

Solare Strahlung und deren Parametrisierungen in polaren Regionen

Diplomarbeit
von
Viktoria Mohr

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



Kiel, April 2009

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Abstract	3
1 Einleitung	5
2 Grundlagen	7
2.1 Energiebilanz in polaren Regionen	8
2.2 Strahlung	8
2.3 Wolken	13
2.4 Bedeutung der polaren Gebiete für die Erde	17
2.5 Meereis	18
3 Strahlungsparametrisierungen	21
3.1 Parametrisierungen der kurzwelligen Strahlung	21
3.2 Kurzwellige Strahlungsparametrisierung nach Zillman	25
3.3 Kurzwellige Strahlungsparametrisierung nach Shine	26
3.4 Kurzwellige Strahlungsparametrisierung nach Bennett	28
3.5 Kurzwellige Strahlungsparametrisierung nach Shine/Bennett	29
3.6 Parametrisierungen der langwelligen Einstrahlung am Boden	29
3.7 Langwellige Strahlungsparametrisierung nach Maykut und Church	30
3.8 Langwellige Strahlungsparametrisierung nach Zillman	30
3.9 Langwellige Strahlungsparametrisierung nach König-Langlo und Augstein	31
3.10 Langwellige Strahlungsparametrisierung nach Konzelmann	31
4 Erfassung der Daten	33
4.1 Pyranometer	34
4.2 Pyrgeometer	34
4.3 Vollhimmelskamera	35

5	Polarsterndaten der letzten 14 Jahre	37
5.1	Strahlungserhöhungen	39
5.2	Parametrisierungen	40
6	Expedition ARK-XXIII/1	47
6.1	Wetterlage und Fahrtverlauf	47
6.2	Strahlungserhöhungen	49
6.3	Strahlungsparametrisierungen	55
7	Expedition ANT-XXV/2	63
7.1	Wetterlage und Fahrtverlauf	63
7.2	Strahlungserhöhungen	65
7.3	Strahlungsparametrisierungen	75
8	Modellierung der Strahlungserhöhungen	89
8.1	Monte Carlo Methode	90
8.2	Modellierung von Strahlungserhöhungen	91
9	Schlussbetrachtung & Ausblick	97
	Literatur	99
	Danksagung	103
	Erklärung	105

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schema der Energiebilanz unserer Erde nach Kiehl und Trenberth (1997).	7
2.2	Plancksche Strahlungskurve und die unterschiedlichen Absorptionsbanden. (Quelle: http://physics.schooltool.nl/irspectroscopy/images/)	9
2.3	Koordinaten des Sonnenstandes, θ = Sonnenzenitwinkel und ϕ = Azimutwinkel (Quelle: http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph12/grundwissen/12himmelskugel (modifiziert))	12
2.4	Effekt der Wolken auf die Strahlung. (Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Treibhauseffekt)	14
2.5	Sonne mit Nebensonnen und angedeutetem Halo. Aufgenommen am 18.12.2008 um 5.46 Uhr von der Wolkenkamera an Bord der FS Polarstern	16
2.6	Beispiele der Eisminima und Eismaxima in der Arktis (oben) und in der Antarktis (Quelle: http://www.seaice.de/).	19
3.1	Wolkenbilder der Expedition ANT-XXV/2 vom 20. und 23. Dezember 2008	24
3.2	solare Einstrahlung und ihre Parametrisierung nach Lumb	24
4.1	Polarstern während des ARK-XXIII/1 Fahrtabschnittes vor der Ostgrönländischen Küste (Bild: <i>Ralf Rosenau</i>).	33
4.2	Pyranometer (links), Pyrgeometer (Mitte) und Vollhimmelskamera (rechts)	35
5.1	Globalstrahlung aufgetragen über den Zenitwinkel: Einstrahlungen in der Antarktis (oben) und Einstrahlungen in der Arktis (unten). Blaue Dreiecke symbolisieren die Einstrahlung zu Zeitpunkten, in denen das Forschungsschiff von Wasser umgeben war, schwarze Rauten stellen die Einstrahlung in Eisumgebung dar.	38
5.2	Alle Strahlungserhöhungen die während der letzten 14 Jahre auf Forschungsfahrten in der Antarktis gemessen wurden	39
5.3	Alle Ergebnisse der Parametrisierungen für die solare Strahlung während den Antarktischfahrten aufgetragen über dem Zenitwinkel in Wasser und in eisbedeckten Gewässern	41
5.4	Solare Globalstrahlung nach der Parametrisierung von Shine mit unterschiedlichen Werten für Bodenalbedo und optische Dicke der Wolken . . .	42
5.5	Differenzen der Ergebnisse der Parametrisierung nach Zillman mit gemessener Einstrahlung.	43

5.6	Differenzen der Ergebnisse der Parametrisierung nach Shine mit gemessener Einstrahlung.	43
5.7	Differenzen der Ergebnisse der Parametrisierung nach Bennett mit gemessener Einstrahlung.	44
5.8	Differenzen der Ergebnisse der Parametrisierung nach Shine/Bennett mit gemessener Einstrahlung.	44
5.9	Vergleich zwischen Parametrisierungen der Strahlung und Messwerten: Antarktis (oben), Arktis (unten)	45
6.1	Fahrtroute der ARK 23-1 Expedition	48
6.2	Satellitenbilder aus dem Datennetz von NOAA. Die roten Punkte markieren die kommenden Stationen, dunkles Gelb das Eis und das hellere grünlige Gelb sind Wolken.	48
6.3	Analysekarten des DWD, zu erkennen ist ein Tiefdruckgebiet über Großbritannien und später über Skandinavien.	49
6.4	Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (12:17 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 17.06.2008.	50
6.5	Solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 18.06.2008. Kamera zum Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (12:14 UTC) defekt.	50
6.6	Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (14:20 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 19.06.2008.	51
6.7	Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (11:31 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 20.06.2008.	51
6.8	Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (04:49 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 21.06.2008.	52
6.9	Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (11:27 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 22.06.2008.	53
6.10	Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (18:12 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 23.06.2008.	53
6.11	Solare Einstrahlung und Parametrisierungen der Einstrahlung am 19.06.2008	55
6.12	Gemessene und parametrisierte langwellige Strahlung und berechneter Bedeckungsgrad anhand der Wolkenfotos am 19.06.2008	56
6.13	Solare Einstrahlung und Parametrisierungen der Einstrahlung am 21.06.2008	57
6.14	Gemessene und parametrisierte langwellige Strahlung und berechneter Bedeckungsgrad anhand der Wolkenfotos am 21.06.2008	57

6.15	Gemessene solare Einstrahlung aufgetragen über die Parametrisierungen für den 19.06.2008	58
6.16	Gemessene solare Einstrahlung aufgetragen über die Parametrisierungen für den 21.06.2008	59
6.17	Langwellige Strahlung aufgetragen über dem Bedeckungsgrad aus den Daten vom 21.06.08	60
7.1	Fahrtroute der ANT 25-2 Expedition	64
7.2	Polarstern im Meereis am 18.12.2008 (links) und an der Schelfeiskante am 19.12.2008 (rechts). Bilder: <i>privat und www.realnature.tv</i>	65
7.3	Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (10:40 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 11.12.2008.	66
7.4	Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (10:51 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 12.12.2008.	66
7.5	Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (14:34 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 13.12.2008.	67
7.6	Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (12:21 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 15.12.2008.	67
7.7	Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (11:12 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 16.12.2008.	68
7.8	Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (07:51 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 17.12.2008.	68
7.9	Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (13:36 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 18.12.2008.	69
7.10	Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (14:57 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 19.12.2008.	69
7.11	Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (10:56 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 20.12.2008.	70
7.12	Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (09:13 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 21.12.2008.	71
7.13	Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (18:49 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 22.12.2008.	71

7.14 Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (11:21 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 23.12.2008.	72
7.15 Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (08:02 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 24.12.2008.	72
7.16 Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (14:44 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 25.12.2008.	73
7.17 Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (01:42 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 26.12.2008.	73
7.18 Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Einstrahlung (10:11 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 27.12.2008.	74
7.19 Solare Einstrahlung und Parametrisierungen der Einstrahlung am 18.12.2008.	76
7.20 Solare Einstrahlung und Parametrisierungen der Einstrahlung für den 19.12.2008.	76
7.21 Langwellige Gegenstrahlung und Parametrisierungen der Gegenstrahlung für den 18.12.2008 (oben) Bedeckungsgrad und Temperatur (unten).	77
7.22 Langwellige Gegenstrahlung und Parametrisierungen der Gegenstrahlung für den 19.12.2008 (oben) Bedeckungsgrad und Temperatur (unten).	78
7.23 Solare Einstrahlung und Parametrisierungen der Einstrahlung am 20.12.2008.	78
7.24 Langwellige Gegenstrahlung und Parametrisierungen der Gegenstrahlung für den 20.12.2008 (oben) Bedeckungsgrad und Temperatur (unten).	79
7.25 Solare Einstrahlung und Parametrisierungen der Einstrahlung am 26.12.2008.	79
7.26 Langwellige Gegenstrahlung und Parametrisierungen der Gegenstrahlung für den 26.12.2008 (oben) Bedeckungsgrad und Temperatur (unten).	80
7.27 Vergleich der Parametrisierungen für den wolkenfreien Fall (a) und die Reduktion aufgrund von Wolken (b) anhand der Daten vom 21. Dezember	81
7.28 Solare Einstrahlung aufgetragen über die Parametrisierungen für den 18.12.2008	82
7.29 Solare Einstrahlung aufgetragen über die Parametrisierungen für den 19.12.2008.	83
7.30 Solare Einstrahlung aufgetragen über die Parametrisierungen für den 20.12.2008.	83
7.31 Solare Einstrahlung aufgetragen über die Parametrisierungen für den 26.12.2008.	84

8.1	Modell und Modellgebiet der homogenen Wolke Quelle: <i>Dissertation von Schade (2009)</i>	92
8.2	Modell und Modellgebiet der homogenen Altocumulus Wolke Quelle: <i>Dissertation von Schade (2009)</i>	94
8.3	Strahlungserhöhung, aufgetragen über dem Bedeckungsgrad in eisbedeckten Regionen.	95
8.4	Strahlungserhöhungen, aufgetragen über Zenitwinkel in eisbedeckten Gebieten.	95

Tabellenverzeichnis

3.1	9 Wolkenkategorien nach Lumb (1964) C_L , C_M und C_H stehen dabei für tiefe, mittlere oder hohe Wolken	23
6.1	Tabelle der Strahlungserhöhungen für den Fahrtabschnitt ARK-XXIII/1	54
6.2	Korrelation und RMSE der kurzwelligen Strahlungsparametrisierungen für den 19. Juni	60
6.3	Korrelation und RMSE der kurzwelligen Strahlungsparametrisierungen für den 21. Juni	60
6.4	Korrelation und RMSE der langwelligen Strahlungsparametrisierungen für den 19. Juni	61
6.5	Korrelation und RMSE der langwelligen Strahlungsparametrisierungen für den 21. Juni	61
7.1	Tabelle der Strahlungserhöhungen für den Fahrtabschnitt ANT-XXV/2. Für den 14. Dezember liegen aufgrund eines Defekts des Pyranometers keine Messungen vor.	75
7.2	Korrelation und RMSE kurzwelligen Strahlungsparametrisierungen für den 18. Dezember	85
7.3	Korrelation und RMSE kurzwelligen Strahlungsparametrisierungen für den 19. Dezember	85
7.4	Korrelation und RMSE kurzwelligen Strahlungsparametrisierungen für den 20. Dezember	85
7.5	Korrelation und RMSE kurzwelligen Strahlungsparametrisierungen für den 26. Dezember	86
7.6	Korrelation und RMSE der langwelligen Strahlungsparametrisierungen für den 18. Dezember	87
7.7	Korrelation und RMSE der langwelligen Strahlungsparametrisierungen für den 19. Dezember	87
7.8	Korrelation und RMSE der langwelligen Strahlungsparametrisierungen für den 20. Dezember	87
7.9	Korrelation und RMSE der langwelligen Strahlungsparametrisierungen für den 26. Dezember	88

8.1	Prozentuale und Strahlungserhöhungen und absolute Einstrahlung für die Cumuluswolke	93
8.2	Prozentuale Strahlungserhöhungen und absolute Einstrahlung für die Al- tocumuluswolke	93

Zusammenfassung

Diese Diplom-Arbeit behandelt den Einfluss von Wolken und Meereis auf die solare und terrestrische Einstrahlung am Boden. Es werden unterschiedliche Parametrisierungen der solaren Einstrahlung auf reale Daten angewandt. Diese empirischen Daten, die unterschiedliche meteorologische Parameter beinhalten, wurden während den Polarstern Expeditionen ARK-XXIII/1 im Juni und Juli 2008 sowie ANT-XXV/2 im Dezember 2008 und Januar 2009 gewonnen. Ferner werden die Parametrisierungen mit der ebenfalls an Bord den Polarstern erzeugten Daten der letzten 14 Jahre verwendet. Es folgt ausserdem ein Vergleich der parametrisierten Flüsse mit der an Bord gemessenen solaren Einstrahlung.

Vier Strahlungsparametrisierungen der kurzwelligen solaren Einstrahlung wurden ausgewählt. Drei von ihnen berechnen auf Grundlage derselben Parameter die solare kurzwellige Einstrahlung. Die Transmissivität der Atmosphäre wird aus dem Wasserdampfdruck am Boden und der Wolkenbedeckung abgeleitet [Zillman(1972), Bennett(1982)]. Die vierte Parametrisierung verwendet als zusätzliche Eingangsparameter die Albedo des Untergrundes und die optische Dicke der Wolken [Shine(1984)].

Es werden ausschließlich solche Tage betrachtet, die eindeutig mit einer hohen Bodenalbedo einhergehen, also Tage an denen sich das Forschungsschiff Polarstern in eisbedeckten Gewässern befand.

Im wolkenfreien Fall ist eine systematische Unterschätzung der Parametrisierungen bezüglich der solaren Einstrahlung zu erkennen. Im bewölkten und im teilweise bewölkten Fall liegt der systematische Fehler bei den meisten Parametrisierungen um 100 W/m^2 (ca. 20%). Unter Berücksichtigung der Bodenalbedo und der optischen Dicke der Wolken können die Fehler jedoch deutlich verringert werden.

Neben den genannten werden vier weitere Parametrisierungen verwendet, die die langwellige nach unten gerichtete Strahlungsflussdichte parametrisieren. Diese hängen unterschiedlich von Temperatur, Wasserdampf und Wolkenbedeckungsgrad ab. Sowohl im bewölkten, als auch im unbewölkten Fall zeigt die Parametrisierung nach Zillman den kleinsten systematischen Fehler. Anders als die übrigen Parametrisierungen verwendet Zillman den Faktor des Bedeckungsgrades, der nichtlinear in seine Parametrisierung eingeht [Zillman(1972)]. Alle Parametrisierungen, mit Ausnahme der von Zillman, wurden speziell für Bedingungen im Meereis entwickelt.

Zusätzlich zu den Parametrisierungen werden auch die Ausmaße der Strahlungserhöhungen bezüglich der solaren Einstrahlung bei einem unbewölkten Himmel während der beiden erwähnten Polarsternfahrten sowie aus den Daten, die innerhalb der letzten 14 Jahre an Bord von Polarstern gesammelt wurden, untersucht. Mit Hilfe von zeitlich hochaufgelösten Messungen, konnte während der Fahrt ANT-XXV/2 am 23.12.2008 die größte absolute Strahlungserhöhung mit 71,86% gemessen werden. Die Erhöhung erreichte mit 596 W/m^2 einen Wert, der sogar über dem größten bisher veröffentlichten Wert von 537 W/m^2 liegt [Schade et al.(2007)].

Als Abschluß wird mit Hilfe eines Strahlungstransportmodells untersucht, ob die Strahlungserhöhungen in den polaren Regionen mit Modellen vergleichbar sind. Das verwendete Modell ba-

siert auf der Monte-Carlo-Methode, die ebenfalls kurz beschrieben wird. Die Ergebnisse machen deutlich, dass die Bodenalbedo, die optische Dicke der Wolken und auch der Sonnenstand wichtige Komponenten für die Strahlungserhöhungen sind. Eine höhere Bodenalbedo verstärkt das Rückstrahlvermögen und die Mehrfachreflexionen zwischen Boden und Wolkenunterkante. Eine größere optische Dicke der Wolken führt zu helleren Wolkenrändern, die ebenfalls die Reflexionen begünstigen. Ein tiefer Sonnenstand führt ebenso zu einer erhöhten solaren Einstrahlung, da dieselbe Menge an Strahlung auf einer größeren Fläche verteilt ist. Dadurch kann diese öfter gestreut werden und führt somit zu einer Erhöhung.

Abstract

This Diploma thesis discusses the influence of clouds and sea-ice on solar and terrestrial insolation on the surface. Different parameterizations of solar radiation are applied to real datasets. These empirical datasets which include different meteorological parameters, were collected during two expeditions with the research vessel Polarstern: ARK-XXIII/1 in June and July 2008 and on ANT-XXV/2 in December 2008 and January 2009. Furthermore these parameterizations are applied to datasets, which were collected during the last 14 years onboard the research vessel Polarstern. Additionally the parameterized fluxes are compared with measurements of solar insolation.

Four different parameterizations of shortwave insolation are chosen. Three of them are calculating the solar shortwave radiation using the same parameters. The transmissivity of the atmosphere was derived from the water-vapour-pressure at the surface and the cloud-cover. The fourth parameterization of Shine, uses additionally the albedo of the surface and the optical thickness of clouds as parameters for the input values [Shine(1984)].

Only days with high surface albedo are examined, so days the research vessel Polarstern spent in ice-covered water. In case of clear-sky conditions a systematic underestimation of the parameterization for solar insolation can be identified. In cloudy or partly cloudy conditions, most of the parameterizations have a bias of about 100 W/m^2 (20%). Considering the surface albedo and optical thickness of clouds, errors can be clearly reduced.

Additionally to the shortwave parameterizations there are four more parameterizations used, which are calculating the longwave downwelling flux density of the radiation. They depend on temperature, water-vapor and cloud-cover. In cloudy as well as in clear-sky conditions, the parameterization of Zillman shows the smallest bias in the downwelling longwave radiation [Zillman(1972)]. Unlike the rest of the parameterizations, Zillman used a nonlinear factor of cloud-cover for his parameterization.

Except the parameterization of shortwave insolation from Zillman, all of these parameterizations were developed especially for sea ice conditions or high albedo surfaces.

In addition to the parameterizations also the magnitude of radiation enhancements, concerning a cloudless sky, are determined, which happen during the two mentioned research expeditions and in the last 14 years of Polarstern cruises. With the help of high temporal resolved data, enhancements of solar radiation has been measured during the cruise ANT-XXV/2. The biggest absolute enhancement occurred on December 23rd of 2008 with 71.86 %. The enhancement reaches with 592 W/m^2 a value which is even higher than the greatest published value of 537 W/m^2 [Schade et al.(2007)].

Furthermore with the help of a radiation transport model it is determined, how radiation enhancements in polar regions are comparable with the results of the model. The model is based on the Monte-Carlo-Method, which is also shortly described in the present work. The results point out that the surface albedo and the sun elevation are important components for radiation enhancements. A higher surface albedo forces the reflexivity and the multiple reflections between

cloud bottom and surface. A higher optical thickness of the clouds leads to brighter cloud borders, which also intensify the reflections. A low solar altitude leads also to an enhancement of solar insolation on the surface, as the sunrays impact the clouds from below where the insolation can be directly reflected.

Kapitel 1

Einleitung

Die Sonne mit der von ihr ausgehenden Strahlung ist der Hauptenergielieferant für beinahe jedes Leben oder Bewegung auf der Erde. Die solare Strahlung wird nach der Absorption an der Erdoberfläche in Wärme umgewandelt und anschließend wieder in Form von langwelliger Strahlung in den Weltraum abgegeben.

Der Sonnenstand ist für die Energiebilanz der Erd-Atmosphäre von großer Bedeutung. Gerade in den polaren Regionen, wo die Sonne nur tief am Himmel steht, legt die Strahlung einen weiten Weg zurück und verliert somit an Intensität. Die Sonne erreicht an den Polarkreisen eine maximale Mittagshöhe von 47° .

Neben dem Sonnenstand haben Wolken und deren unterschiedliche Eigenschaften einen weiteren wichtigen Einfluss auf die Energiebilanz der Atmosphäre. Sie beeinflussen besonders stark den Energieaustausch zwischen der Atmosphäre und den polaren Meeresflächen. Sie sind außerdem häufig das Produkt von Impuls- und Wärmeaustausch zwischen dem offenen Meer und der Atmosphäre.

Der Einfluss der Wolken auf die solare Strahlung ist vor allem in hohen Breitengraden sehr komplex. Dies liegt an dem Vorhandensein von Schnee und Eis und ihren hochreflektierenden Oberflächen. Auch die mehrere Monate andauernde negative Strahlungsbilanz, die tiefen Temperaturen und das Vorhandensein von Temperaturinversionen machen diese Gebiete zu einer besonderen Klimaregion.

