Korrelation für die Daten aus Lindenberg 2007 in Abhängigkeit des CLWs

| CLW [kg/m^2] | # Werte | oSP | mSP_0 | $mSPZ_0$ |
|------------------|---------|---------|---------|----------|
| 0 | 94 | -61.99 | -0.49 | 38.52 |
| 0.05 | 6507 | -105.06 | -27.04 | -17.2 |
| 0.1 | 1193 | -63.29 | 4.52 | -1.88 |
| 0.15 | 703 | -35.35 | 32.3 | 10.45 |
| 0.2 | 398 | -14.56 | 46.5 | 10.48 |
| 0.25 | 236 | -18.84 | 45.71 | -12.71 |
| 0.3 | 203 | 1.78 | 68.97 | -24.24 |
| 0.35 | 14 | 27.13 | 82.19 | -58.78 |

Tabelle A.14: Differenz [W/m^2] für die Daten aus Lindenberg 2007 in Abhängigkeit des CLWs

| CLW [kg/m^2] | # Werte | oSP | mSP_0 | $mSPZ_0$ |
|------------------|---------|--------|---------|----------|
| 0 | 94 | 30.76 | 28.94 | 27.93 |
| 0.05 | 6507 | 115.8 | 107.78 | 110.08 |
| 0.1 | 1193 | 116.18 | 111.85 | 110.29 |
| 0.15 | 703 | 109.69 | 102.34 | 103.92 |
| 0.2 | 398 | 93.71 | 89.03 | 97.61 |
| 0.25 | 236 | 108.83 | 99.21 | 120.67 |
| 0.3 | 203 | 105.86 | 108.74 | 148.01 |
| 0.35 | 14 | 65.85 | 76.47 | 128.65 |

Tabelle A.15: Standardabweichung [W/m^2] für die Daten aus Lindenberg 2007 in Abhängigkeit des CLWs

| Sonnenzenitwinkel [°] | # Werte | oSP | mSP_0 | $mSPZ_0$ |
|-----------------------|---------|-------|---------|----------|
| 30 | 660 | 0.667 | 0.665 | 0.677 |
| 40 | 1516 | 0.74 | 0.738 | 0.736 |
| 50 | 1821 | 0.738 | 0.736 | 0.746 |
| 60 | 1937 | 0.772 | 0.77 | 0.784 |
| 70 | 2244 | 0.791 | 0.789 | 0.822 |
| 80 | 1170 | 0.777 | 0.799 | 0.806 |

Tabelle A.16: Korrelation für die Daten aus Lindenberg 2006 in Abhängigkeit des Sonnenzenitwinkels

| Sonnenzenitwinkel [°] | # Werte | oSP | mSP_0 | $mSPZ_0$ |
|-----------------------|---------|---------|---------|----------|
| 30 | 660 | -124.27 | -62.88 | -60.74 |
| 40 | 1516 | -113.92 | -10.79 | -15.85 |
| 50 | 1821 | -102.06 | -7.21 | -10.34 |
| 60 | 1937 | -91.44 | -12.62 | -7.48 |
| 70 | 2244 | -61.71 | -12.93 | -5.31 |
| 80 | 1170 | -36.85 | 5.87 | -1.75 |

Tabelle A.17: Differenz [W/m^2] für die Daten aus Lindenberg 2006 in Abhängigkeit des Sonnenzenitwinkels

| Sonnenzenitwinkel [°] | # Werte | oSP | mSP_0 | $mSPZ_0$ |
|-----------------------|---------|--------|---------|----------|
| 30 | 660 | 180.31 | 180.4 | 175.15 |
| 40 | 1516 | 161.72 | 161.73 | 155.35 |
| 50 | 1821 | 133.11 | 133.09 | 127.31 |
| 60 | 1937 | 100.79 | 127.31 | 96.42 |
| 70 | 2244 | 64.8 | 64.82 | 61.81 |
| 80 | 1170 | 42.2 | 36.43 | 38.2 |

Tabelle A.18: Standardabweichung [W/m^2] für die Daten aus Lindenberg 2006 in Abhängigkeit des Sonnenzenitwinkels