Das folgende Kapitel untersucht die Bedeutung des Meereises und der Wolken und deren Einfluss auf die solare Strahlung und gibt die Motivation zu dieser Arbeit wieder. Im dritten Kapitel werden unterschiedliche Parametrisierungen der kurzwelligen und langwelligen Strahlung vorgestellt. Diese wurden mit der gemessenen solaren Strahlung zweier Forschungsfahrten und Daten aus 14 Jahren Forschungsfahrten mit dem Forschungsschiff Polarstern verglichen. Eine kurze Erläuterung der Geräte und Datenerfassung folgt im vierten Kapitel. Das fünfte Kapitel beinhaltet eine kurze Interpretation der Daten, die während der letzten 14 Jahre auf der Polarstern gesammelt wurden, sowie einen ersten Vergleich mit den untersuchten Parametrisierungen.

Im sechsten und siebten Kapitel werden zwei Forschungsfahrten, die im Frühjahr und Winter 2008 stattfanden, beschrieben. Dazu werden einzelne Tage, die das Schiff im antarktischen Eis verbrachte, mit Hilfe der vorhandenen Parametrisierungen ausgewertet.

Dabei wird insbesondere auf Strahlungserhöhungen aufgrund unterschiedlicher Wolken und Meereisbedingungen eingegangen. Im achten Kapitel wird das Strahlungstransportmodell *GRIMALDI* vorgestellt, welches Strahlungserhöhungen simuliert, um modellier- te und gemessene Werte der Erhöhungen vergleichen zu können. Desweiteren werden auch Ergebnisse der Modellläufe dargestellt. Das letzte Kapitel gibt einen Ausblick auf mögliche weiterführende Arbeiten.

Kapitel 2

Grundlagen

Der Hauptenergielieferant für das Leben auf der Erde ist die Sonne. Sonnenenergie beschreibt die von der Sonne durch Kernfusion erzeugte Energie, die in Form von elektromagnetischer Strahlung zur Erde gelangt. Die Solarkonstante, welche der Energie entspricht, die unsere Erde am Rand der Atmosphäre von der Sonne erfährt, beträgt $S_0=1367 \text{ W/m}^2$ ¹. Diese eingestrahelte Energie wird von den Bestandteilen der Atmosphäre reflektiert, absorbiert oder transmittiert. Je nachdem in welchem Zustand die Atmosphäre sich befindet, sind diese Prozesse unterschiedlich stark ausgeprägt.

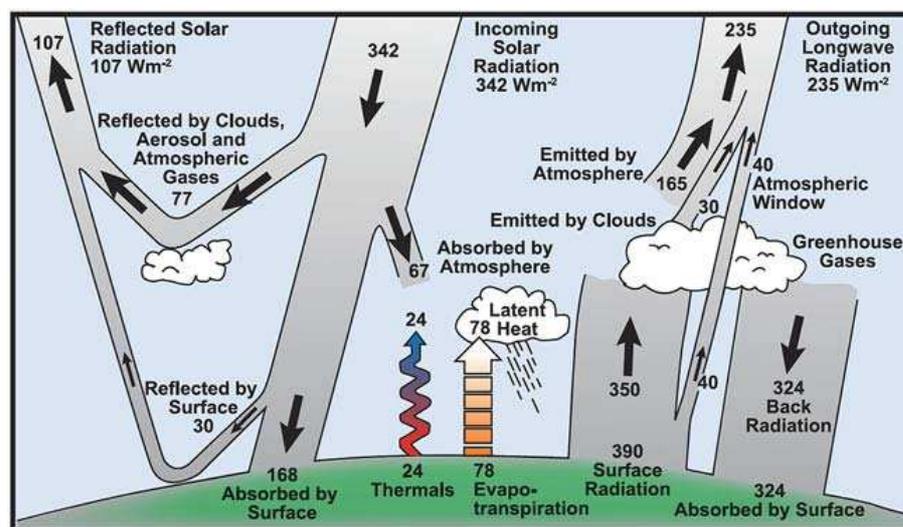


Abbildung 2.1: Schema der Energiebilanz unserer Erde nach Kiehl und Trenberth (1997).

In Abb. 2.1 ist das Jahresmittel der globalen Energiebilanz dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Wolken einen nicht unerheblichen Beitrag im Strahlungstransport sowohl im kurzwelligen als auch im langwelligen Bereich leisten. Ein großer Teil der solaren Strah-

¹Die Solarkonstante wurde 1982 von der Weltorganisation für Meteorologie in Genf auf $S_0 = 1367 \text{ W/m}^2$ festgelegt.

lung wird an Wolken reflektiert (Albedo Effekt ²), was zu einer verringerten Einstrahlung am Boden führt. Wolken können aber auch erwärmend wirken. Sie hindern die langwellige Strahlung, die quasi pausenlos von der Erde ausgesandt wird, in den Weltraum zu entweichen.

Da die Erdbahn eine Exzentrizität aufweist, schwankt der Abstand von der Sonne zur Erde im Laufe eines Jahres. Somit schwankt auch der Wert der Solarkonstanten um etwa 3,5%. Der Abstand ist im Juli am größten und im Januar am kleinsten. Dieses Verhalten spielt aber meist nur eine untergeordnete Rolle, wichtiger sind die Veränderungen der solaren Strahlung beim Durchgang durch die Atmosphäre. Etwa 30% der Strahlung werden durch Wolken, Staub, Schnee- und Eisflächen direkt in den Weltraum zurückreflektiert. Von den restlichen 70% werden 19% durch die in der Atmosphäre vorhandenen Gase und durch Wolken absorbiert.

2.1 Energiebilanz in polaren Regionen

Die lokale Energiebilanz jedoch kann völlig unterschiedlich aussehen. In den Sommermonaten der jeweiligen Hemisphäre stellt die Sonne den polaren Regionen ununterbrochen kurzweilige solare Strahlung zur Verfügung. Gekoppelt an die Beleuchtungsverhältnisse ist auch der Strahlungshaushalt in den hohen Breiten. Während der Wintermonate findet im Gegensatz zu den Sommermonaten ein kontinuierlicher Strahlungsverlust statt, da hier die Sonne nicht über den Horizont hinaufsteigt und somit auch keine Energie liefern kann.

Da aber ein Großteil der kurzweiligen Strahlung durch die Eisflächen wieder zurück in den Weltraum reflektiert wird, bleibt die Energiebilanz durch Ein- und Austrahlung negativ. Die Atmosphäre gleicht dieses Ungleichgewicht durch den Wärmetransport von niederen Breiten zu den Polen aus.

2.2 Strahlung

Bei einer Strahlungstemperatur von ca. 6000 K gibt die Sonne in allen Wellenlängen des Spektrums ihre Energie ab. Der größte Teil der elektromagnetischen Strahlung erreicht in einem Wellenlängenbereich von $0.29 \mu\text{m}$ bis $4 \mu\text{m}$ in kürzester Zeit die ca. 150 Millionen Kilometer entfernt gelegene Erde. Durch Kernfusion aus den dicht gedrängten Atomkernen des Wasserstoffs entsteht im Zentrum der Sonne Helium. Aus diesem Prozess bezieht die Sonne ihre Energie, die sie an der etwa 350 km dicken Schicht der Photosphäre durch Strahlung wieder abgibt. Die entstandene Strahlung breitet sich in weniger als 8 Minuten bis zur Erdatmosphäre mit der Lichtgeschwindigkeit von $2.9979 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ aus.

Das Spektrum der solaren Strahlungsflussdichte kann durch die Plancksche³ Strahlungskurve beschrieben werden. Es beschreibt die Verteilung der Intensität des Strahlungsflusses.

²Rückstrahlvermögen einer Oberfläche aufgrund seiner Helligkeit

³Planck war ein deutscher Physiker Nobelpreisträger und Begründer der Quantenphysik

ses eines schwarzen Körpers auf das Spektrum der abgestrahlten Wellenlängen (siehe Abb. 2.2).

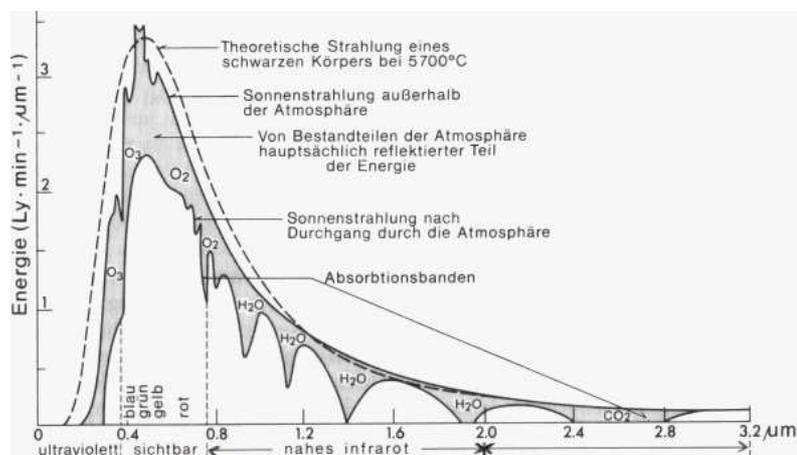


Abbildung 2.2: Plancksche Strahlungskurve und die unterschiedlichen Absorptionsbanden. (Quelle: <http://physics.schooltool.nl/irspectroscopy/images/>)

Um die gesamte Ausstrahlung eines Körpers zu berechnen, müssen die Beiträge der einzelnen Wellenlängen aufsummiert werden. Die Fläche unter der Planckschen Kurve kann somit als gesamte abgestrahlte Energie gedeutet werden. Für die Strahlungsleistung P eines schwarzen Körpers⁴ mit der Fläche A , der die absolute Temperatur T emittiert, erhält man:

$$P = A \cdot \sigma \cdot T^4 \text{ [W]} \quad (2.1)$$

Gleichung (2.1) ist das *Stefan Boltzmann Gesetz*⁵ mit der Naturkonstante σ von Stefan und Boltzmann:

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ [W/m}^2\text{K}^4\text{]} .$$

Somit ist die Strahlungsleistung eines Körpers proportional zur 4. Potenz seiner Temperatur. Das *Stefan Boltzmann Gesetz* gilt allerdings nur für *schwarze Körper*.

Der Wellenlängenbereich der solaren Strahlung lässt sich üblicherweise in folgende Bereiche einteilen:

- ultraviolette Strahlung (0,29 – 0,4 μm),
- sichtbare Strahlung (0,4 – 0,73 μm),
- infrarote Strahlung (0,73 – 4 μm).

⁴Schwarze Körper sind Körper, deren Emissions- und Absorptionsvermögen = 1 ist. Die Sonne kann annähernd als schwarzer Körper betrachtet werden. Siehe dazu auch Gleichung 2.5

⁵Josef Stefan war ein Mathematiker und Physiker aus Kärnten. Ludwig Boltzmann war ein Physiker und Philosoph aus Österreich

Das Strahlungsmaximum der Sonne liegt mit etwa $0,55 \mu\text{m}$ im grün-blauen sichtbaren Bereich und kann mit dem *Wienschen Verschiebungsgesetz*⁶ (Gleichung 2.2) berechnet werden. Leitet man das Plancksche Strahlungsgesetz nach der Frequenz ab, so erhält man die Wellenlänge oder Frequenz bei der die größte Strahlungsleistung eines, nach dem Planckschen Gesetz, strahlenden *schwarzen Körpers* abgegeben wird. Mit kleiner werdender Temperatur des strahlenden Körpers verschiebt sich das Strahlungsmaximum zu größeren Wellenlängen:

$$\lambda_{max} = a/T; \quad (2.2)$$

$$a = 2897,8 \mu\text{m}$$

Hierbei ist λ_{max} die Wellenlänge mit der größten Strahlungsintensität und T die absolute Temperatur der strahlenden Fläche in Kelvin.

2.2.1 Eigenschaften der Strahlung

Durch Absorption wird die ankommende solare Strahlung in langwellige Wärmeenergie umgewandelt. Im kurzwelligeren Bereich der Sonnenstrahlung sind im Wesentlichen 3 Gase wirksam: Ozon, Kohlendioxid und Wasserdampf (siehe Abb. 2.2). Das sichtbare Spektrum der Sonne kann die Atmosphäre vergleichsweise gut passieren, im Gegensatz zum infraroten Teil. Dort werden durch Kohlendioxid und insbesondere durch die Absorptionsbanden des Wasserdampfes bei mehreren Wellenlängen, erhebliche Strahlungsmengen absorbiert.

Unter Streuung versteht man einen Vorgang, bei dem Materie die Strahlung in andere Richtungen umverteilt. In der Atmosphäre wird die Sonnenstrahlung an Luftmolekülen oder Dunst- und Wolkentröpfchen gestreut. Aufgrund der Wellenlängenabhängigkeit der Streuung werden kürzere Wellenlängen an Luftmolekülen stärker gestreut als längere Wellenlängen. Ist der Durchmesser der streuenden Teilchen im Vergleich zur Wellenlänge der gestreuten Strahlung klein (nicht größer als 10 bis 20% der Lichtwellenlänge wie z.B. Luftmoleküle), spricht man von der Rayleigh⁷-Streuung. Diese beschreibt die Streuung z.B. an Luftmolekülen, die dem Himmel auch die blaue Farbe verleiht.

Für den Rayleigh-Streukoeffizienten α_s ergibt sich [DWD(1987)]:

$$\alpha_s = const \cdot \lambda^{-4} . \quad (2.3)$$

Somit wird blaues Licht mit einer Wellenlänge von ($\lambda = 0,4 \mu\text{m}$) etwa 16 mal stärker gestreut, als rotes Licht ($\lambda = 0,8 \mu\text{m}$). Aufgrund dieser Tatsache erscheint der Himmel für

⁶Wien, war ein deutscher Physiker und erforschte vor allem die Gesetzmäßigkeiten der Wärmestrahlung. 1911 erhielt er dafür den Nobelpreis für Physik.

⁷J.W.Rayleigh, englischer Physiker, erhielt 1904 den Nobelpreis für Physik für die Bestimmung der Dichte der wichtigsten Gase und für die Entdeckung des Argons

uns am Abend rot. Auf dem langen Weg den die Sonnenstrahlung bei tiefen Sonnenständen zurücklegen muss, wird das blaue Licht herausgestreut, sodass nur noch der Rotanteil übrig bleibt. Die Streuung der Strahlung erfolgt auch nach oben in den Weltraum und lässt die Erdatmosphäre auf Satellitenbildern bläulich schimmernd erscheinen.

Ist die Teilchengröße nicht mehr klein gegen die Wellenlänge der einfallenden Strahlung, verliert die Rayleigh-Streutheorie ihre Gültigkeit. Die *Mie-Theorie*⁸ beschreibt die Streuung von Licht an größeren sphärischen Teilchen wie Wolkentröpfchen (siehe Gl. 2.4 [DWD(1987)]). Die Wellenlängenabhängigkeit verschwindet für Partikelradien mit $r > 10 \mu\text{m}$, das an ihnen gestreute Licht ist weiß. Der Streukoeffizient lautet in diesem Fall:

$$\alpha_s = \text{const} \cdot \lambda^{-1,3} . \quad (2.4)$$

Sobald die Streukörper nicht mehr kugelförmig sind, kann auch die Mie-Theorie nicht mehr angewandt werden. Nichtsphärische Teilchen sind zum Beispiel Eiskristalle in Cirrus-Wolken, Ruß- und Staubteilchen oder auch hinreichend große Wassertröpfchen. Die Streuung an solchen Partikeln folgen den Gesetzen der geometrischen Optik. Sie ist dann anwendbar, wenn die mit dem Licht wechselwirkenden Objekte sehr viel größer als die Wellenlänge des einfallenden Lichtes sind.

Der Quotient des von einer Oberfläche reflektierten Anteils der auftreffenden Strahlung und der einfallenden Globalstrahlung⁹ wird als Reflexionsvermögen oder auch Albedo bezeichnet. Wolken, Schnee und Eis besitzen somit hohe Albeden. Die Albedo der Wolken ist abhängig von Wassergehalt und Dicke der Wolke. Ist der Wassergehalt groß, kann die Albedo sehr hohe Werte annehmen. Cumuluswolken können einen Albedo von 0,1 haben, Cumulonimbus dagegen einen Wert von 0,7.

Die Oberflächenalbedo von Schnee kann stark variieren. Sie ist abhängig von einer Anzahl an Komponenten, wie z.B. dem Alter und Gehalt der Verschmutzung von Schnee, vom Zenitwinkel der einfallenden Strahlung und von den Wolkenverhältnissen, für spektral durchschnittliche Albeden [Shine(1984)]. In der folgenden Tabelle sind einige typische Werte von Oberflächenalbeden aufgeführt:

Oberflächenart	Albedo (Harder 1996)
offener Ozean	0,10
Meereis (trocken)	0,65
Meereis (feucht)	0,60
Schnee (trocken)	0,80
Schnee (feucht)	0,70

Die Albedo des Ozeans liegt zwischen 0,03 und 0,25 [DWD(1987)], ist abhängig vom Stand der Sonne und nimmt vom Äquator in Richtung Norden mit flacher werdendem

⁸Gustav Adolf Feodor Wilhelm Ludwig Mie, deutscher Physiker

⁹Unter Globalstrahlung versteht man die gesamte an der Erdoberfläche auftreffende Solarstrahlung. Sie setzt sich zusammen aus der von der Sonne gesandten direkten Strahlung und der an Wolken Wasser- und Staubteilchen gestreuten diffusen Strahlung.

Einfallswinkel zu. Das Reflexionsvermögen entscheidet darüber, welche Energiemenge von einem Körper tatsächlich absorbiert wird und in den Energiehaushalt einbezogen werden kann und ist somit von großer Bedeutung.

Zwischen den drei Größen Transmission τ , Absorption α und Reflexion ρ besteht folgender Zusammenhang:

$$\alpha + \rho + \tau = 1. \quad (2.5)$$

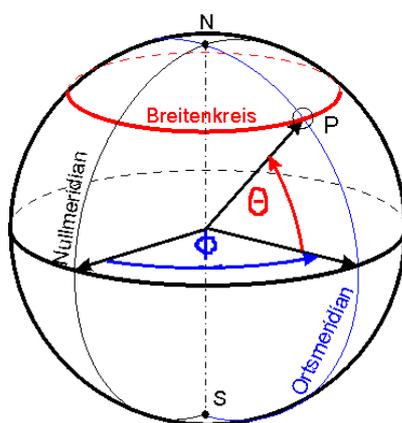


Abbildung 2.3: Koordinaten des Sonnenstandes, θ = Sonnenzenitwinkel und ϕ = Azimutwinkel (Quelle: http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph12/grundwissen/12himmelskugel (modifiziert))

Der Sonnenzenitwinkel Θ (siehe Abb. 2.3) hat den bedeutendsten Einfluss auf die ankommende solare Strahlung am Erdboden. Θ ist eine Funktion aus Zeit, julianischem Tag und geographischer Breite. Der Zenitwinkel wird auch anhand des Sonnenhöhenwinkels γ wie folgt definiert und nach Gleichung 2.7 berechnet:

$$\Theta = 90^\circ - \gamma \quad (2.6)$$

mit

$$\cos \Theta = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos h \quad (2.7)$$

Hierbei ist die geographische Breite durch ϕ gegeben, der Deklinationswinkel¹⁰ δ gibt den Winkel an, den der Sonnenstrahl zum Erdmittelpunkt mit der Äquatorebene einschließt und der Stundenwinkel h gibt die Position eines Himmelskörpers bezüglich des Meridians an (Maß für die Ortszeit). h variiert im Laufe eines Jahres und stellt keine Konstante dar. Bei Sonnenauf- oder untergang, ausgenommen Nord- und Südpol ist $\cos(\Theta) = 0$. Um 12 Uhr mittags Lokalzeit ist an jeder Breite $\cos(h) = 0$.

¹⁰der Deklinationswinkel ändert sich zwischen $-23,5^\circ$ am 21. Dezember und $+23,5^\circ$ am 21. Juni

2.2.2 Strahlungserhöhung

Unter Strahlungserhöhung versteht man einen Anstieg der solaren Strahlung über den Wert, der bei einem wolkenfreien Himmel messbar ist.

Bei durchbrochener Bewölkung (Schönwetter-Cumulus) kann es zu dem sogenannten *Broken Cloud Effekt* kommen. Die diffuse solare Strahlung trifft dabei an den Wolkenrändern auf und wird zum Erdboden gestreut. Eine hohe Albedo des Bodens kann diesen Effekt verstärken. Trifft die von der Sonne ausgehende Strahlung direkt auf den Boden, wird sie dort aufgrund der hohen Albedo reflektiert. Die reflektierte Strahlung wiederum wird von den Wolken reflektiert, auch wenn sie sich nicht in direkter Umgebung zur Sonne befinden. Dieser Effekt führt dann zu einer Erhöhung der kurzwelligen Strahlung am Boden.

Zum größten Teil führt eine cumulusartige Bewölkung in den tieferen Schichten der Troposphäre oder Altocumulus in den oberen Schichten zu diesen Erhöhungen. Zusätzlich zur direkten kurzwelligen Strahlung wird also die diffuse Strahlung erhöht, die aus der Streuung an den Wolken resultiert.

Die Strahlungsanstiege können teilweise bis zu mehreren Minuten andauern und spielen damit auch eine Rolle im Energiehaushalt der Erde.

2.2.3 Langwellige Strahlung

98% der absorbierten kurzwelligen Sonnenstrahlung werden als infrarote Strahlung wieder von der Erdoberfläche abgegeben. Dies ist die Ausstrahlung der Oberfläche. Sie wird teilweise an den Wolken absorbiert und damit zur Erdoberfläche zurückemittiert (77%). Dieser Teil wird als Gegenstrahlung bezeichnet. Es gelangt also nur ein Teil der Ausstrahlung der Erdoberfläche tatsächlich in den Weltraum (21%). Dieser Teil ist die effektive Ausstrahlung. Die Gegenstrahlung bewirkt den natürlichen Treibhauseffekt und damit die Aufrechterhaltung der 15° C Durchschnittstemperatur auf der Erdoberfläche.

2.3 Wolken

Wolken spielen eine wichtige Rolle in unserem Energiehaushalt, sowohl im kurzwelligen als auch im langwelligen Bereich der solaren Strahlung. Sie sind Kondensationsprodukte aus Wasserdampf. Bei niedrigeren Temperaturen können sie teilweise aus Eiskristallen bestehen, bei Temperaturen unter -35°C bestehen Wolken meist nur noch aus Eiskristallen. Sie beeinflussen unser Klima auf unterschiedliche Weise.

Abbildung 2.4 zeigt eine schematische Darstellung des Effekts, den Wolken auf das Erdklima haben. Allgemein haben hohe dünne Wolken einen erwärmenden und helle tiefe Wolken einen abkühlenden Effekt auf die Erde [DWD(1987)]. Aufgrund der geringen optischen Dicke der hohen Wolken lassen diese die kurzwellige Strahlung quasi ungehindert hindurch. Wegen ihrer kalten Wolkenoberkanten strahlen sie sehr viel weniger langwellige Strahlung in den Weltraum ab, als tiefere und dadurch wärmere Wolken.

Diese sind wiederum optisch dicker und reflektieren an ihren hellen Wolkenkanten einen Großteil der kurzwelligen solaren Strahlung.

Die Erde strahlt ununterbrochen im langwelligen Bereich Strahlung ab. Wolken absorbieren diese Strahlung, emittieren einen Teil in den Weltraum, einen anderen Teil aber senden sie wieder zurück und erwärmen unseren Planeten.

Bei der Wolkenbildung wird latente Wärme freigesetzt und somit die thermische Schichtung der Atmosphäre verändert. Aus ihrer Entwicklung und Form kann man den Schichtzustand (Stabilität) der Atmosphäre erkennen. Wolken sind verantwortlich für den Niederschlag, der die Albedo des Bodens und damit auch den Strahlungshaushalt verändert.

Im Gegensatz zu vielen anderen Gebieten der Erde wirken Wolken in polaren Regionen eher erwärmend auf die Oberfläche, abgesehen von einer kurzen Zeit im arktischen Sommer, wenn die Oberflächenalbedo klein genug und der Sonnenstand groß genug ist [Schweiger(2007)].



Abbildung 2.4: Effekt der Wolken auf die Strahlung. (Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Treibhauseffekt>)

2.3.1 Wolkenarten

In manchen Gebieten der Erde treten bestimmte Wolkenarten häufiger auf, dennoch können die meisten Wolkenarten fast überall entstehen. Wolken können auch Merkmale einer bestimmten Wetterlage sein, und es lassen sich auch Aussagen über die Wetterentwicklung machen.

Man unterscheidet die Wolken entsprechend ihrer Entstehung in Konvektions- und Advektionswolken. Konvektionswolken entstehen durch den vertikalen Aufstieg von Luftmassen. Es muss eine wärmende Quelle, wie die Sonne, vorhanden sein, dazu Wasser und eine labil geschichtete Atmosphäre. Beim Erwärmen des Bodens steigt eine Thermikblase auf, die sich ausdehnt und dabei bis zum Taupunkt abkühlt. Je nach Wasserdampfgehalt und Temperatur der Luft erreicht das Luftpaket früher oder später den Taupunkt. Ist das sogenannte Cumuluscondensationsniveau erreicht, entstehen konvektive

Wolken mit einer großen vertikalen Ausdehnung. Um das Wachstum der Wolke voranzutreiben, wird Energie benötigt, die durch Kondensation des Wasserdampfes frei wird. Bei der Kondensation entsteht Wärme die das erforderliche Abkühlen bei der Ausdehnung reduziert. Je kälter die Luft, desto weniger Wasserdampf ist in ihr enthalten und das Wolkenwachstum kommt zum Stillstand.

Advektionswolken oder auch stratiforme Wolken entstehen in einer stabil geschichteten Atmosphäre durch Hebungsprozesse. Dies geschieht dann, wenn feuchte Luftmassen in ihrer Horizontalbewegung durch ein Gebirge oder durch kalte, schwere Luftmassen zum Aufstieg gezwungen werden. Durch diesen langsamen Aufstieg können sich die Luftmassen ausbreiten, daher spricht von Schichtwolken. Sie sind eher flach, langgezogen und vertikal weniger mächtig.

Allgemein werden Wolken nach ihrer Form klassifiziert. Man unterscheidet zwischen 10 grundlegend verschiedenen Wolkenformen, die sich auf drei Wolkenstockwerke verteilen. Die tiefen, mittelhohen und hohen Wolken werden je nach Höhe ihrer Untergrenze definiert. Sie können vertikal unterschiedlich mächtig sein. Die Höhe der Tropopause spielt hierbei eine entscheidende Rolle. Da die Lufttemperaturen vom Äquator zum Pol hin abnehmen, nimmt auch die Tropopause an Höhe ab und Wolken können am Pol nicht in so große Höhen vorstoßen.

Wolkenhöhe	polare Region	mittlere Breiten	Äquator
Hoch	3 – 8 km	5 – 13 km	6 – 18 km
Mittelhoch	2 – 4 km	2 – 7 km	2 – 8 km
Tief	0 – 2 km	0 – 2 km	0 – 2 km

Das obere Wolkenstockwerk wird durch die Tropopause begrenzt. Das untere Stockwerk ist im wesentlichen die planetarische Grenzschicht. Zum obersten Stockwerk zählen die Wolkenformen der Cirrus-Familie. Diese sind Eiskristalle und werfen keinen oder nur kaum Schatten. Ihre Erscheinung ist federartig, meist in Bändern oder Streifen angeordnet. An ihren Rändern finden sich oft Haken oder Verwirbelungen. Eine weitere Wolkenform sind die Cirrocumuli, die in Gruppen oder Streifen angeordnet sind.

Der Cirrostratus ist im Vergleich zu den übrigen Wolkenarten eher selten. Hierbei kann sich das Licht der Sonne in dem weißen Schleier aus Eiskristallen brechen und zu optischen Erscheinungen wie Halos oder Nebensonnen führen. Im mittleren Stockwerk bilden Altostratuswolken eine horizontal ausgebreitete Wolkenschicht, die die Sonne nur diffus erscheinen lässt. Altocumuluswolken bilden eher eine Haufenform von grauen Flecken oder Ballen, die meist größer sind als Cirrocumuli.

Nimbostratus ohne einheitliche Wolkenuntergrenze, mit dunkler bis grauer Färbung, ist in den unteren Stockwerken zu finden. Dieser Wolkentyp ist auch meistens für den Regen verantwortlich. Stratuswolken sind gräulich und horizontal mächtig. Aus ihnen kann im Gegensatz zum Nimbostratus eher kleintröpfiger Regen fallen.

Cumulus oder Cumulonimbuswolken lassen sich nicht einem Stockwerk zuordnen, da sich ihre vertikale Ausdehnung von 1600 m bis zu 13 km erstrecken kann. Cumuluswol-

ken besitzen meist flache Unterseiten und blumenkohlartige Oberseiten. Cumulonimbuswolken sind dunkle, mächtig aufgetürmte Haufenwolken. Die höchsten Anteile dieser Wolke sind oft amboßartig ausgebreitet. Aus ihnen fallen schwere Regenschauer, die in einigen Fällen von Gewittern begleitet werden.

Von den drei Hauptluftmassen der Atmosphäre ist die *Polarluft* die stabilste. Wegen der niedrigen Temperatur vermag die Polarluft nur wenig Wasserdampf aufzunehmen. Über dem Eis der Arktis und Antarktis herrscht daher im Allgemeinen eine geringere Luftfeuchtigkeit, als über den offenen Ozeanen. Da auch das Meereis als Isolator zwischen der Oberfläche des Ozeans und Atmosphäre fungiert, gibt es hier meist etwas weniger Wolken als über dem offenen Ozean.

2.3.2 “Diamond Dust”

Abgesehen vom Cirrostratus gibt es noch eine weitere Möglichkeit zur Entstehung von Halos. Das meteorologische Phänomen des “Diamond Dust” ist eine Form von Niederschlag aus einem wolkenfreien Himmel. Es tritt häufig in den Wintermonaten, in hohen Breitengraden, bei sehr niedrigen Temperaturen und bei Vorhandensein einer starken Oberflächentemperaturinversion auf. Unter diesen Bedingungen wird der Wasserdampf durch Diffusion auf langsam fallenden Aerosolpartikeln deponiert und im Laufe einiger Stunden bilden sich durch extrem langsames Depositions-Diffusionswachstum diese Niederschlagsteilchen.

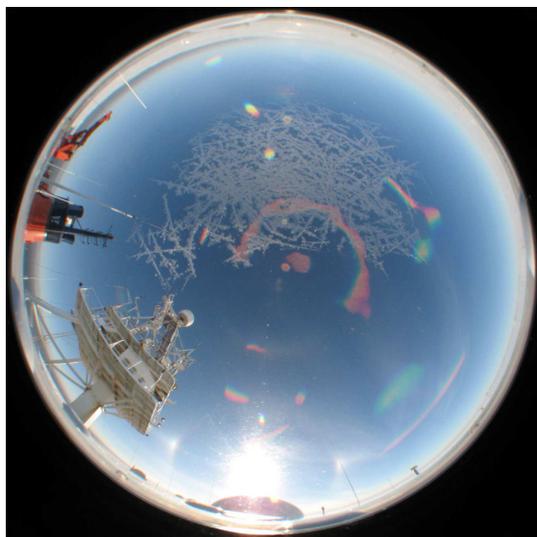


Abbildung 2.5: Sonne mit Nebensonnen und angedeutetem Halo. Aufgenommen am 18.12.2008 um 5.46 Uhr von der Wolkenkamera an Bord der FS Polarstern

Dieser Niederschlag ist so fein, dass man ihn kaum sehen kann, außer im Gegenlicht, wenn die Eiskristalle flimmern. Die Streuung von Licht aufgrund dieser winzigen Kristalle kann erhöht werden und Halos können entstehen [Lesins et al.(2009)]. Halos sind

Lichteffekte, die durch Reflexion und Brechung des Lichts an Eiskristallen entstehen. Der 22 ° Halo tritt am häufigsten auf. Er entsteht an zufällig orientierten Kristallen. Nebensonnen treten oft zusammen mit dem 22 °-Ring auf. Sie entstehen aufgrund von waagrecht schwebenden Eisplättchen.

Schon frühe Messungen (Witte, 1986; Overland and Guest, 1991; Curry et al. 1996) zeigten, dass Eiskristalle die langwellige, nach unten gerichtete Strahlung um bis zu 80 W/m^2 erhöhen können [Lesins et al. (2009)]. Diese Werte benötigen allerdings eine hohe optische Dicke von Eiskristallen und eine starke Temperaturinversion, so dass viele Eiskristalle bei einer höheren Temperatur bestehen bleiben können als die Oberfläche sie hat.

2.4 Bedeutung der polaren Gebiete für die Erde

Den polaren Gebieten der Ozeane unserer Erde wird eine ganz besondere Bedeutung zugeschrieben. Etwa 1500 km von der antarktischen Küste entfernt findet man den antarktischen Zirkumpolarstrom der den Kontinent ostwärts umströmt. Obwohl die Trennung der warmen und kalten Wassermassen durch den Strom die Antarktis völlig isolieren können, geschieht im südlichen Ozean ein wichtiger Austausch zwischen kaltem Küstenwasser und wärmeren aus den mittleren Breiten kommendem Wasser.

Auch ein Teil des Antriebs unseres globalen Umwälzsystemes befindet sich in den Polarregionen. Bei der Bildung von Meereis wird Salz in die Deckschicht eingetragen. Kombiniert mit dem Abkühlen durch die kalte Atmosphäre wird die Dichte des Wassers so weit erhöht, dass die Schichtung des Ozeans instabil wird und das Wasser teilweise bis zum Boden absinken kann. Während des Absinkens gelangt oberflächennahes sauerstoffreiches Wasser in die Tiefe. Hier speist der antarktische Zirkumpolarstrom das globale Förderband, welches das Erdklima reguliert, indem es den Wärmeaustausch zwischen den Polen und den Tropenregionen ermöglicht, mit dem Wasser, das Richtung Norden transportiert wird. Dabei erwärmt es sich, steigt auf, wird im Nordatlantik erneut abgekühlt und sinkt schließlich ab. Anschließend fließt es wieder Richtung Süden um so den Kreislauf zu schließen. Die Bildung von Meereis ist also erheblich an der globalen Ozeanzirkulation beteiligt.

Das Hauptmerkmal des polaren Klimas ist die strenge Kälte und ihre Dauer. Ein weiteres Merkmal sind die auftretenden katabatischen Winde, die ausgehend von der Mitte des Inlandeises wehen, während sie von der Flanke der Eiskappe herunterstürzen und bis zur Küste eine große Kraft entfalten können (in der Antarktis gemessene Rekordgeschwindigkeit: 320 km/h). Diese können im Winter das Packeis auseinander brechen lassen.

Die Polarregionen der Erde sind trotz der unwirtlichen Lebensbedingungen sehr sensible Ökosysteme, die durch die Klimaerwärmung stärker bedroht sind als andere Regionen der Erde. Messungen haben gezeigt, dass die Temperaturen am Nordpol zwei- bis dreimal schneller ansteigen, als in den übrigen Gebieten. Daher stellt es so etwas wie ein Frühwarnzentrum dar.

2.5 Meereis

Bei einer Wassertemperatur von unter $-1,8^{\circ}\text{C}$ bilden sich millimetergroße Eiskristalle, die sich an der Wasseroberfläche sammeln und zu einer Eisdecke gefrieren. Da nur die Wassermoleküle im Prozess des Einfrierens in den Kristallverbund eingebaut werden, bleiben größere Salzionen im Wasser zurück und lassen den Salzgehalt des Wassers ansteigen.

Das Meereis der Arktis wird unter heutigen Klimabedingungen wenige Dezimeter oder Meter dick. Es bildet daher nur eine dünne Haut auf dem Arktischen Ozean, die leicht durch Winde und Meeresströmungen bewegt und dabei auch aufgerissen werden kann. Regional und lokal kann das Eis infolgedessen unterschiedlich dick sein. Das dickste Eis befindet sich dort, wo es durch Eisdrift zusammengeschoben wird und nicht wo die tiefsten Temperaturen herrschen. Somit kann man die Eisdicke auch mit den in der Arktis und Antarktis herrschenden Windsystemen in Verbindung bringen.

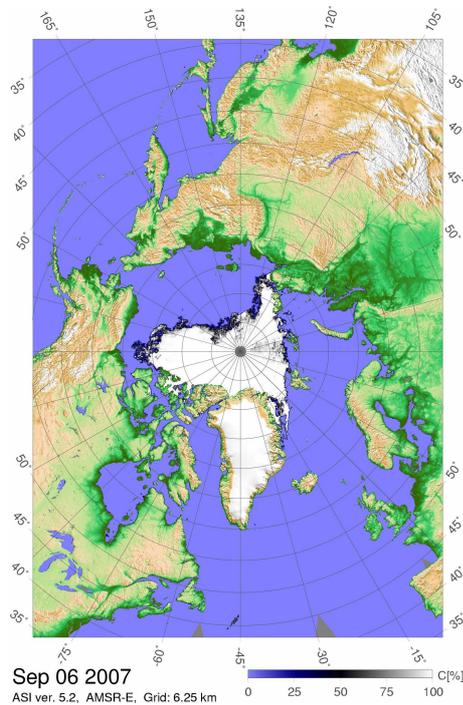
Da das Meereis meistens durch Schnee bedeckt ist, besitzt es eine entsprechend hohe Albedo im sichtbaren Spektralbereich. Das Rückstrahlvermögen von 60 - 90 % führt dazu, dass die solare Strahlung größtenteils wieder zurückreflektiert wird. Im infraroten Bereich verhält sich das Meereis allerdings annähernd wie ein schwarzer Körper. Der Verlust an Energie¹¹ des Meereises ist immer höher als der Gewinn durch die solare Strahlung, die durch die hohe Albedo ohnehin gering ausfällt.

Ein weiterer, wichtiger Effekt des Meereises ist die isolierende Wirkung im Wärmeaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre. Gerade in polaren Regionen ist die Temperaturdifferenz zwischen dem Ozean, der Gefrierpunktemperatur besitzt, und der Atmosphäre, die beispielsweise am Nordpol im Winter kälter als -30°C ist, sehr groß. Der Wärmefluss vom Ozean in die Atmosphäre kann hier mehrere hundert Watt pro Quadratmeter annehmen. Bereits eine dünne Meereisdecke modifiziert den Einfluss der solaren Strahlung und den Austausch latenter und fühlbarer Wärme zwischen Ozean und Atmosphäre erheblich. Durch die veränderte Oberflächenalbedo wird auch die solare Strahlung beeinflusst. Eine dicke, kompakte Eisdecke kann den Wärmefluss sogar um zwei Größenordnungen verringern [Harder(1996)].

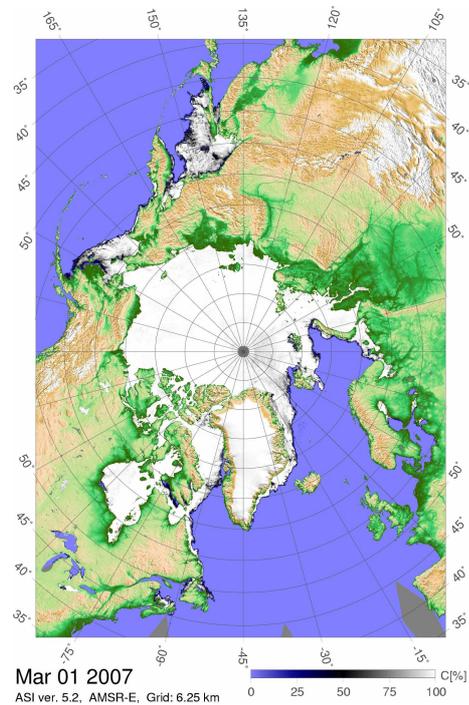
Im Unterschied zur Antarktis ist das Eis des Nordpolarmeeres größtenteils mehrjährig und bedeckt im Winter fast das gesamte Nordpolarmeer. Die Schwankungen der Eisausdehnung des Meereises in der Antarktis sind weit größer, als in der Arktis. Zwischen Winter und Frühjahr ist fast das gesamte Nordpolarmeer von Eis bedeckt (Abb. 2.6).

Das Meereis ist ein wichtiger Klimafaktor aufgrund der Bedeutung der Eis-Albedo-Rückkopplung auf die einfallende solare Strahlung. Daher ist vor allem in den letzten Jahren bei der Diskussion des Klimawandels das Interesse an den polaren Regionen stark gestiegen. Bei klimatischen Veränderungen reagiert das Meereis quasi unmittelbar und somit auch die Albedo der polaren Regionen und die daraus resultierenden Veränderungen der Strahlungsbilanz.

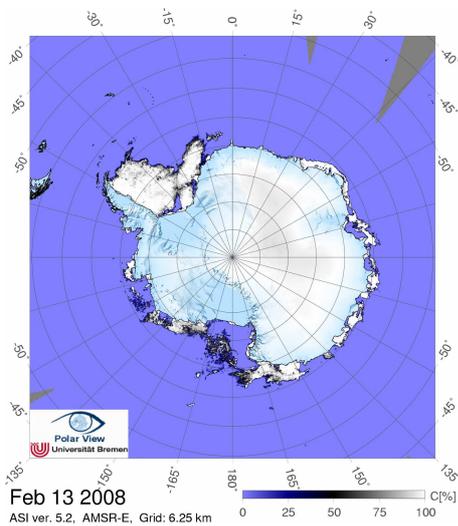
¹¹Das thermodynamische Schmelzen und Gefrieren des Meereises ist durch eine Energiebilanz bestimmt, in die Sonneneinstrahlung, thermische Abstrahlung sowie atmosphärische und ozeanische Wärmeflüsse eingehen (Quelle: <http://www.markus-harder.de/meereis-klima.html>).



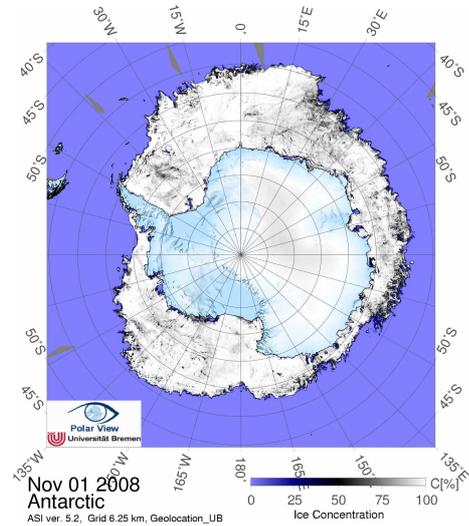
(a) September 2007, Eisminimum



(b) März 2007, Eismaximum



(c) Februar 2008, Eisminimum



(d) November 2008, Eismaximum

Abbildung 2.6: Beispiele der Eisminima und Eismaxima in der Arktis (oben) und in der Antarktis (Quelle: <http://www.seaice.de/>).