Literaturverzeichnis

- [DWD(1987)] 1987. *Leitfaden des DWD, Nr.1: Allgemeine Meteorologie*. Deutscher Wetterdienst, Offenbach.
- [DWD(2005)] 2005. *ProMet, Jahrgang 31, meteorologische Fortbildung*, Band 2-4. Deutscher Wetterdienst.
- [DWD(2008)] 2008. <http://www.dwd.de>. 01.07.2008.
- [Dobson und Smith(1988)] Dobson, F. W. und Smith, S. D., 1988. Bulk models of solar radiation at sea. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 114, 165–182.
- [Eppel et al.(1995)] Eppel, D., Claußen, M., Jacob, D., Koch, W., Levkov, L., Mengelkamp, H.-T., und Werrmann, N., 1995. The non-hydrostatic mesoscale model GESIMA. Part II: Parametrizations and Applications. *Contributions to Atmospheric Physics*, 68, 15–41.
- [Eppel et al.(1992)] Eppel, D., Claußen, M., Jacob, D., Koch, W., Levkov, L., Mengelkamp, H.-T., Werrmann, N., und Resch, E., 1992. GESIMA - Geesthachter Simulationsmodell der Atmosphäre. Externer Bericht 92/I/2-10. GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Geesthacht.
- [Feister und Shields(2005)] Feister, U. und Shields, J., 2005. Cloud and radiance measurements with the VIS/NIR Daylight Whole Sky Imager at Lindenberg (Germany). *Meteorologische Zeitschrift*, 14, 627–639.
- [Güldner und Spänkuch(2001)] Güldner, J. und Spänkuch, D., 2001. Remote Sensing of the Thermodynamic State of the Atmospheric Boundary Layer by Ground-Based Microwave Radiometry. *American Meteorology Society*, 18, 925–933.
- [Jahnke(2008)] Jahnke, I., 2008. "Broken Cloud Effect" aus Beobachtung und Modell, Diplomarbeit. Leibniz Institut für Meereswissenschaften an der Universität Kiel.
- [Kalisch(2005)] Kalisch, J., 2005. Parametrisierungen der solaren Einstrahlung über dem Ozean im Rahmen des "Meridional Ocean Radiation Experiment" MORE, Diplomarbeit. Leibniz Institut für Meereswissenschaften an der Universität Kiel.
- [Kalisch und Macke(2008)] Kalisch, J. und Macke, A., 2008. Estimation of the total cloud cover with high temporal resolution and parameterization of short-term fluctuations of sea surface insolation. *Meteorologische Zeitschrift*.

- [Kiehl und Trenberth(1997)] Kiehl, J. und Trenberth, K., 1997. Earth's annual global mean energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(2), 197–208.
- [Kipp und Zonen(2008)] Kipp und Zonen, 2008. <http://www.kippzonen.com/pyranometer>. 11.07.2008.
- [Laevastu(1960)] Laevastu, T., 1960. Factors affecting the temperature of the surface layer of the sea. *Comment. Phys. Math.*, 25(1).
- [Lenoble(1993)] Lenoble, J., 1993. *Atmospheric Radiative Transfer*. A. DEEPAK Publishing, Hampton, Virginia, USA.
- [Levkov et al.(1992)] Levkov, L., Rockel, B., Kapitza, H., und Raschke, E., 1992. 3D mesoscale numerical studies of cirrus and stratus clouds by their time and space evolution. *Contributions to Atmospheric Physics*, 65, 35–58.
- [Lind et al.(1984)] Lind, R. J., Katsaros, K. B., und Gube, M., 1984. Radiation budget components and their parameterization in JASIN. 110, 1061–1071.
- [Liou(2002)] Liou, K. N., 2002. *An Introduction to Atmospheric Radiation*. Academic Press, London, zweite Auflage.
- [Lumb(1964)] Lumb, F. E., 1964. The influence of cloud on hourly amounts of total solar radiation at the sea surface. 90, 43–56.
- [Macke und Großklaus(1998)] Macke, A. und Großklaus, M., 1998. Light scattering by nonspherical raindrops: Implications for lidar remote sensing of rainrates. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 60(3), 355–363.
- [Macke et al.(1999)] Macke, A., Mitchell, D., und von Bremen, L., 1999. Monte carlo radiative transfer calculations for inhomogeneous mixed phase clouds. *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, 24(3), 237–241.
- [Macke et al.(1996)] Macke, A., Müller, J., und Raschke, E., 1996. Single scattering properties of atmospheric ice crystals. *Journal of Atmospheric Sciences*, 53, 2813–2825.
- [Marchuk et al.(1980)] Marchuk, G., Mikhailov, G., Nazaraiev, M., Darbinjan, R., Kargin, B., und Elepov, B., 1980. *The Monte Carlo Methods in Atmospheric Optics*. Springer Series in Optical Sciences, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 12. Auflage.
- [Press(1999)] Press, W., 1999. *Numerical Recipes*. Cambridge University Press, Cambridge, Großbritannien.
- [Schade(2005)] Schade, N., 2005. Experimentelle Erfassung und Interpolation der solaren Einstrahlung bei durchbrochener Bewölkung, Diplomarbeit. Leibniz Institut für Meereswissenschaften an der Universität Kiel.