Kapitel 3

Strahlungsparametrisierungen

3.1 Parametrisierungen der kurzwelligen Strahlung

In dieser Arbeit werden Strahlungsparametrisierungen verwendet, die in der Wahl und Wichtung der Eingangsgrößen unterschieden werden. Der Strahlungstransport der Atmosphäre wird durch folgende Größen beeinflusst:

- Solarkonstante
- Einfallswinkel der Sonne
- Lufttemperatur
- relative Luftfeuchte
- Bedeckungsgrad der Wolken
- optische Dicke der Wolken
- Bodenalbedo
- Wolkenausdehnung und optische Dicke
- Wolkengattungen in den verschiedenen Höhen
- Vertikalstruktur der Luftfeuchte und der Temperatur
- Eigenschaften der Wolken (Wassergehalt, Einfachstrealbedo und Tropfenradius)

Parametrisierungen verwenden allerdings nur eine kleine Auswahl der oben vorgestellten Größen, da nicht alle immer zur Verfügung stehen. Die Eingangsgrößen der in dieser Arbeit vorgestellten Parametrisierungen der kurzwelligen Strahlung sind die Solar-konstante, Einfallswinkel der Sonne, Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und der Bedeckungsgrad der Wolken. Eine weitere Parametrisierung verwendet zusätzlich die Information der optischen Dicke der Wolken und die Bodenalbedo.

Der Bedeckungsgrad der Wolken wird normalerweise in Achteln angegeben, die Parametrisierungen jedoch verwenden diese Größe auf $[0,1]$ normiert. 0 steht dabei für einen wolkenfreien Himmel, bei 1 ist er voll bedeckt. In den folgenden Berechnungen und auch in den Grafiken wird die normierte Darstellung des Bedeckungsgrades eingehalten. Bei den Beschreibungen der Strahlungserhöhungen der einzelnen Tage werden Achtel benutzt, da dies die internationale Einheit für die Bewölkung ist.

Die genaue Vorhersage der kurzwelligen Flüsse an der Erdoberfläche ist besonders wichtig im Falle von Eis und schneebedeckten Gebieten. Der Auslöser für das Schmelzen oder Gefrieren des Wassers wird durch die Oberflächenenergiebilanz bestimmt. Im Gegenzug ist der Zustand der Oberflächenbedeckung mit dem Energiegleichgewicht über die Albedo gekoppelt. Während des Schmelzens dominiert die kurzwellige Komponente der Energiebilanz alle anderen Terme. Somit sollten alle meteorologischen Ermittlungen von mikrometeorologischen Studien der Vorhersage von Schnee- und Eisbedeckungen in *Global Circulation Models*, den GCMs diese kurzwelligen Flüsse richtig simulieren [Shine(1984)].

Polwärts der Polarkreise spielt der Sonnenstand eine entscheidende Rolle für die räumliche und zeitliche Verteilung der solaren Einstrahlung. Der Grund dafür sind die hier herrschenden niedrigen Sonnenstände und die damit verbundenen flachen Einfallswinkel der Sonne. Anders als z.B am Äquator trifft die Strahlung nicht senkrecht sondern schräg auf die Erdoberfläche bzw. auf Wolken etc. auf und verteilt damit ihr Angebot an solarer Strahlung auf ein viel größeres Gebiet. Nach dem Lambertschen Gesetz (Gleichung 3.1) besteht ein Zusammenhang zwischen dem Einfallswinkel α und der Strahlungsflußdichte J :

$$J = \sin\alpha \cdot J_0 \quad [W/m^2]. \quad (3.1)$$

J_0 ist hierbei die Strahlungsflußdichte, die auf eine senkrecht zur Ausbreitungsrichtung stehende Fläche trifft.

Durch die hohe Albedo des Meereises bzw. des Schnees werden außerdem in den Polarsommern die Tagessummen der solaren Einstrahlung verstärkt.

Bei der Mehrfachreflexion wird ein Teil der solaren Strahlung mehrmals zwischen Boden und der Wolkenunterseite reflektiert. Sie erhöht somit den Anteil der indirekten Einstrahlung durch die Wolken.

Die wichtigsten Faktoren, die die solare Einstrahlung bestimmen sind der Sonnenzenitwinkel Θ , die Solarkonstante S_0 , die Wolkenbedeckung, die optische Dicke und damit auch der Transmissionsfaktor T_w von Wolken. Die meisten Parametrisierungen verwenden Gleichung 3.2 als Basis für die Berechnungen der solaren Einstrahlung am Boden:

$$Q_0 = S_0 \cos \theta \quad [W/m^2] . \quad (3.2)$$

Q_0 beschreibt die solare Einstrahlung, die am Oberrand der Atmosphäre ankommt. Für die Einstrahlung am Boden kommt im wolkenfreien Fall die Transmissivität T_f der Atmosphäre hinzu. Somit ergibt sich für die nach unten gerichtete kurzwellige solare Strahlung Q_{sw} am Boden folgende Gleichung:

$$Q_{sw} = S_0 \cos \Theta \cdot T_f \quad (3.3)$$

Einer der ersten Versuche Q_{sw} zu parametrisieren stammt von Lumb [Lumb(1964)]. Der atmosphärische Transmissionsfaktor ist in seiner Parametrisierung vom Bedeckungsgrad, dem Sonnenstand und den vorherrschenden Wolkenarten abhängig. Diese teilte er in 9 unterschiedliche Kategorien ein, die sich jeweils in der optischen Dicke voneinander unterscheiden (siehe Tabelle 3.1).

Category	Criteria used for Classification	General description
1	Total amount of cloud ≤ 2 oktas	virtually clear sky
2	3 to 5 oktas C_L (excluding cases where showers were reported). Total amount of cloud 3 to 5 oktas	Well-broken low cloud with little or no medium or high cloud
3	6 to 8 oktas C_H (excluding $C_H 7$) with 0 to 4 oktas C_L	Large amounts of cirrus-type cloud (excluding $C_H 7$)
4	6 to 8 oktas C_M 3 or 6, As category 1 AC/As 7 with base $\geq 12,000$ ft. with 0 to 4 oktas C_L	Thin layers of medium cloud
5	$C_H 7$ with 0 to 4 oktas C_L	Veil of cirrostratus covering the whole sky
6	7 or 8 oktas C_L 5 or 8 without precipitation other than $ww = 80$. No rain reported at preceding or succeeding synoptic hour. (Also checked by reference to synoptic charts)	Large amounts of Sc , with or without some Cu and with little or no medium cloud
7	6 to 8 oktas C_M 2, C_M 7 (either with rain or with $C = 4$) with 0 to 4 oktas C_L also 7 or 8 oktas C_L if rain reported at next synoptic hour	Thick layers of medium cloud, with or without layers of St or Sc beneath
8	8 oktas C_M 2 or $C_L=6, 7$ with $ww = 50-59$	Thick layer of low cloud perhaps with layered medium cloud (usually accompanied by drizzle)
9	8 oktas C_M 2 or $C_L = 6, 7$ with $ww = 60-69$	Thick layers of low cloud; probably also thick layers of medium cloud (usually accompanied by rain)

Tabelle 3.1: 9 Wolkenkategorien nach Lumb (1964) C_L , C_M und C_H stehen dabei für tiefe, mittlere oder hohe Wolken

Der Anteil der solaren Strahlung der durch die Atmosphäre transmittiert wird, ist $f = a + bs$. s ist dabei das Mittel des Sinus von der Sonnenhöhe zwischen dem Anfang und dem Ende einer Stunde, a und b sind Konstanten die für die unterschiedlichen Wolkenkategorien empirisch ermittelt wurden.

Beispiele der Parametrisierung der kurzwelligen solaren Strahlung nach Lumb sind für den 20. und 23. Dezember 2008 in Abbildung 3.2 dargestellt, die entsprechenden Bilder mit den dazugehörigen Wolkenkategorien zeigt Abbildung 3.1.

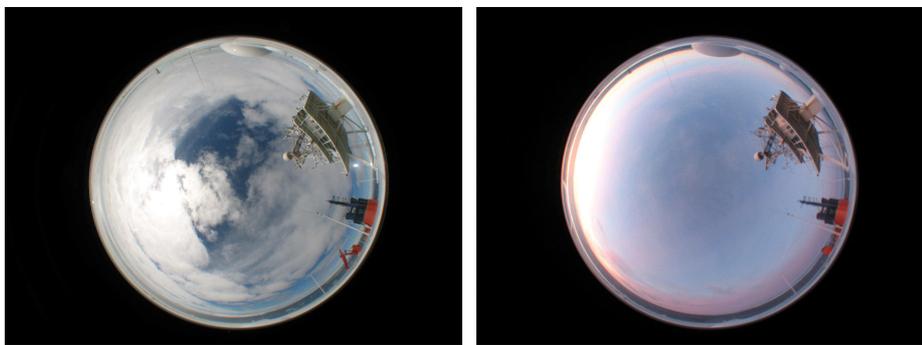
Abb. 3.1 (a) zeigt Kategorie 1, die für einen wolkenfreien Himmel steht. Eine dichte Wolken-schicht mit einem Bedeckungsgrad von 8/8 bedeckte den Himmel in Abb. 3.1 (b), welches der Kategorie 7 entspricht. Eine dünne Wolken-schicht mittelhoher Wolken mit einem Bedeckungsgrad von 6/8 erkennt man in Abb. 3.1 (c) (Kategorie 4). Abb. 3.1 (d) zeigt erneut Kategorie 1.

Für Abbildung 3.2 wurden 9 Bilder der Wolkenkamera zwischen 0 und 24 Uhr mit einem Abstand von 3 Stunden für einen Tag herausgesucht. Die Kurve der Parametrisierung für den 20.12.08 zeigt einen ähnlichen Verlauf wie die Kurve der gemessenen Einstrahlung.



(a) 20.12.08; 6:00 Uhr Kategorie 1

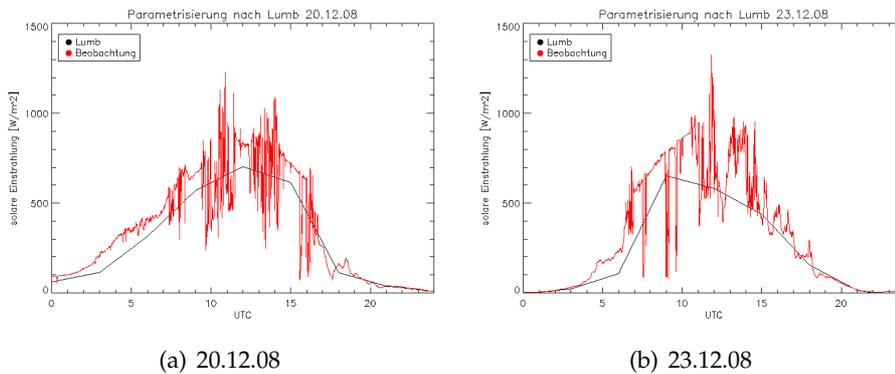
(b) 20.12.08; 21:00 Uhr Kategorie 7



(c) 23.12.08; 12:00 Uhr Kategorie 4

(d) 23.12.08; 24:00 Uhr Kategorie 1

Abbildung 3.1: Wolkenbilder der Expedition ANT-XXV/2 vom 20. und 23. Dezember 2008



(a) 20.12.08

(b) 23.12.08

Abbildung 3.2: solare Einstrahlung und ihre Parametrisierung nach Lumb

Auffällig ist, dass der starke Abfall der gemessenen Strahlung zwischen 16 und 18 UTC ebenfalls in der Parametrisierung wiederzufinden ist. Der Verlauf der Parametrisierung nach Lumb zeigt am 23. Dezember ebenfalls einen ähnlichen Verlauf zur Messkurve. Ein Nachteil dieser Parametrisierung ist, dass die 9 unterschiedlichen von Lumb bestimmten Wolkenkategorien nicht alle Varianten der Bewölkung enthalten.

Die Parametrisierung nach Lumb wird nicht in der vorliegenden Arbeit verwendet, da hier mit zeitlich hochaufgelösten Daten gearbeitet wird, aus denen die Wolkenart nicht automatisch hervorgeht und es nicht möglich ist eine große Anzahl an Wolkenfotos per Auge zu klassifizieren.

Im Folgenden werden die Parametrisierungen vorgestellt, die in dieser Arbeit angewandt wurden. Jedoch ist keine der Parametrisierungen für kontinuierliche Messungen entwickelt worden, obwohl schnell fluktuierende Strahlungsflüsse eine große Rolle auch für biologische und chemische Prozesse spielen [Kalisch und Macke(2008)] .

3.2 Kurzwellige Strahlungsparametrisierung nach Zillman

Die einfallende kurzwellige Strahlung wird in der von Zillman entwickelten Parametrisierung durch den Sonnenzenitwinkel, die Solarkonstante und den Wasserdampfgehalt in 2 m Höhe bestimmt. Wenn keine Feuchtedaten der Atmosphäre bei einem wolkenfreien Himmel verfügbar sind, ist es notwendig Annahmen der Feuchte durchzuführen. Diese geschieht anhand von Reduktionsfaktoren für die einfallende solare Strahlung. Die Transmissivität der wolkenfreien Atmosphäre setzt sich hierbei auf folgende Weise zusammen:

$$T_{f_zill} = \frac{\cos\theta}{\cos\theta + 2,7 p_w 10^{-3} + 1,085 \cos\theta + 0,1} \cdot \quad (3.4)$$

p_w ist der Partialdruck des Wasserdampfes in [hPa].

Parametrisierung nach Zillman für den wolkenfreien Fall

Für die Einstrahlung bei wolkenfreiem Himmel $Q_Z(0)$ folgt aus dem Transmissivitätsfaktor T_{f_zill} von Zillman und der Gleichung für die kurzwellige Einstrahlung Q_{sw} (Gleichung 3.3):

$$Q_Z(0) = Q_{sw} \cdot T_{f_zill} = \frac{S_0 \cos\theta}{\cos\theta + 2,7 p_w 10^{-3} + 1,085 \cos\theta + 0,1} \cdot \quad (3.5)$$

Parametrisierung nach Zillman für alle Bedeckungsgrade

Multipliziert man die Strahlungsparametrisierung für den wolkenfreien Fall $Q_Z(0)$ mit dem Reduktionsfaktor V_{wz} (Gleichung 3.7), der durch die Wolken entsteht, erhält man eine Strahlungsparametrisierung für alle Bedeckungsgrade:

$$Q_z(N) = Q_z(0) \cdot V_{wz} \cdot \quad (3.6)$$

Hier geht die Wolkenbedeckung mit der dritten Potenz in die Gleichung ein, welche somit eine nichtlineare Funktion des Bedeckungsgrades ist. Die Erweiterung der Parametrisierung von Zillman für den wolkenfreien Fall durch den Wolkenreduktionsfaktor V_{wz} stammt von Laevastu [Laevastu(1960)]:

$$V_{wz} = 1,0 - 0,6N^3 \quad , \quad (3.7)$$

mit dem Wolkenbedeckungsgrad N , auf $[0,1]$ skaliert.

Die Nichtlinearität des Bedeckungsgrades (siehe Gleichung 3.7) in der solaren Einstrahlung entspricht auch der Beobachtung des *Broken Cloud Effects*. Dort kann bei durchbrochener Bewölkung sogar mehr kurzweilige Strahlung den Boden erreichen als es bei unbewölktem Himmel der Fall ist (siehe Abschnitt 2.2.2).

In der Strahlungsparametrisierung nach Zillman werden die unterschiedlichen Wolkenkategorien nicht berücksichtigt. Somit eignet sie sich für die vorliegenden Datensätze, in denen die Information über die Wolkenkategorie fehlt bzw. nur sehr ungenau oder mit großen zeitlichen Abständen gemessen wurde.

3.3 Kurzweilige Strahlungsparametrisierung nach Shine

Bei der Parametrisierung für die solare Einstrahlung nach Shine, die speziell für hohe Breiten entwickelt wurde, sind die in der Formel berücksichtigte Bodenalbedo und die Wolkeneigenschaften hervorzuheben [Shine(1984)]. Das macht vor Allem in solchen Regionen Sinn, in denen die Bodenalbedo stark variieren kann. Außerdem fließt bei der Parametrisierung von Shine auch die Mehrfachreflexion zwischen dem Untergrund und der Wolkenunterseite mit ein. In den polaren Eisregionen kann die Albedo des Untergrundes mitunter sehr groß werden, sodass man hier von häufigen Mehrfachreflexionen ausgehen kann.

Das Reflexionsvermögen des Untergrundes wurde leider nicht an Bord der Polarstern gemessen. Da bei den Parametrisierungen nur Tage an denen sich das Forschungsschiff in Meereis befand betrachtet werden, wurde die Albedo der Parametrisierung auf 0,65 festgesetzt. Dies ist ein typischer Wert für trockenes Meereis. Es gab nur wenige Tage die das Schiff tatsächlich im Eis verbrachte, weshalb Schmelz- und Gefrierprozesse vernachlässigbar klein waren. Es wurde jedoch auch bei einigen Test-Berechnungen der Parametrisierung von Shine die Albedo und die optische Dicke der Wolken variiert um den Einfluss auf die Güte zu ermitteln.

Die optische Dicke τ (Gleichung 3.8) dient als Parameter für das Reflexions- und Transmissionsverhalten der Wolken und wird über den *LWP* (Der Liquid Water Path ist der Wassergehalt einer Luftsäule [g/m^2]) und den effektiven Tropfenradius r_e berechnet:

$$\tau = \frac{3}{2} LWP/r_e. \quad (3.8)$$

Da der *LWP* und r_e für hier verwendete Daten nicht ermittelt werden kann, wurde eine typische optische Dicke für Wolken über dem Meereis von $\tau = 15$ angenommen (Mittel-

wert aus ISCCP D2 Datensatz [Frerichs(1999)]. Diese wurde jedoch in späteren Versuchen variiert um bestmögliche Werte für die Parametrisierung zu erzielen.

Parametrisierung nach Shine für den wolkenfreien Fall

Zunächst wird die solare Einstrahlung bei wolkenfreiem Himmel berechnet. Für die Modellierung des wolkenfreien Himmels müssen ebenso wie für den wolkenbedeckten Himmel einzelne Faktoren wie Rayleigh Streuung und die Absorption durch Ozon und Wasserdampf berücksichtigt werden. Die Parametrisierung für den wolkenfreien Fall basiert auf der Gleichung von Zillman. Diese wurde wegen einer Unterschätzung des kurzwelligen Strahlungsflusses um ca. 20 W/m^2 [Shine(1984)] modifiziert, sodass sich folgende Gleichung ergibt:

$$Q_S(0) = Q_{sw} \cdot T_{f_shine} = \frac{S_0 \cos^2 \theta}{(1,2 \cos \theta) + (1,0 + \cos \theta) 10^{-3} p_w + 0,0455} , \quad (3.9)$$

mit dem modifiziertem Transmissionsfaktor von Zillman:

$$T_{f_shine}(0) = \frac{\cos \theta}{(1,2 \cos \theta) + (1,0 + \cos \theta) 10^{-3} p_w + 0,0455} . \quad (3.10)$$

Parametrisierung nach Shine für total bedeckten Himmel

Für den total bedeckten Himmel wählte Shine einen etwas anderen Weg als Zillman. Im Gegensatz zu Zillman, der zuerst einen Reduktionsfaktor definierte, entwickelte Shine eine Strahlungsparametrisierung für den vollständig bedeckten Himmel (Gleichung 3.11). Hier gehen nun zusätzlich die optische Dicke der Wolken τ und die Albedo des Untergrundes mit α_u ein:

$$Q_S(1) = \frac{(53,5 + 1274,5 \cos \theta) \sqrt{\cos \theta}}{1,0 + 0,139(1,0 - 0,9345 \alpha_u) \tau} . \quad (3.11)$$

Strahlungsparametrisierung nach Shine für alle Bedeckungsgrade

Durch Kombinieren des Wolkenbedeckungsgrades mit der Parametrisierung der solaren Strahlung bei vollbedecktem und unbewölkttem Himmel ergibt sich die Strahlungsparametrisierung für alle Bedeckungsgrade (Gleichung 3.12). Die Einstrahlung ist eine lineare Funktion des Wolkenbedeckungsgrades N :

$$Q_S(N) = (1,0 - N) \cdot Q_S(0) + N \cdot Q_S(1) . \quad (3.12)$$

Die Reduktion der solaren Einstrahlung am Boden aufgrund der Wolken (V_{ws}) ergibt sich aus der Division der Gleichung 3.12 durch Gleichung 3.9:

$$V_{ws} = \frac{Q_S(N)}{Q_S(0)} = (1.0 - N) + N \cdot Q_S(1)/Q_S(0) . \quad (3.13)$$

3.4 Kurzweilige Strahlungsparametrisierung nach Bennett

Von Bennett entwickelt, wurde diese Strahlungsparametrisierung (Gleichung 3.15) in ein Meereismodell eingebaut [Bennett(1982)]. Die gegenseitige Beeinflussung von Atmosphäre und Meereis wird simuliert, indem ein Modell der Atmosphäre, welches auf einem Gleichungssystem eines thermodynamischen Meereismodells basiert, mit dem Meereismodell gekoppelt wird. Auch diese Parametrisierung besteht aus einem Teil, der den wolkenfreien Fall darstellt und einem, der für alle Bedeckungsgrade gilt, wobei der Bedeckungsgrad linear in die Gleichung eingeht.

Parametrisierung nach Bennett für den wolkenfreien Fall

Auch hier basiert die Strahlungsparametrisierung für den wolkenfreien Fall $Q_B(0)$ genau wie bei Shine und Zillman auf der Gleichung für die Einstrahlung am Oberrand der Atmosphäre Q_0 , reduziert um die Transmissivität der Atmosphäre $T_{f_bennett}$. Diese wird mit $T_{f_bennett} = 0,72$ als konstant angenommen.

$$Q_B(0) = T_{f_bennett} \cdot Q_0 = 0,72 \cdot S_0 \cdot \cos(\theta). \quad (3.14)$$

Parametrisierung nach Bennett für alle Bedeckungsgrade

Wie bei Zillman entsteht die Parametrisierung für alle Bedeckungsgrade $Q_B(N)$ durch Multiplikation der Parametrisierung für wolkenfreien Himmel mit der Reduktion der solaren Einstrahlung durch Wolken mit dem Faktor V_{wb} :

$$Q_B(N) = Q_B(0) \cdot V_{wb} = Q_B(0) \cdot (1,0 - 0,52N) , \quad (3.15)$$

$$V_{wb} = 1.0 - 0.52 \cdot N. \quad (3.16)$$

In Gleichung 3.16 gibt der Faktor 0,52 die Albedo an der Oberkante der Atmosphäre für einen wolkenbedeckten Himmel wieder. Wolken emittieren einen Teil der Strahlung auch nach oben in die Atmosphäre. Daher wird die solare Einstrahlung um einen Faktor reduziert.

3.5 Kurzwellige Strahlungsparametrisierung nach Shine/Bennett

Als vierte Parametrisierung der solaren Strahlung, die für den teilweise bedeckten Himmel gilt, eignet sich eine Erweiterung der vorhergehenden Parametrisierung von Shine für den wolkenfreien Fall (die wiederum auf der Parametrisierung von Zillman beruht). Als Erweiterung für alle Bedeckungsgrade wird die Parametrisierung von Bennett hinzugezogen.

Parametrisierung nach Shine/Bennett für alle Bedeckungsgrade

Der Wolkenreduktionsfaktor V_{wb} stammt aus der Parametrisierung von Bennett und der Transmissionsfaktor $T_{f_shine}(0)$ von der Strahlungsparametrisierung von Shine. Durch Multiplikation dieser beiden Faktoren mit der Einstrahlung am Oberrand der Atmosphäre F_0 ergibt sich die Parametrisierung $Q_{SB}(N)$ für alle Bedeckungsgrade.

$$Q_{SB}(N) = V_{wb} \cdot T_{f_shine}(0) \cdot F_0 = \frac{(1,0 - 0,52 \cdot N) \cdot S_0 \cos^2 \theta}{(1,2 \cos \theta) + (1,0 + \cos \theta) 10^{-3} p_w + 0,0455}, \quad (3.17)$$

3.6 Parametrisierungen der langwelligen Einstrahlung am Boden

Die folgenden Parametrisierungen der langwelligen Gegenstrahlung am Boden basieren auf dem Stefan-Boltzmann Gesetz:

$$L_W \downarrow = \varepsilon \sigma T^4 \quad [W/m^2], \quad (3.18)$$

wobei ε die atmosphärische Emissivität und $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} [\frac{W}{m^2 \cdot K^4}]$ die Stefan Boltzmann Konstante darstellen.

Die Erde und die Atmosphäre emittieren langwellige Strahlung. An der Erdoberfläche ist die Emission nach dem Stefan-Boltzmann Gesetz bei der Annahme eines schwarzen Körpers eine Funktion der Temperatur.

Die thermische Gegenstrahlung der Atmosphäre ist komplexer. Diese hängt davon ab, wie viel Energie von der Erdoberfläche, dem Wasserdampf und von der Wolkenbedeckung erworben wird. Im einfachsten Fall sind diese Variablen entkoppelt und man kann alleine anhand der Wolkenbedeckung prüfen, welchen Einfluss sie auf die ankommende langwellige Strahlung hat. Abb. 2.1 verdeutlichte bereits, dass Wolken eine große Rolle im Strahlungstransport, besonders bei langwelliger Strahlung spielen.

Die nach unten gerichtete Komponente der langwelligen Strahlung ist einer der größten Terme, die den Energiehaushalt an der Erdoberfläche in arktischen Regionen beeinflussen [Pirazzini(1988)].

In den folgenden Parametrisierungen ist die atmosphärische Emissivität ε empirisch ermittelt worden. Unter wolkenfreien Bedingungen ist sie entweder als Konstante ε_{clr} oder

als Funktion der Lufttemperatur T und/oder des Wasserdampfdruckes e nahe der Oberfläche ausgedrückt.

Um den Effekt der Wolkenbedeckung auf die ankommende langwellige Strahlungsflussdichte $L_W \downarrow$ abzuschätzen, wurden unterschiedliche Parametrisierungen angewandt.

3.7 Langwellige Strahlungsparametrisierung nach Maykut und Church

Die Parametrisierung von Maykut und Church (M & C) wurde 1973 entwickelt. Die atmosphärische Emissivität wurde dabei als empirisch ermittelte Konstante mit dem Wert 0,7855 festgelegt. Bei der Anpassung der Parametrisierung auf die polare Atmosphäre, wurden 3000 Messungen der Lufttemperatur, der relativen Feuchte, der langwelligen Einstrahlung und der Wolkenbedeckung verwendet, die im Verlauf eines Jahres in Barrow (Alaska) gesammelt wurden. Der Einfluss des Wasserdampfes wurde im Vergleich zu anderen Gleichungen [Makshtas(1998)]

$$LW \downarrow_{clr_MC} = \varepsilon_{clr_MC} \sigma T^4, \quad (3.19)$$

$$\varepsilon_{clr_MC} = const = 0,7855 . \quad (3.20)$$

Für alle Bedeckungsgrade ergibt sich durch empirische Anpassung folgende Gleichung:

$$LW \downarrow_{all_MC} = \varepsilon_{clr_MC} \sigma T^4 (1 + 0.22 \cdot N^{2,75}) . \quad (3.21)$$

3.8 Langwellige Strahlungsparametrisierung nach Zillman

Die Parametrisierung der nach unten gerichteten langwelligen Strahlung nach Zillman (1972), ist eine Funktion der Wolkenbedeckung und der Temperatur. Die atmosphärische Emissivität ε_{clr_Z} ist eine Funktion der Temperatur. In dieser Studie wurde die Oberflächentemperatur verwendet, da sie kaum von der Temperatur in 2 m Höhe abweicht [Chiacchio(2002)].

Folgende Beziehungen wurden von Zillman (1972) anhand von Messungen der Temperatur über dem antarktischen Meereis entwickelt:

$$LW \downarrow_{clr_Z} = \varepsilon_{clr_Z} \sigma T^4 , \quad (3.22)$$

$$\varepsilon_{clr_Z} = f(T) = (9.2 \cdot 10^{-6} \cdot T^2) . \quad (3.23)$$

Für alle Bedeckungsgrade lautet die Gleichung für den langwelligen nach unten gerichteten Strahlungsfluss:

$$LW \downarrow_{all_Z} = [\varepsilon_{clr_Z}(1 - 0.96N) + 0.96N] \sigma T^4. \quad (3.24)$$

3.9 Langwellige Strahlungsparametrisierung nach König-Langlo und Augstein

In der Parametrisierung nach König-Langlo und Augstein (1994) ist die atmosphärische Emissivität ε_{clr_KL} eine Konstante. Die in Gleichung 3.27 enthaltenen Koeffizienten wurden empirisch auf Grundlage sowohl von visuellen Beobachtungen der Wolkenbedeckung und Messungen mit einem Pyrgeometer in Ny-Ålesund als auch auf der Neumayer-Station ermittelt und berücksichtigen ebenso wie die Gleichung von Maykut und Church Effekte der Feuchte:

$$LW \downarrow_{clr_KL} = \varepsilon_{clr_KL} \sigma T^4, \quad (3.25)$$

$$\varepsilon_{clr_KL} = const = 0,765. \quad (3.26)$$

Für alle Bedeckungsgrade weicht die Parametrisierung der langwelligen Gegenstrahlung ($LW \downarrow$) nur insofern von der von M & C ab, als dass der Bedeckungsgrad durch die dritte Potenz stärker gewichtet wird (Gleichung 3.27):

$$LW \downarrow_{all_KL} = (\varepsilon_{clr_KL} + 0,22N^3) \sigma T^4. \quad (3.27)$$

3.10 Langwellige Strahlungsparametrisierung nach Konzelmann

Konzelmann (1994) ermittelte eine Gleichung für die tägliche, mittlere, nach unten gerichtete, langwellige Einstrahlung, basierend auf Messungen unter arktischen Bedingungen. Die Emissivität der Atmosphäre hängt in jeder Schicht von zwei Parametern ab, dem Wasserdampfdruck e und der Temperatur T :

$$LW \downarrow_{clr_K} = \varepsilon_{clr_K} \sigma T^4 \quad (3.28)$$

$$\varepsilon_{clr_K} = f(e, T) = 0,23 + 0,484 \cdot (e/T)^{1/8}. \quad (3.29)$$

Die Emissivität ε_{clr_K} wird mit einem Faktor multipliziert. Dieser wird mit steigendem Bedeckungsgrad (N) in einer Art kleiner, dass bei vollbedecktem Himmel $LW \downarrow_{all_K}$ nur noch von der Wolkenemission abhängt und nicht mehr von der Emission der atmosphärischen Schicht zwischen Wolken und Boden. Für die Parametrisierung der langwelligen nach unten gerichteten Strahlung folgt Gleichung 3.30:

$$LW \downarrow_{all_K} = [\varepsilon_{clr_K}(1 - N^4) + 0,952N^4] \sigma T^4. \quad (3.30)$$

Im folgenden Kapitel wird die Datenerfassung erläutert. Die an Bord erfassten Daten von Temperatur, relativer Feuchte etc. wurden in die hier vorgestellten Parametrisierungen der kurzwelligen und langwelligen Strahlung in Kapitel 5 bis 7 eingesetzt und beurteilt.

Kapitel 4

Erfassung der Daten

Das Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven betreibt das Forschungsschiff Polarstern seit 1982. Für gewöhnlich befindet sich Polarstern zwischen November und März in der Antarktis und im Nordsommer in arktischen Gewässern.

Den Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit bilden Daten, die im Verlauf zweier Forschungsfahrten der FS Polarstern (siehe Abb. 4.1) mit Messgeräten des IFM-GEOMARs gesammelt wurden. Der Fahrtabschnitt der Expedition *ARK-XXIII/1* fand vom 12. Juni bis 2. Juli 2008 statt und die Expedition *ANT-XXV/2* vom 5. Dezember 2008 bis 5. Januar 2009. Weitere Datenquellen sind das PODAS (Polarstern Online-Datenmanagementsystem) Messsystem und synoptische Beobachtungen, die alle drei Stunden von Meteorologen an Bord des Forschungsschiffes Polarstern ausgeführt werden. Ebenfalls im PODAS Messsystem befinden sich Daten von früheren Expeditionen in die Arktis bzw. Antarktis.



Abbildung 4.1: Polarstern während des *ARK-XXIII/1* Fahrtabschnittes vor der Ostgrönländischen Küste (Bild: Ralf Rosenau).

4.1 Pyranometer

Ein Pyranometer der Firma *Kipp & Zonen* (siehe Abb. 4.2) mit einem Sichtfeld von 180° misst an Bord der Polarstern die Strahlungsflussdichte der Sonne im Wellenlängenbereich von $0,3$ bis $3 \mu m$. Die Strahlungsflussdichte E_{solar} wird anhand folgender Formel berechnet:

$$E_{solar} = \frac{U_{emf}}{S} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right], \quad (4.1)$$

mit der Ausgangsspannung U_{emf} [μV] und der Empfindlichkeit S [$\frac{\mu V}{W/m^2}$].

Pyranometer erfassen die Globalstrahlung über dem Halbraum des Sensors, die sich zusammensetzt aus der direkten Sonnenstrahlung und der diffusen Himmelsstrahlung. In einer Thermosäule wird die ankommende solare Strahlung absorbiert und in Wärme umgewandelt. Diese wird weiter in ein elektrisches Spannungssignal proportional zur Strahlung transformiert.

Die größten Fehler bei Pyranometer Messungen werden oft durch die Verschmutzung der Glaskuppel, die sich über dem Sensor befindet verursacht, weshalb diese regelmäßig gereinigt werden sollte. Bereits kleine Veränderungen in der horizontalen Ausrichtung des Sensors können die Messungen beeinflussen. Der Grund hierfür liegt in der Abhängigkeit der Globalstrahlung vom Einstrahlwinkel in Bezug auf die Auffangfläche (Kosinus-Lambert-Gesetz Gleichung 4.2). Die gemessene Strahlungsstromdichte wird daher in Abhängigkeit des Einstrahlwinkels auf den Sensor erfasst.

Die Messungenauigkeit beträgt für das Pyranometer und das Pyrgeometer etwa 10 %.

$$I = A \cdot \cos(\theta) \cdot L, \quad (4.2)$$

mit Lichtsärke I , Flächenelement A und L sei eine Konstante.

4.2 Pyrgeometer

Pyrgeometer werden hergestellt, um die nach unten gerichtete terrestrische Ausstrahlung der Atmosphäre zu messen. Das Gerät, welches an Bord des Forschungsschiffes verwendet wurde, deckt Messungen der von Wolken und Aerosolteilchen emittierten langwelligen Strahlung im Bereich von $4,5$ und $42 \mu m$ ab. Es hat wie das Pyranometer einen Sichtwinkel von 180° . Das Silikonfenster ist nur für terrestrische Strahlung durchlässig, da es einen solaren Blenden-Filter besitzt, welcher sich über dem Sensor befindet. Fehler können auch hier bei Neigungen des Gerätes in der Horizontalen auftreten. Die Innentemperatur ist notwendig, um die nach unten gerichtete Strahlung berechnen zu können (Gleichung 4.3). Diese basiert auf dem Stefan Boltzmann Gesetz, das über die Temperatur die abgestrahlte Leistung $L_d \downarrow$ eines schwarzen Körpers berechnet:

$$L_d \downarrow = \frac{U_{emf}}{S} + \sigma * T_b^4 \quad [W/m^2] \quad (4.3)$$

mit der Ausgangsspannung U_{emf} [μV], der Empfindlichkeit S [$\frac{\mu V}{W/m^2}$], der Temperatur T_b [K] und der Stefan Boltzmann Konstante σ [$\frac{W}{m^2 K^4}$].

Das Pyrgeometer wird automatisch belüftet, um weitere Fehler durch die Wärmeabgabe des Sensors zu korrigieren.

4.3 Vollhimmelskamera

Zusätzlich stand zur Interpretation der Strahlungsmessungen eine automatisierte Vollhimmelskamera (siehe Abb. 4.2) zur Verfügung. Diese wurde über ein computergesteuertes Programm betrieben und nahm alle 15 Sekunden ein Bild des aktuellen Himmels auf. Die Vollhimmelskamera besteht aus einer Canon *Power-shot* Digital-Kamera, die sich in einer witterungsbeständigen Box befindet. Über dem Fischaugen-Objektiv, das einen Blickwinkel von 180° ermöglicht, ist eine schützende Kuppel aus Plexiglas angebracht. Damit ist es möglich mit einer hohen zeitlichen Auflösung Bilder des gesamten Himmels zu erhalten.



Abbildung 4.2: Pyranometer (links), Pyrgeometer (Mitte) und Vollhimmelskamera (rechts)

Mit Hilfe eines in der Programmiersprache IDL entwickelten Programms, kann auf Basis dieser Fotos der Bedeckungsgrad des Himmels bestimmt werden [Heinle(2009)]. Zuerst wird eine Maske für den Fotoausschnitt erstellt um alle Schiffsaufbauten aus den Berechnungen herauszufiltern. Anschließend werden die Rot-, Grün- und Blauwerte der Pixel des Bildes bestimmt. Die Entscheidung, ob ein Pixel als Wolke oder als Himmel erkannt

wird, geschieht anhand der Berechnung der Differenz von Rot- und Blauwerten eines Bildpixels V_i^{RBdiff} :

$$V_i^{RBdiff} = a_i^R - a_i^B, \quad (4.4)$$

mit a_i^R Rotwert eines Pixels und a_i^B Blauwert eines Pixels.

Mittels eines empirisch bestimmten Schwellwertes wird das Pixel dann als „bewölkt“ oder „wolkenfrei“ (clear-sky) erkannt. Der Berechnungsfehler liegt bei unter 10 %. Bei sehr niedrigem Sonnenstand kann der Fehler auch größer sein.

Weitere Angaben zur Wolkenbestimmung anhand der Wolkenfotos und automatische Wolkenklassifikation sind in [Heinle(2009)] zu finden.

Kapitel 5

Polarsterndaten der letzten 14 Jahre

25 mal wurden Forschungsfahrten mit dem Forschungsschiff Polarstern seit 1982 in die Antarktis und Arktis unternommen. Während jeder Fahrt wurden alle drei Stunden synoptische Beobachtungen von Meteorologen des *deutschen Wetterdienstes* (DWD)¹ durchgeführt. Alle Daten wurden im meteorologischen Informationssystem des *Alfred Wegener Instituts* (AWI) archiviert. Außerdem sind sämtliche Daten über das Netzwerk PAN-GAEA (*Publishing Network for Geoscientific & Environmental Data*)² erhältlich.

Neben den üblichen synoptischen Messungen durch die Bordwetterwarte wie Temperatur oder Luftdruck, werden auch weitere Beobachtungen wie Wolkenbedeckung und Bedeckung der Gewässer mit Meereis alle drei Stunden in verschlüsselter Form aufgezeichnet. Der zweite Datensatz, der auf Polarstern minütlich gemessen wird, beinhaltet alle Parameter, die automatisch gemessen werden können. Er enthält unter anderem die Position des Schiffes, Fahrtgeschwindigkeit oder Windstärke. Diese werden über das *DSHIP Archiv System*³ des Schiffes auch der Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

Seit 1994 erst wird der zweite Datensatz der minütlichen Messungen als Zehnminutenmittel in zugänglicher Form gesichert. Da diese für die Analysen in dieser Arbeit benötigt wurden, konnten daher nur die Daten der letzten 14 Jahre verwendet werden.

Die für die Strahlungsflussparametrisierungen erforderliche Messung des Bedeckungsgrades und der Eissituation werden nur 6 mal pro Tag durchgeführt. Diese werden an Bord als Zahlen verschlüsselt, um eine einfachere Datenverarbeitung zu ermöglichen.⁴

Weitere Eingangswerte für die Parametrisierungen sind die relative Feuchte und Lufttemperatur mit Ort und Zeitpunkt, die aus dem Zehnminutenmittel Datensatz stammen.

Für die Grafiken in Abb. 5.1 wurde ein Dreistundenmittel der letzten 14 Jahre der an Bord von Polarstern gemessenen Globalstrahlung verwendet. Die Entscheidung, ob Wasser oder Eis das Schiff umgaben, basiert auf den synoptischen Beobachtungen der Bordwet-

¹Der DWD wurde 1952 gegründet und ist der nationale meteorologische Dienst der Bundesrepublik Deutschland mit Sitz in Offenbach am Main.

²<http://www.pangaea.de/>

³<http://dship.awi.de/>

⁴Eis: 0 = "No ice" und 3 = "Open pack ice 3/8 to < 6/8 concentration". Bedeckungsgrad: in Okta, 0 = *clearsky* und 8 = *overcast*

terwarte.

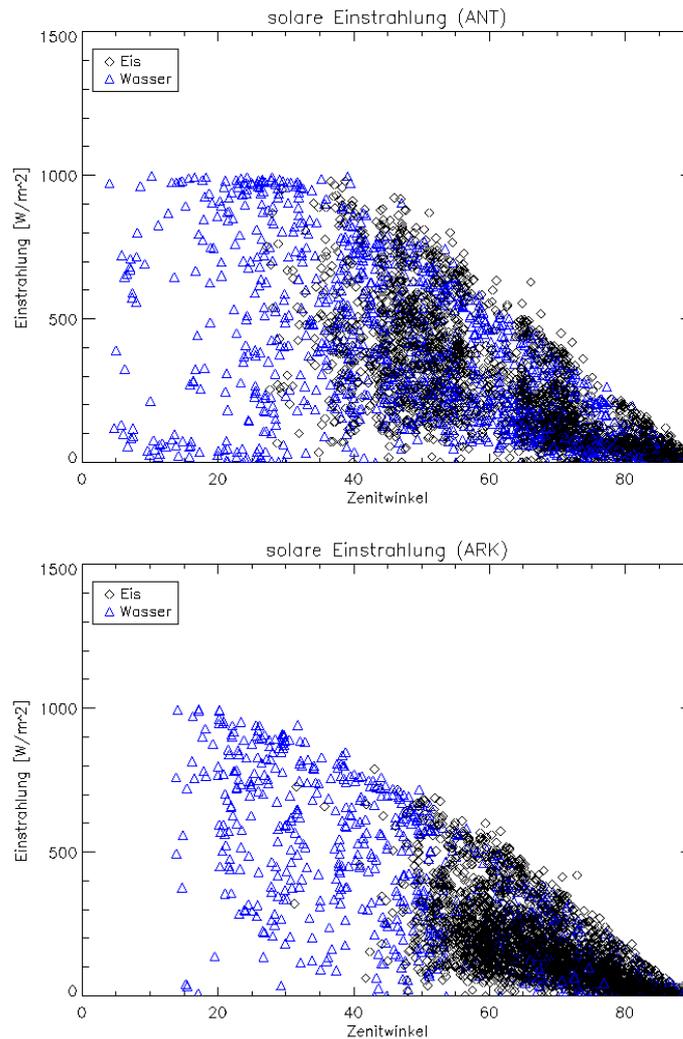


Abbildung 5.1: Globalstrahlung aufgetragen über den Zenitwinkel: Einstrahlungen in der Antarktis (oben) und Einstrahlungen in der Arktis (unten). Blaue Dreiecke symbolisieren die Einstrahlung zu Zeitpunkten, in denen das Forschungsschiff von Wasser umgeben war, schwarze Rauten stellen die Einstrahlung in Eisumgebung dar.