- [Scheirer(2001)] Scheirer, R., 2001. Solarer Strahlungstransport in der inhomogenen Atmosphäre, Dissertation. Leibniz Institut für Meereswissenschaften an der Universität Kiel.
- [Scheirer und Macke(2000)] Scheirer, R. und Macke, A., 2000. Influence of the gaseous atmosphere on solar fluxes of inhomogeneous clouds. *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, 25, 73–76.
- [Scheirer und Macke(2001)] Scheirer, R. und Macke, A., 2001. On the accuracy of the independent column approximation in calculating the downward fluxes in the uva, uvb and par spectral ranges. *Journal of Geophysical Research*, 106, 14 301–14 312.
- [Schewski(2001)] Schewski, M., 2001. Einfluss dreidimensionaler Bewölkung auf den breitbandigen solaren Strahlungstransport, Diplomarbeit. Leibniz Institut für Meereswissenschaften an der Universität Kiel.
- [Schewski und Macke(2003)] Schewski, M. und Macke, A., 2003. Correlation between domain averaged cloud properties, and solar radiative fluxes for three dimensional inhomogeneous mixed phase clouds. *Meteorologische Zeitschrift*, 12, 293–299.
- [Sinitsyn und Sokov(2006)] Sinitsyn, A., G. S. M. A. K. J. und Sokov, A., 2006. More cruises launched. *Flux News*, 1, 11–13.
- [Ware et al.(2003)] Ware, R., Carpenter, R., Güldner, J., Liljegren, J., Nehrkorn, T., Solheim, F., und Vandenberghe, F., 2003. A multichannel radiometric profiler of temperature, humidity and cloud liquid. *Radio Science*, 38(4), 44–1 – 44–13.
- [Wassmann(2008)] Wassmann, A., 2008. Mikrowellenradiometrie auf See, Diplomarbeit. Leibniz Institut für Meereswissenschaften an der Universität Kiel.
- [Zillman(1972)] Zillman, J., 1972. A study of some aspects of the radiation and heat budgets of the southern hemisphere oceans. In *Meteorological study*. Bureau of Meteorology, Dept. of the Interior, Canberra, Australia, 1972. 526 pp.
- [Zoll(2008)] Zoll, Y., 2008. Bestimmung des Flüssigwasserpfadens aus Mikrowellenradiometer- und Wolkenkammermessungen, Diplomarbeit. Leibniz Institut für Meereswissenschaften an der Universität Kiel.

Danksagung

Ich möchte mich bei Prof. Dr. Andreas Macke für die Vergabe des Themas, die gute Betreuung und ein angenehmes Arbeitsklima bedanken, sowie bei Prof. Dr. Mojib Latif als Zweitkorrektor.

Vielen Dank auch an Dr. Uwe Feister, Dr. Jürgen Güldner, Dr. Klaus Behrens und Wolfgang K. Adam vom Richard Aßmann Observatorium in Lindenberg für die Bereitstellung der Daten.

Außerdem danke ich der Wolken- & Strahlungsgruppe, den Diplomanden in der Botanik und dem Frauenzimmer für hilfreiche Tipps und dafür, dass während und nach der Arbeit immer für genug Spaß gesorgt war. Bei Yann Zoll bedanke ich mich dafür, dass er mir bei allen meinen Computerfragen geduldig geholfen hat.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir dieses Studium ermöglicht haben.

Erklärung

Hiermit bestätige ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Ich versichere, dass diese Arbeit noch nicht zur Erlangung eines Diplomgrades an anderer Stelle vorgelegen hat.

Kiel, Oktober 2008

(Katharina Lengfeld)