In beiden Grafiken ist deutlich zu erkennen, dass die größeren Werte in der globalen Einstrahlung auftraten, während das Schiff von Meereis umgeben war. Bei gleichem Sonnenzenitwinkel erreicht die globale Einstrahlung höhere Werte, wenn der Untergrund eis- oder schneebedeckt ist, also eine größere Albedo hat.

5.1 Strahlungserhöhungen

Obwohl die zeitliche Auflösung der Schiffsdaten mit 10 Minuten nicht sonderlich groß ist, konnten auch hier einige Strahlungserhöhungen im Verlauf der letzten 14 Jahre verzeichnet werden. Abbildung 5.2 stellt diese absolut (oben) und relativ (unten), aufgetragen über den Sonnenzenitwinkel, dar. Man erkennt, dass selbst bei Mittelwerten über zehn Minuten immer noch Erhöhungen von bis zu $150 \text{ [W/m}^2\text{]}$ in der Antarktis auftreten. Prozentual steigen die Werte auf über 80 %. Mit zunehmendem Zenitwinkel steigt die prozentuale Erhöhung. Jedoch muss man bei den flachen Einfallswinkeln vorsichtig sein, da hier die erwarteten Werte so gering sind, dass ein leichter Anstieg schon prozentual gesehen sehr viel ausmachen kann.

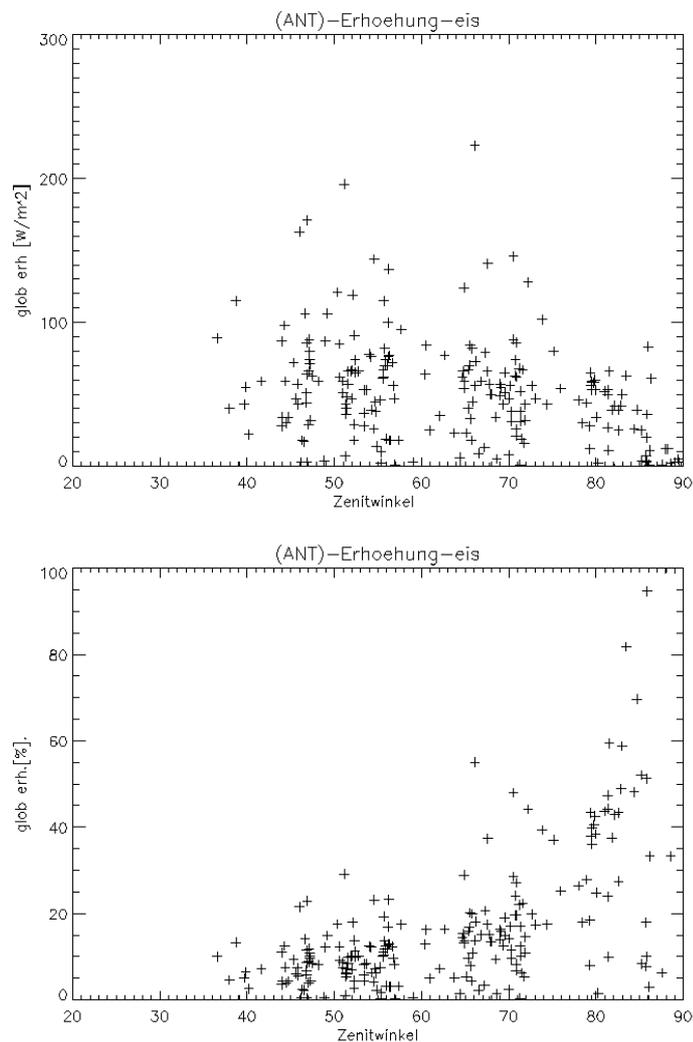
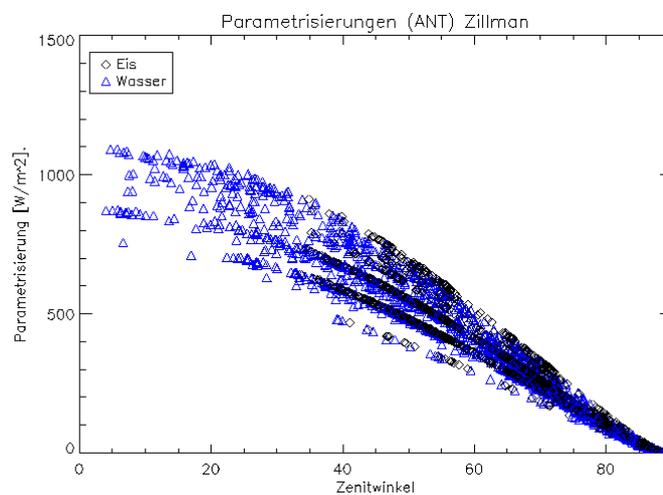


Abbildung 5.2: Alle Strahlungserhöhungen die während der letzten 14 Jahre auf Forschungsfahrten in der Antarktis gemessen wurden

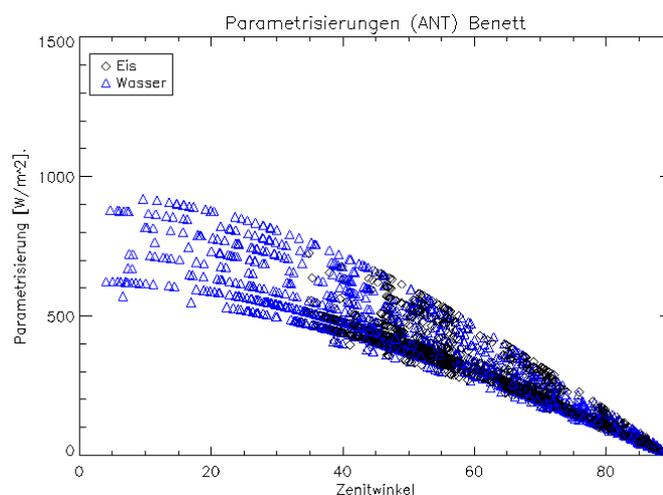
5.2 Parametrisierungen

Wie gut die Parametrisierungen der kurzwelligen solaren Strahlung auf die Daten der letzten 14 Jahre Polarsternfahrten passen, soll im Folgenden beurteilt werden. Hierbei wurden Daten über drei Stunden verwendet, da die synoptischen Messungen in die Parametrisierungen einfließen, die nur alle drei Stunden gemessen wurden.

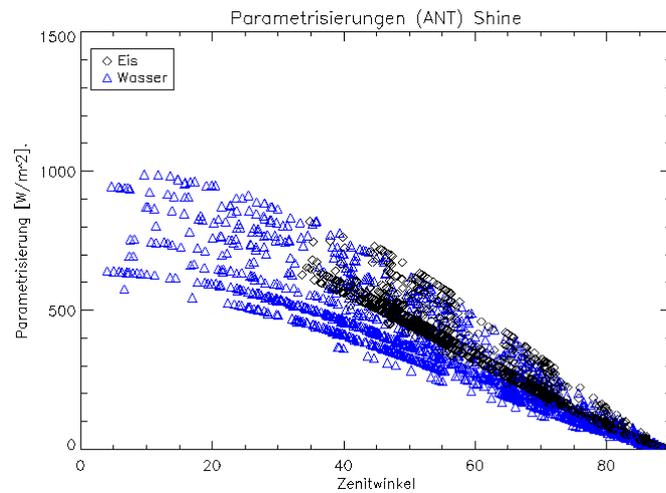
Abb. 5.2 stellt die ersten drei Parametrisierungen, die als Eingangswerte Daten der Antarktisfahrten seit 1994 verwenden, dar. Auffällig ist das mit abnehmendem Zenitwinkel breiter werdende Spektrum der Einstrahlung bei den Parametrisierungen von Bennett, Zillman und Shine ($\tau = 15$). Um zu testen, ob die optische Dicke der Wolken einen Einfluss auf das Spektrum der Parametrisierung von Shine hat wurde diese variiert. Bei geringerer optischen Dicke, ist auch das Spektrum der Einstrahlung zu kleinerem Zenitwinkel geringer.



(a) Zillman

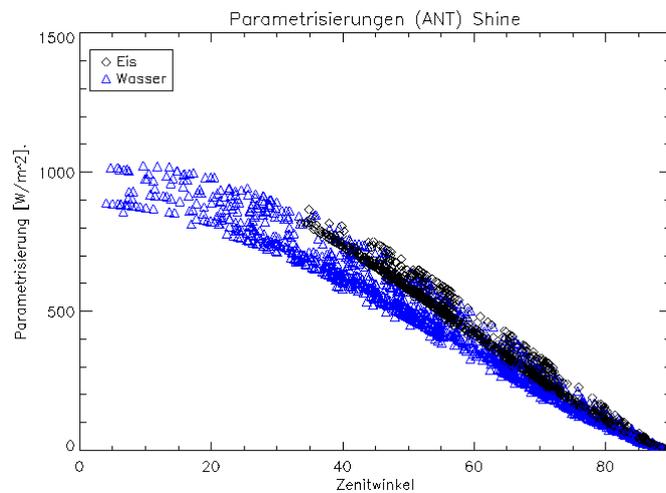


(b) Bennett



(c) Shine $\tau = 15$

Abbildung 5.3: Alle Ergebnisse der Parametrisierungen für die solare Strahlung während den Antarktisfahrten aufgetragen über dem Zenitwinkel in Wasser und in eisbedeckten Gewässern



(a) Shine $\tau = 5$

Die Variablen Temperatur, relative Feuchte und Bedeckungsgrad hängen bei Shine also stark von der optischen Dicke der Wolken ab.

Vergleicht man nun die gemessene solare Einstrahlung (Abb. 5.1 (oben)) mit den Parametrisierungen erkennt man, dass die Messungen schon bei einem Zenitwinkel von 40° eine Einstrahlung von 1000 W/m^2 erreichen. Dieser Wert wird bei noch kleineren Zenitwinkeln aber kaum überschritten. Alle Parametrisierungen hingegen zeigen bei 40° maximal eine Einstrahlung von 800 W/m^2 , unterschätzen die gemessene Strahlung demnach deutlich. Die maximale Einstrahlung von 1000 W/m^2 wird von der Parametrisierung von

Shine am besten wiedergegeben, ebenfalls das weitere Spektrum bei einer großen optischen Dicke. Zu welchem Zeitpunkt jedoch die Parametrisierungen hier richtig lagen, lässt sich anhand dieser Abbildungen nicht erklären.

Abb. 5.4 zeigt die Ergebnisse der Parametrisierung von Shine für unterschiedliche Werte der Bodenalbbedo und der optischen Dicke der Wolken. Die optische Dicke der Bewölkung wurde einmal auf 7.5 und einmal auf 15 festgesetzt. Die Bodenalbbedo variiert zwischen 0.65 und 0.9. Man erkennt, dass die Variation der optischen Dicke und der Albedo einen großen Einfluss auf die Parametrisierung nach Shine hat.

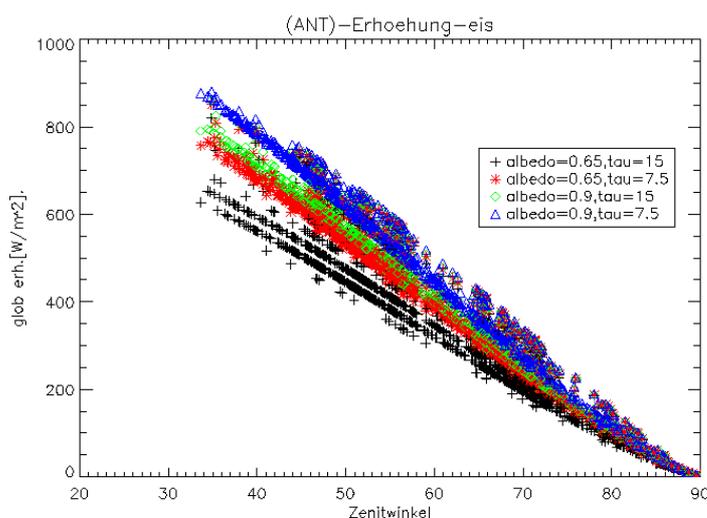


Abbildung 5.4: Solare Globalstrahlung nach der Parametrisierung von Shine mit unterschiedlichen Werten für Bodenalbbedo und optische Dicke der Wolken

Dieses Verhalten in Bezug auf optische Dicke und Bedeckungsgrad erkennt man bereits im zweiten Term der Gleichung 3.12. Die Formel der Einstrahlung ist bei Shine im Gegensatz zu den drei anderen Parametrisierungen eine lineare Funktion des Bedeckungsgrades. Im zweiten Term gehen im Falle von Wolken die Bodenalbbedo und die optische Dicke der Wolken ein. Die optische Dicke spielt hierbei eine etwas größere Rolle als die Albedo. Die Albedo ist für die Höhe der Kurve der Parametrisierung verantwortlich, die optische Dicke für das Spektrum.

Die Grafiken in Abb. 5.5 bis 5.8 stellen die Differenzen der unterschiedlich parametrisierten Strahlung zu den Messwerten im Eis (Abb. 5.1) dar. Die Abweichungen der Berechnungen von den Messungen steigen mit abnehmendem Sonnenzenitwinkel an.

Bei den Parametrisierungen von Shine-Bennett und Bennett liegen die meisten Abweichungen im Bereich von 0 bis 200 W/m^2 . Sie zeigen die geringsten Abweichungen zu den Messwerten, da diese Parametrisierungen eher die Einstrahlung unterschätzen und dann auch die Abweichungen nicht so groß werden können. Im Gegensatz dazu liefern die Parametrisierungen von Zillman und Shine auch viele Differenzen über 400 W/m^2 . Die Parametrisierung von Shine, die hier mit der festen Albedo von 0,65 und mit der

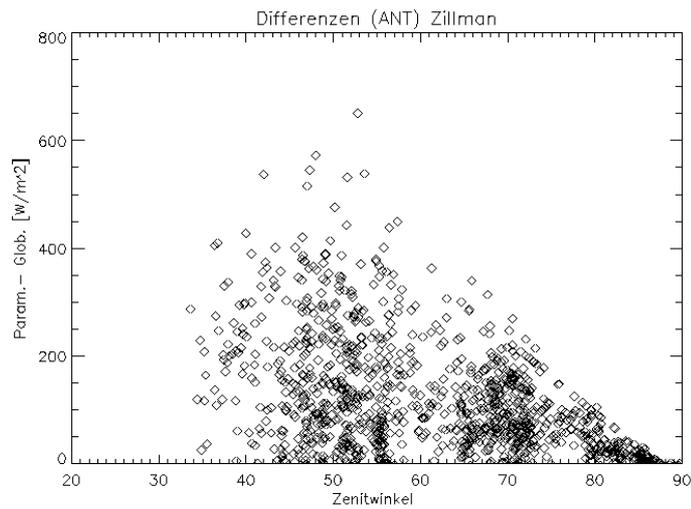


Abbildung 5.5: Differenzen der Ergebnisse der Parametrisierung nach Zillman mit gemessener Einstrahlung.

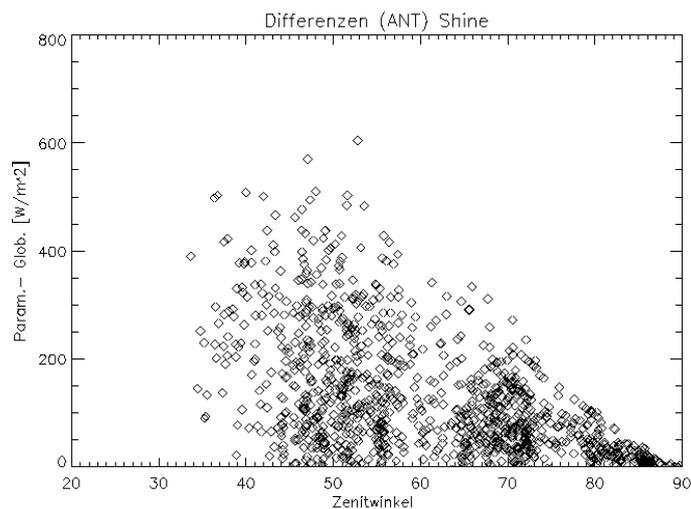


Abbildung 5.6: Differenzen der Ergebnisse der Parametrisierung nach Shine mit gemessener Einstrahlung.

optischen Dicke $\tau = 7$ berechnet wurde, zeigt die größten Abweichungen (Abb. 5.6). Zillman und Shine parametrisieren eine höhere solare Einstrahlung und damit ist auch die Wahrscheinlichkeit höher, dass die Abweichungen zu den Messungen größer sind.

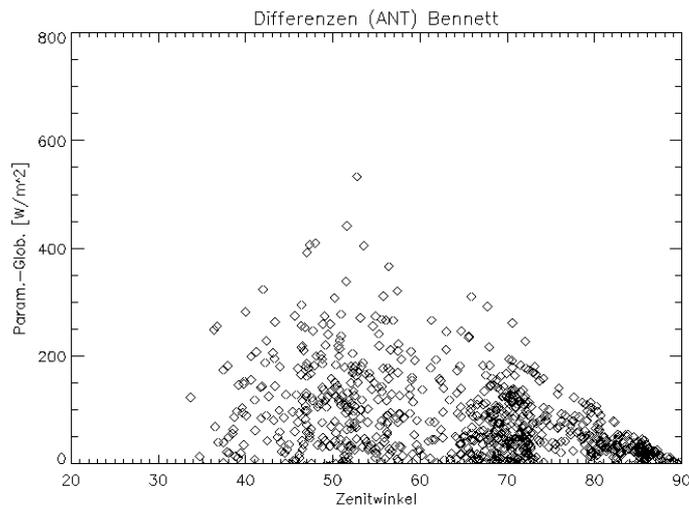


Abbildung 5.7: Differenzen der Ergebnisse der Parametrisierung nach Bennett mit gemessener Einstrahlung.

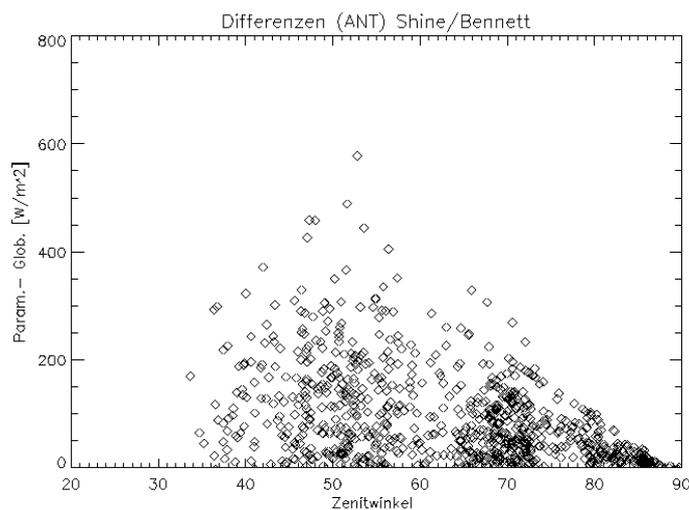
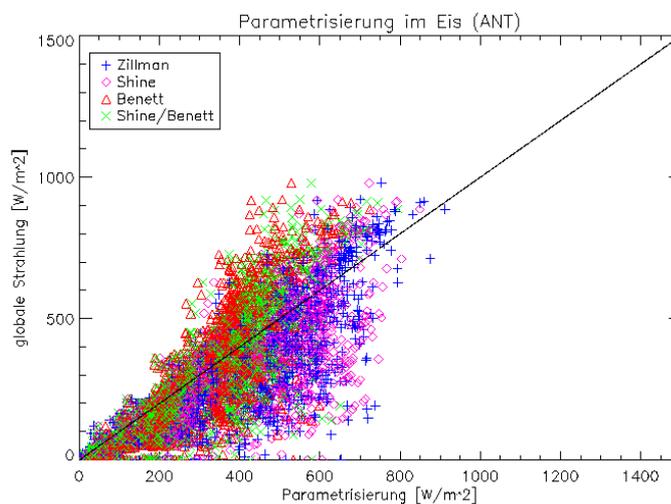


Abbildung 5.8: Differenzen der Ergebnisse der Parametrisierung nach Shine/Bennett mit gemessener Einstrahlung.

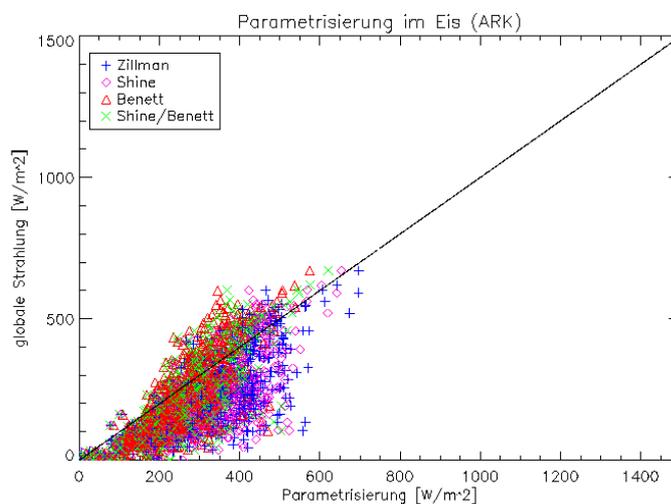
Zuletzt ist in Abbildung 5.9 ein Vergleich der gemessenen solaren Einstrahlung mit den Parametrisierungen der kurzwelligen Strahlungsflüsse dargestellt. Die Diagonale entspricht der Übereinstimmung von Parametrisierungen und Messwerten. Alle Werte, die oberhalb der Referenzlinie liegen, unterschätzen den gemessenen Wert. Aufgetragen wurden ausschließlich Strahlungswerte, während das Schiff sich eindeutig in eisbedeckten Gewässern aufhielt.

Für Messwerte unter 500 W/m^2 überschätzen die meisten Parametrisierungen die Glo-

balstrahlung in der Antarktis. Mit steigender Einstrahlung steigt auch die Unterschätzung der Messwerte durch die Parametrisierungen an. Vor allem die Parametrisierungen der Einstrahlung nach Shine/Bennett und Bennett liegen hier größtenteils über der Referenzkurve, Zillman und Shine jedoch überschätzen die gemessene Einstrahlung oft bei Werten die größer als 500 W/m^2 sind.



(a) Antarktis



(b) Arktis

Abbildung 5.9: Vergleich zwischen Parametrisierungen der Strahlung und Messwerten: Antarktis (oben), Arktis (unten)

In Abb. 5.9 (b) ist entsprechend der Vergleich für die Arktis dargestellt. Man erkennt zunächst, dass hier die wenigsten Parametrisierungen der solaren Strahlung im Gegensatz

zur Antarktis, über den Wert von 500 W/m^2 hinausgehen. Das liegt daran, dass auf der Nordhalbkugel die Eisbedeckung erst bei viel höheren Breitengraden beginnt als auf der Südhalbkugel, sodass dort auch weniger Strahlung durch die Sonne zur Verfügung steht. Die Parametrisierungen überschätzen hier meistens die tatsächlichen Messwerte, jedoch gibt es auch hier Unterschätzungen der Einstrahlung durch die Parametrisierungen für Werte über 300 W/m^2 .

Kapitel 6

Expedition ARK-XXIII/1

6.1 Wetterlage und Fahrtverlauf

Die Expedition Ark-XXIII/1 startete am 12. Juni in Bremerhaven und endete am 2. Juli 2008 in Longyerbyen auf Spitzbergen (Fahrtverlauf in Abb. 6.1). Während der Arktisexpedition befand sich *Polarstern* zwischen dem 18. und 21. Juni 2008 nahe der Küste Ostgrönlands in Meereis, während geodätische Arbeiten an Land vorgenommen wurden. Zu Beginn der Reise lag ein Tief über Karelien (Gebiet zwischen Russland und Finnland), das nach Nordrussland zog und sich dabei abschwächte. Am Morgen des 18. Juni erreichte das Forschungsschiff *Polarstern* westlich der Insel Jan Mayen den Eisrand, wo zunächst typische Nebelfelder durchquert werden mussten. Auf dem Weg weiter Richtung Nordwesten wurde die Sicht besser. Zwischen dem 18. und 19. Juni befand sich *Polarstern* auf etwa 74° Nord.

Der weitere Fahrtverlauf führte das Forschungsschiff bis etwa 76° Nord, wo die letzten Arbeiten an Land vollbracht wurden. Am 21. Juni traten am Rande eines kleinräumigen Tiefs an der grönländischen Küste schwache Süd- bis Südwestwinde auf, die die Nebel- lage im Eis intensivierten. Vom 21. zum 22. Juni zog ein Tief von der mittelnorwegischen Küste ins Seegebiet südwestlich der Bäreninsel. Hier verließ *Polarstern* das eisbedeckte Gebiet und fuhr weiter auf dem 74. nördlichen Breitengrad Richtung Osten. Aufgrund des wärmenden Golfstroms ist das Meer im Sommer hier eisfrei. Am Morgen des 2. Juli ging *Polarstern* vor Longyerbyen, dem Ziel des ersten Fahrtabschnittes, vor Anker. Die jeweilige Eissituation (von Wettersatelliten des NOAA ¹) ist in Abb. 6.2 zu erkennen. Das rote Kreuz markiert den Ort von *Polarstern*. Abb. 6.3 zeigt zwei Analysekarten, die die Wettersituation während des Aufenthaltes im Eis am 18. und 21. Juni darstellen.

¹Die Wettersatelliten des NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) erkunden in einer Höhe von 850 km hauptsächlich die Erdoberfläche und die Atmosphäre.

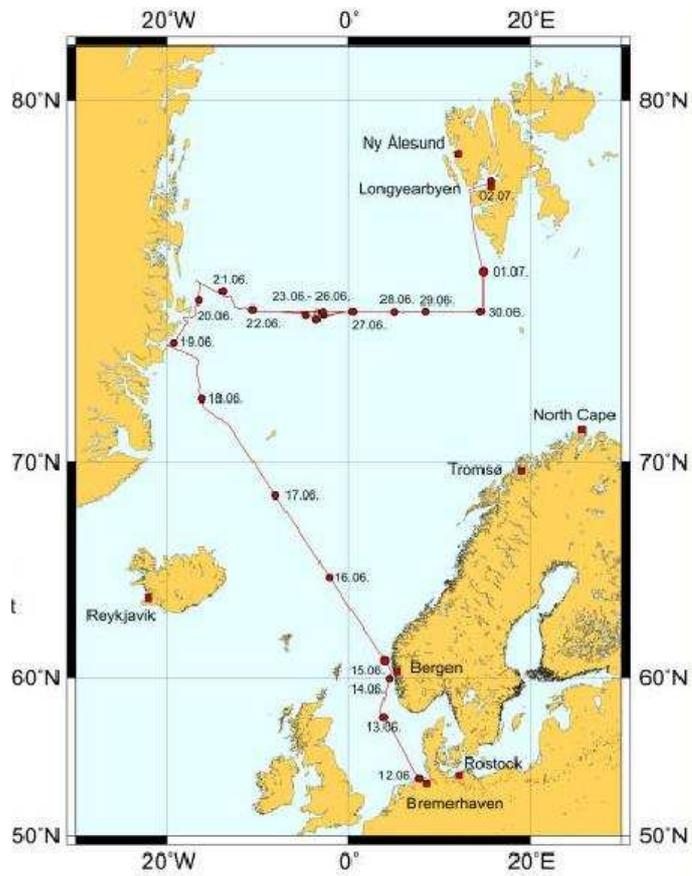
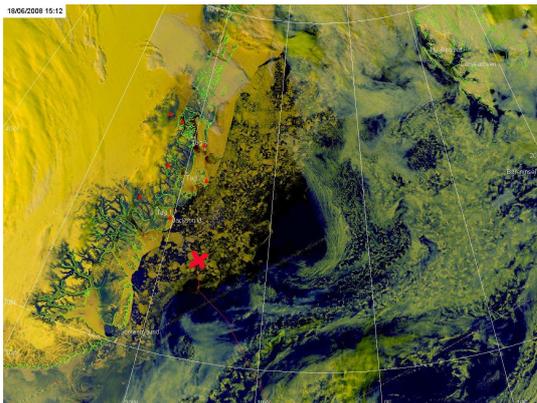
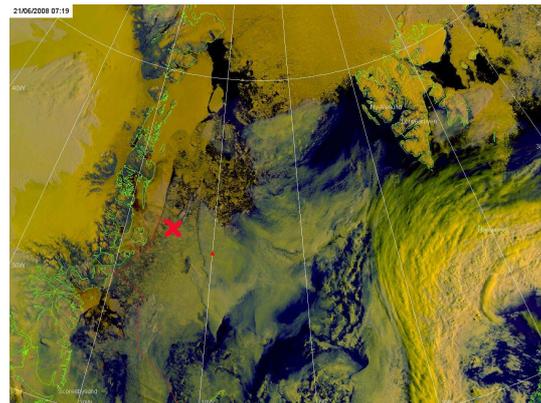


Abbildung 6.1: Fahrtroute der ARK 23-1 Expedition

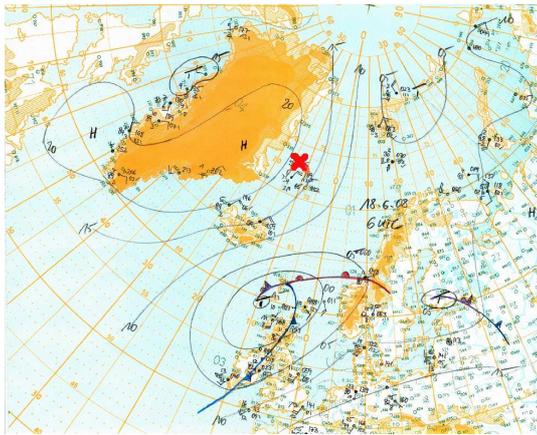


(a) Eisbild vom 18. Juni

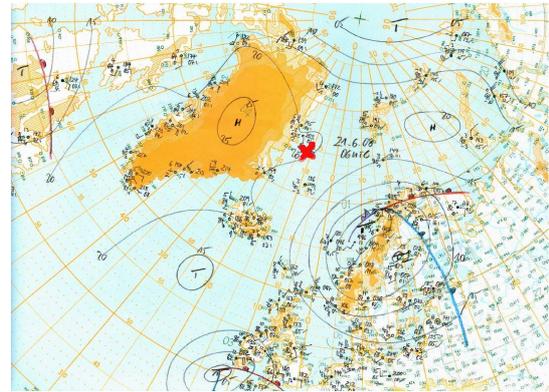


(b) Eisbild vom 21. Juni

Abbildung 6.2: Satellitenbilder aus dem Datennetz von NOAA. Die roten Punkte markieren die kommenden Stationen, dunkles Gelb das Eis und das hellere grünliche Gelb sind Wolken.



(a) Analysekarte vom 18. Juni



(b) Analysekarte vom 21. Juni

Abbildung 6.3: Analysekarten des DWD, zu erkennen ist ein Tiefdruckgebiet über Großbritannien und später über Skandinavien.

6.2 Strahlungserhöhungen

Im Folgenden werden sieben Tage der ARK-XXIII/1 Fahrt bezüglich der Strahlungserhöhungen genauer betrachtet. Anhand der hochaufgelösten Daten des *Kipp & Zonen* Pyranometers ist auch eine Feststellung der Dauer solcher Strahlungserhöhungen möglich. Um die Erhöhung der Strahlung festzustellen, wurde die Parametrisierung der Einstrahlung nach Zillman (1972) für den wolkenfreien Himmel (Kapitel 3.5) von den entsprechenden Messwerten abgezogen. Für eine genauere Beschreibung zur Strahlungserhöhung siehe Kapitel 2.2.2.

Nach einer kurzen synoptischen Beschreibung der Tage wird die solare Einstrahlung in den folgenden Abbildungen zusammen mit den Wolkenkamerabildern, die zu dem Zeitpunkt der stärksten Erhöhung der jeweiligen Tage aufgenommen wurden, dargestellt (Abb. 6.4-6.10).

17.06.08 Am 17. Juni befand sich das Forschungsschiff noch am 70. nördlichen Breitengrad außerhalb der meereisbedeckten Regionen. Um die Mittags- und Abendzeit lockerte die dichte untere Stratocumulusschicht auf, so dass hier Erhöhungen der einfallenden solaren Strahlung gemessen werden konnten. Gegen 12 UTC ereignete sich die größte Erhöhung der gemessenen Strahlung am Boden um 349 W/m^2 (47%). Zu diesem Zeitpunkt war der Himmel zu 7/8 bedeckt. In der oberen Troposphäre bedeckte ein dünner Cirrusschleier die Sonne, im unteren Bereich konnte die Sonne durch die Wolkenlücken der Stratocumuluswolken scheinen.

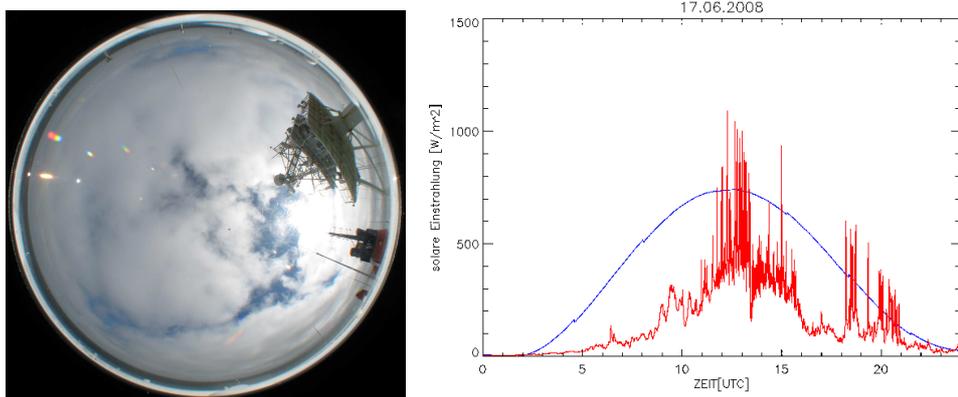


Abbildung 6.4: Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (12:17 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 17.06.2008.

18.06.08 Der nächste Tag begann mit einer dichten Stratocumulusbewölkung. Bei Annäherung an die Eisgrenze wurde die Bewölkung zusehends optisch dünner und homogener. Ab dem Nachmittag war der Himmel nahezu unbewölkt, nur selten war er mit 1/8 Cirrusschlieren bedeckt. Hier liegt die gemessene Einstrahlung meist oberhalb der blauen parametrisierten Kurve, abgesehen von den Spitzen, die durch die Abschattungen der Schiffsaufbauten verursacht wurden. Die größte gemessene Strahlungserhöhung des Tages ereignete sich kurz nach 12 UTC, mit knapp 22% (154 W/m^2) über dem Wert der für den unbewölkten Fall möglich wäre (Abb. 6.5). Aufgrund eines Defektes konnte die Wolkenkamera zu diesem Zeitpunkt leider keine Bilder machen.

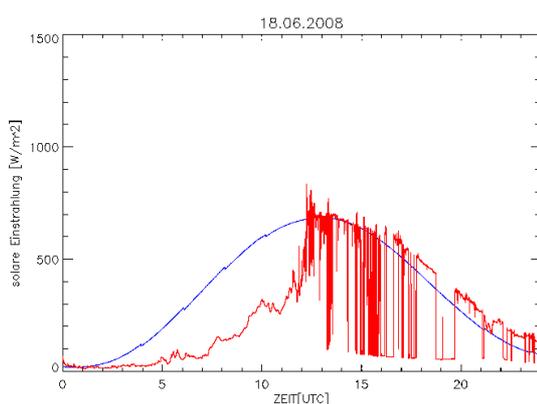


Abbildung 6.5: Solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 18.06.2008. Kamera zum Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (12:14 UTC) defekt.

19.06.08 Nachdem es Vormittags bis zum frühen Nachmittag größtenteils zu 8/8 bedeckt blieb, war der Himmel später von einer hohen dünnen Stratocumulusschicht verdeckt. Diese wies mal mehr, mal weniger Lücken auf. Das vom Schiff umgebende Wasser war zu etwa 90% von Eis bedeckt. Somit konnte durch Mehrfachreflexion zwischen Eis und Wolkenunterkante der Sensor des Pyranometers mehrere Strahlungsspitzen in der Sonnenstrahlung messen. Mit einer Erhöhung um 258 W/m^2 erreichte die ankommende solare Strahlung um 14:20 UTC den größten Wert (Abb.6.6).

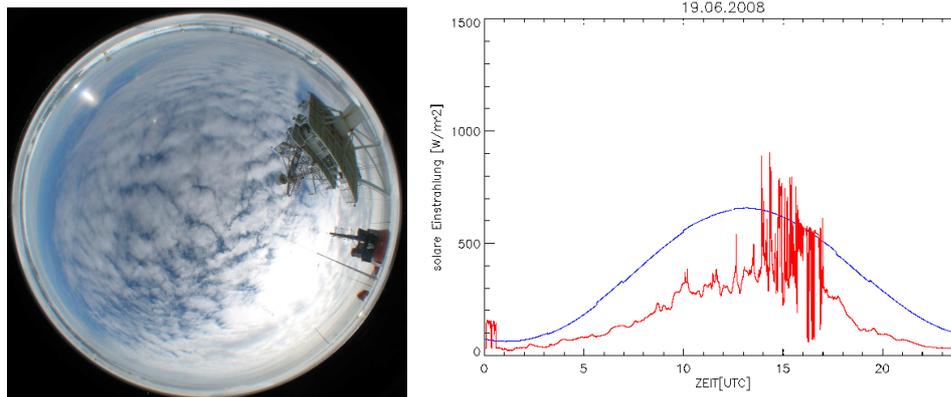


Abbildung 6.6: Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (14:20 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 19.06.2008.

20.06.08 Durch eine hohe dünne Cirrusschicht und eine tiefere aufgelockerte Stratocumulusschicht erreichte die Strahlung der Sonne um 11:31 UTC mit 824 W/m^2 eine Erhöhung um 209 W/m^2 . Auch hier befand sich das Forschungsschiff in größtenteils von Meereis bedecktem Wasser. Nach 15 UTC konnte die kurzwellige Strahlung durch einen Defekt des Pyranometers nicht mehr gemessen werden (Abb. 6.7).

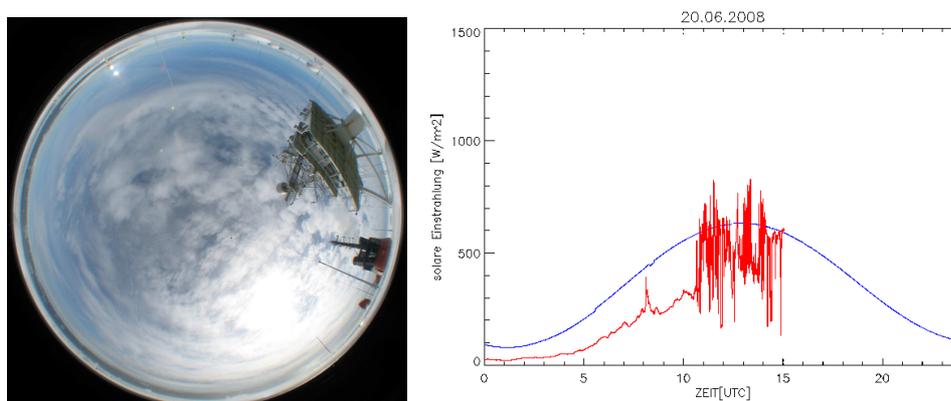


Abbildung 6.7: Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (11:31 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 20.06.2008.

21.06.08 Am Tag der Sommersonnenwende, an dem die Sonne ihre größte nördliche oder südliche Deklination von $23,4^\circ$ erreicht, trat die größte relative Strahlungserhöhung mit über 48% morgens um 4:49 UTC bei einem Sonnenzenitwinkel von $74,5^\circ$ auf. Dies war eine absolute Erhöhung von 115 W/m^2 . Der Tag begann mit einem von optisch sehr dünnen hohen Cirruswolken bedeckten Himmel. Dieser klarte im Laufe des Tages immer wieder auf und verdichtete sich wieder. Aufgrund der vielen Eispartikel in der Luft wirkte sie diesig. Auf den Wolkenkamerabildern ist zu erkennen, dass sich Eiskristalle („Diamond Dust“) auf der Kuppel der Kamera festgesetzt hatten. Winzige Eiskristalle in der Luft, an denen die einfallende Strahlung reflektiert und gestreut wurde, verursachten vermutlich den Anstieg der Strahlung. Es kann ausgeschlossen werden, dass sich ein Belag auf der Glaskuppel über dem Sensor befand, der solche Erhöhungen erzeugt hätte. Die Glaskuppel des Pyranometers wurde belüftet und zudem ist in den an Bord gemessenen Daten der solaren Strahlung ein ähnlicher Verlauf der solaren Strahlung zu sehen. Die Polarstern befand sich den ganzen Tag in Meereis, das zu 90% das Wasser bedeckte.

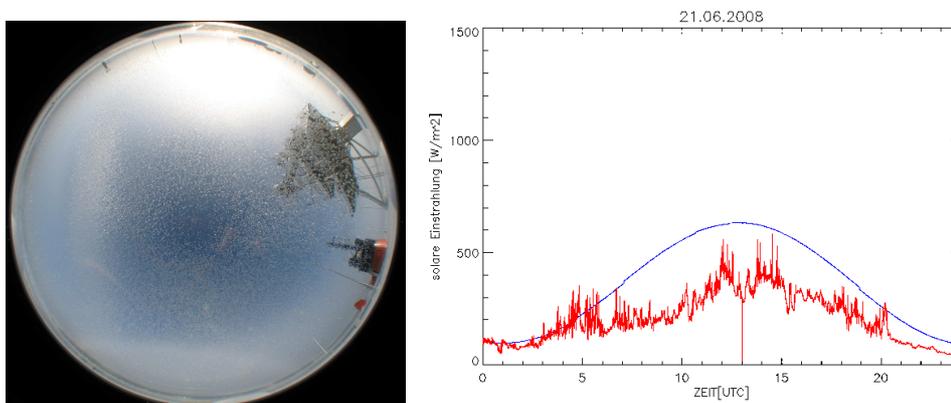


Abbildung 6.8: Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (04:49 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 21.06.2008.

22.06.08 Der Tag war von einer Stratocumulusbewölkung geprägt, die im Laufe des Tages immer wieder aufbrach und zuzog. Während einer Bedeckung von $3/8$ ereignete sich eine geringe Strahlungserhöhung um etwa 123 W/m^2 (18%). Diese dauerte auch nur einige Sekunden an, bis Wolken die Sonne wieder verdeckten. Auch die optische Erscheinung eines Halos, ein 22° Ring um die Sonne, welcher durch winzige Eiskristalle in der Luft oder durch Cirrostratusbewölkung erzeugt wird, war im Laufe des Tages öfter zu beobachten. Die Bedeckung des Wassers von Meereis war am Anfang des Tages noch über 80%. Zum Abend hin jedoch verließ das Schiff die Eisgrenze, sodass nur noch einzelne Eisschollen zu sehen waren. Die Ausreißer, die in der parametrisierten Kurve um 15 UTC zu sehen sind, entstanden durch Messfehler der relativen Feuchte, die in die Parametrisierung des wolkenfreien Himmels eingeht.

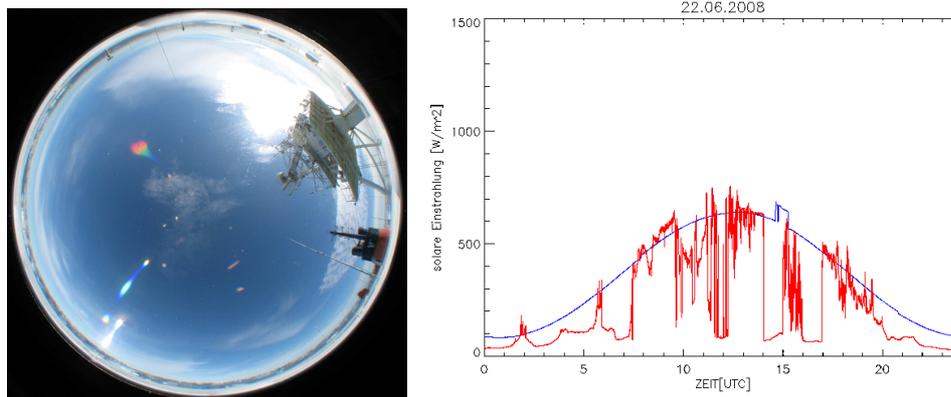


Abbildung 6.9: Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (11:27 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 22.06.2008.

23.06.08 Nachdem die Eisgrenze verlassen wurde, konnte man einen Anstieg der optischen Dicke der Bewölkung beobachten. Größtenteils war der Himmel von einer dichten Stratocumulusbewölkung bedeckt. Nur selten ließ diese den Blick auf eine hohe dünne Cirrusschicht frei. Kurz nach 18 UTC konnte der größte Strahlungsanstieg mit 128 W/m^2 um 35% gemessen werden. Der Himmel war 6/8 mit Cirrus und Cumulus bedeckt, der Sonnenzenitwinkel betrug $67,04^\circ$.

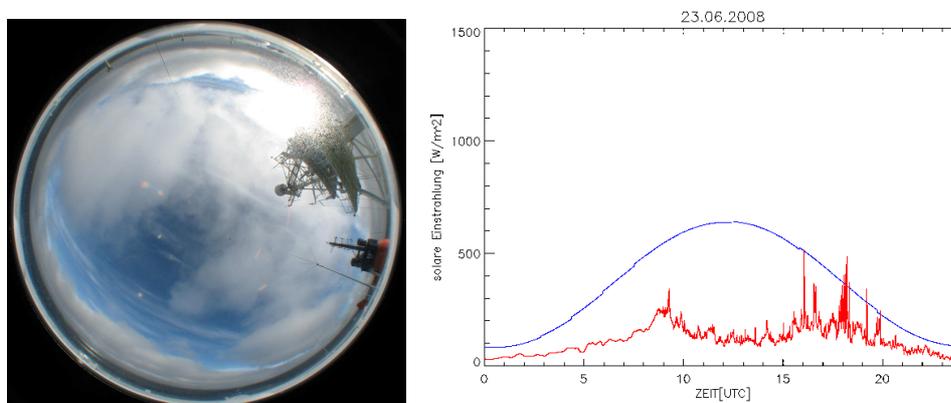


Abbildung 6.10: Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (18:12 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 23.06.2008.

6.2.1 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich die zeitlich längsten Strahlungserhöhungen bei sehr flachem Einfallswinkel der Sonne ereigneten. Die Sonne war zu diesen Zeitpunkten meist von einer dünnen Wolkenschicht teilweise verdeckt. Bei weniger flachen Sonnenzenitwinkeln ereigneten sich ebenfalls starke Erhöhungen der solaren Strahlung. Diese hielten jedoch in der Regel nicht sehr lange an. Während der Strahlungserhöhungen traten Wolkenlücken in der Nähe der Sonne auf. Zum Zeitpunkt der kleineren Strahlungserhöhungen wie z.B am 19. Juni zwischen 16 und 17 UTC, war der Himmel unbedeckt. Lediglich aufgrund der hohen Albedo des Bodens konnte Strahlung an die Sensoren zurückreflektiert werden und verursachte diese Strahlungsspitzen. Kleinere Erhöhungen um 15 UTC kamen zustande, als eine dünne hohe Wolkenschicht die Sonne verdeckte. Es gab keine Lücken in unmittelbarer Nähe zur Sonne. Auch am 17.06. erkennt man bei Betrachtung der Wolkenbilder, dass durch geringeren Abstand der Wolkenlücken zur Sonne die Strahlungserhöhungen ansteigen. Sind die Wolken hoch genug spielt die Lage der Wolke den Sensor betreffend keine große Rolle.

In Tabelle 6.1 sind die stärksten Strahlungserhöhungen der jeweiligen Tage in absoluten und relativen Werten, die Dauer dieser Erhöhungen, Uhrzeit und der vorherrschende Sonnenzenitwinkel zum Zeitpunkt der Erhöhung dargestellt. Die Absolutwerte der Strahlungserhöhungen liegen zwischen 130 und 350 W/m^2 . Bei sehr tiefem Sonnenstand treten kleinere Erhöhungen auf, die allerdings auch am längsten andauern. Die Erhöhung am 21. Juni dauerte am längsten an, wurde allerdings nicht durch Wolkenlücken oder Wolkenrändern verursacht, sondern durch reflektierende Eiskristalle in der Luft.

Tag	Erhöhung [%]	Erhöhung [W/m^2]	Dauer bei 10% Erh.[sec]	Dauer bei 20% Erh.[sec]	Dauer über clearsky [sec]	Uhrzeit [UTC]	Zenitwinkel θ [°]
17.06.2008	46,99	349	12	16	30	12 : 17	45,26
18.06.2008	22,52	154	16	20	22	12 : 14	49,27
19.06.2008	40,85	258	16	24	44	14 : 20	51,57
20.06.2008	33,78	209	118	176	212	11 : 31	74,50
21.06.2008	48,02	115	14	22	368	04 : 49	74,50
22.06.2008	19,60	123	68	--	142	11 : 27	52,48
23.06.2008	35,56	128	14	20	62	18 : 12	67,04

Tabelle 6.1: Tabelle der Strahlungserhöhungen für den Fahrtabschnitt ARK-XXIII/1

6.3 Strahlungsparametrisierungen

Mit Hilfe der in Kapitel 3 dieser Arbeit erläuterten Parametrisierungen der nach unten gerichteten solaren und terrestrischen Strahlung werden nun einzelne Tage der Forschungsfahrt untersucht. Für die Parametrisierungen wurden zum Einen die an Bord im Minutentakt gemessenen Werte der Temperatur, relativen Feuchte und die Position zur Berechnung des Sonnenstandes verwendet. Zum Anderen wurden die Werte des Bedeckungsgrades, die im 15 Sekundentakt aus den Wolkenkamerabildern berechnet wurden, auf eine Minute gemittelt und ebenfalls in die Parametrisierungen eingefügt. Um die Parametrisierungen nun mit dem wahren Wert der gemessenen Einstrahlung vergleichen zu können, musste auch die im Zweisekundentakt gemessene solare Strahlung auf eine Minute gemittelt werden.

Abb. 6.11 und 6.13 zeigen die Strahlungsparametrisierungen der kurzwelligen solaren Einstrahlung nach Zillmann, Shine, Bennett und Shine/Bennett, sowie die minütlichen Meßwerte für den 19. und 21. Juni 2008. Dargestellt ist der Tagesgang der gemessenen Einstrahlung als schwarze Kurve, die Kurven der Parametrisierungen sind in unterschiedlichen Farben dargestellt.

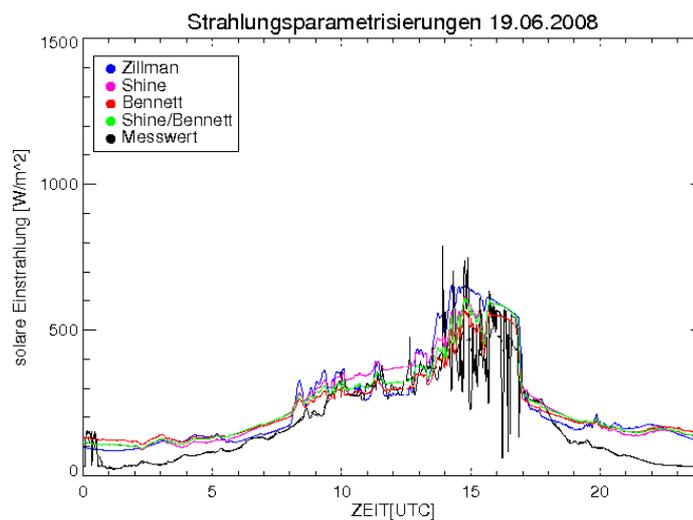


Abbildung 6.11: Solare Einstrahlung und Parametrisierungen der Einstrahlung am 19.06.2008

Die Parametrisierungen der kurzwelligen solaren Strahlung für den 19. Juni (Abb.6.11) verlaufen am Morgen und am Abend größtenteils über der schwarzen Kurve. Am Mittag und Nachmittag stimmen sie mit der gemessenen Kurve besser überein. Die starken Schwankungen können sie jedoch nicht wiedergeben.

Betrachtet man die langwellige nach unten gerichtete Strahlung (Abb. 6.12) erkennt man, dass diese in den Morgenstunden mit dem Verlauf des, anhand der Wolkenfotos berechneten, Bedeckungsgrades gut übereinstimmt. Nach 20 UTC nimmt der Bedeckungsgrad anhand der Ergebnisse des Programms zur Berechnung des Bedeckungsgrades ab. In Wirklichkeit war dies jedoch nicht der Fall, was man anhand der langwelligen Strahlung

erkennt (Abb. 6.12). Auf den Wolkenfotos ist zu erkennen, dass der Himmel zu 8/8 mit Wolken bedeckt war. Daher wird hier die kurz- und auch langwellige Strahlung falsch parametrisiert. Der Bedeckungsgrad für die Nacht und Vormittag wird jedoch weitestgehend durch das Programm richtig interpretiert, wie man auch am Verlauf der langwelligen Einstrahlung erkennen kann. Sieht man sich nochmals Abb.6.11 für denselben Zeitraum an, so erkennt man, dass die Parametrisierungen der Einstrahlung den Messwert deutlich überschätzen. Das liegt daran, dass direkt vor der Sonne, die nur knapp über dem Horizont stand, eine mächtige Stratusschicht lag, die keine direkte Strahlung bis zum Sensor durchließ.

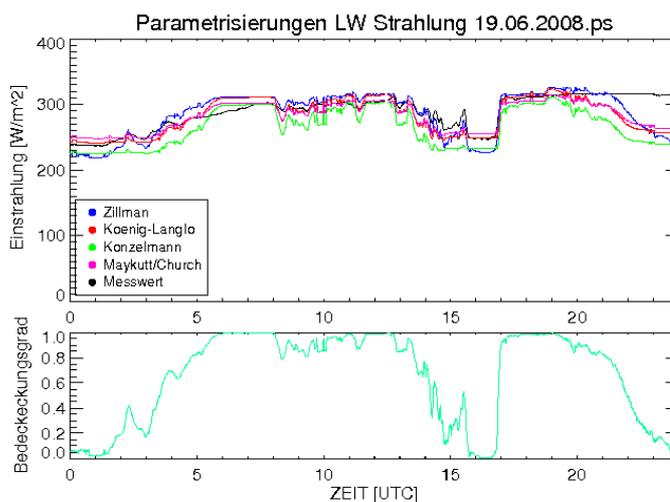


Abbildung 6.12: Gemessene und parametrisierte langwellige Strahlung und berechneter Bedeckungsgrad anhand der Wolkenfotos am 19.06.2008

Betrachtet man die Parametrisierungen der kurzwelligen Strahlung für den 21. Juni in Abb. 6.13, so erkennt man, dass sie den Verlauf der schwarzen Messkurve am Vormittag recht gut verfolgen. Am Mittag und im Verlauf des Nachmittags jedoch sieht man in den Parametrisierungen deutliche Abweichungen zur Messkurve. Die gemessene Einstrahlung war deutlich höher als die parametrisierte. An diesem Tag war der Himmel fast vollständig bedeckt, jedoch von einer sehr wechselhaften Wolkenschicht. Die optische Dicke variierte stark. Sie lag meistens unterhalb von 10, da die Sonne zu erkennen war². Es wechselten sich aber auch immer wieder Wolken mit einer höheren optischen Dicke ab. Ferner war der Himmel sehr diesig, was an schwebenden Eiskristallen in der Luft lag (siehe Kamerabild in Abb.6.8).

In Abb. 6.12 erkennt man dass, ab einem Bedeckungsgrad von 5/8 bis 6/8 die Parametrisierung der langwelligen Gegenstrahlung nach Zillman über der Messkurve verläuft. Die übrigen Parametrisierungen verlaufen erst bei höherem Bedeckungsgrad darüber.

²Ist die Sonne noch durch die Wolken erkennbar, beträgt die optische Dicke der Wolken laut Definition weniger als $\tau = 10$

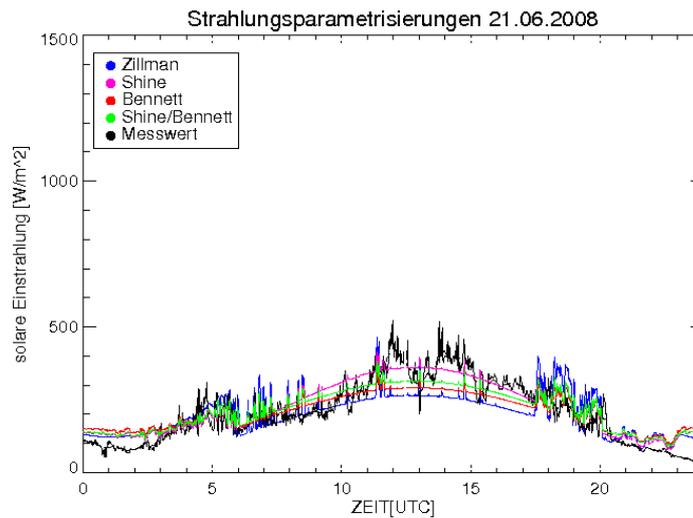


Abbildung 6.13: Solare Einstrahlung und Parametrisierungen der Einstrahlung am 21.06.2008

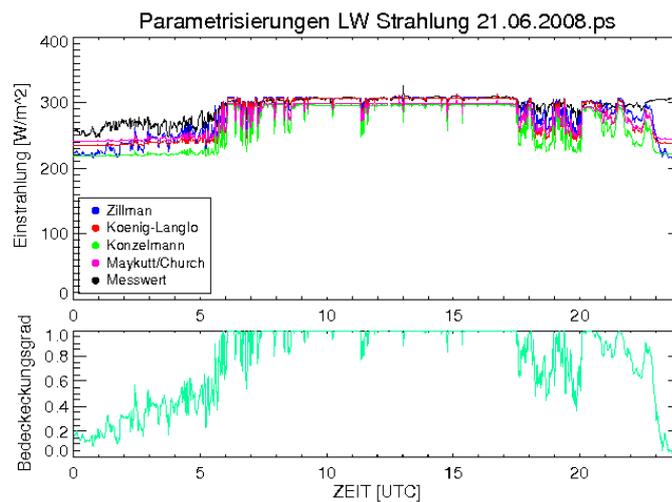


Abbildung 6.14: Gemessene und parametrisierte langwellige Strahlung und berechneter Bedeckungsgrad anhand der Wolkenfotos am 21.06.2008

Einen etwas anderen Verlauf erkennt man am 21.06.08 (Abb.6.14). Bei voller Bedeckung liegen die Parametrisierungen hier unter oder auf der Messkurve. Die Temperatur lag zu diesem Zeitpunkt ca. 5° Celsius unter der Temperatur vom 19. Juni. Außerdem war die optische Dicke der Wolken am 19. Juni geringer. Die Parametrisierungen von Konzelmann und M & C weisen einen fast identischen Verlauf auf. Dies liegt daran, dass für beide eine konstante Emissivität der Atmosphäre gewählt wurde und dass die Gleichungen für die nach unten gerichtete langwellige Strahlung für alle Bedeckungsgrade beinahe identisch sind. Die langwellige Gegenstrahlung am 21. Juni in Abb. 6.14 ist rela-

tiv zu den Parametrisierungen am 19. Juni in Abb. 6.12 größer. Der Grund dafür könnten schwebende Eiskristalle sein. Nach Lesins können Eiskristalle in der Luft die langwellige Gegenstrahlung um bis zu 80 W/m^2 erhöhen [Lesins et al.(2009)].

6.3.1 Güte der Parametrisierungen

Um die Güte der Parametrisierungen der kurzwelligigen Strahlung anschaulich darzustellen, wurden die Messwerte in Abb. 6.15 und 6.16 gegen die Parametrisierung der solaren Strahlung aufgetragen. Die Achsen der Grafiken stellen jeweils die solare Einstrahlung in W/m^2 dar. In den Grafiken ist für beide Tage zu erkennen, dass die Parametrisierungen meistens die gemessenen Werte bis 250 W/m^2 überschätzen. Zwischen 250 und 400 W/m^2 liegen die Parametrisierungen gleichmäßig um den Messwert gestreut.

Für den 19. Juni (Abb. 6.15) zeigen die Parametrisierungen teilweise erhebliche Abweichungen vom gemessenen Wert. Ursache hierfür sind die starken Schwankungen in der solaren Einstrahlung für Werte über 400 W/m^2 . Während der Himmel einen sehr hohen Bedeckungsgrad aufweist, können diese Strahlungsspitzen nicht parametrisiert werden.

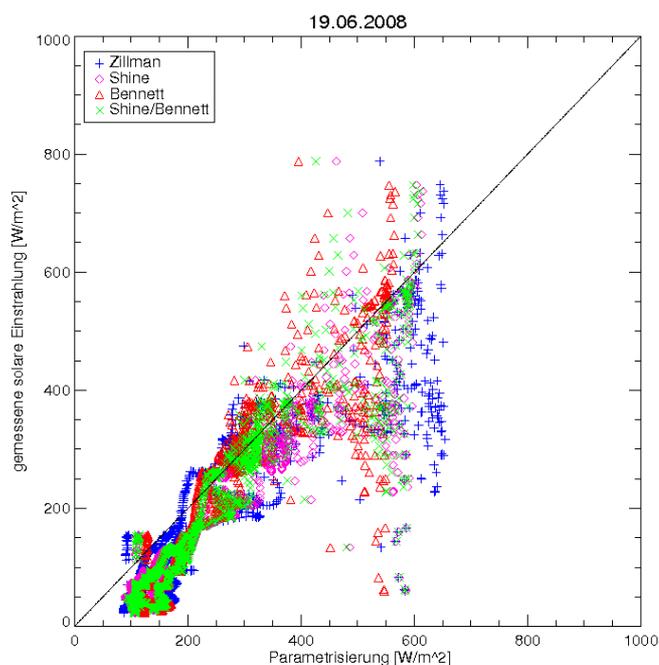


Abbildung 6.15: Gemessene solare Einstrahlung aufgetragen über die Parametrisierungen für den 19.06.2008

Für den 21. Juni (Abb. 6.16) stellt man fest, dass keine Parametrisierung Werte berechnet, die über 400 W/m^2 hinausgehen. In den Streuplots kann man außerdem erkennen, dass die Parametrisierungen von Zillman den größten Abstand insgesamt zu den Messwerten haben. Die größten Unterschätzungen der solaren Einstrahlung sind bei vermeintlich vollem Bedeckungsgrad entstanden. Durch kleinere Wolkenlücken und einer geringen

optischen Dicke war die gemessene Einstrahlung zum Teil sehr viel höher als die Ergebnisse der Parametrisierungen.

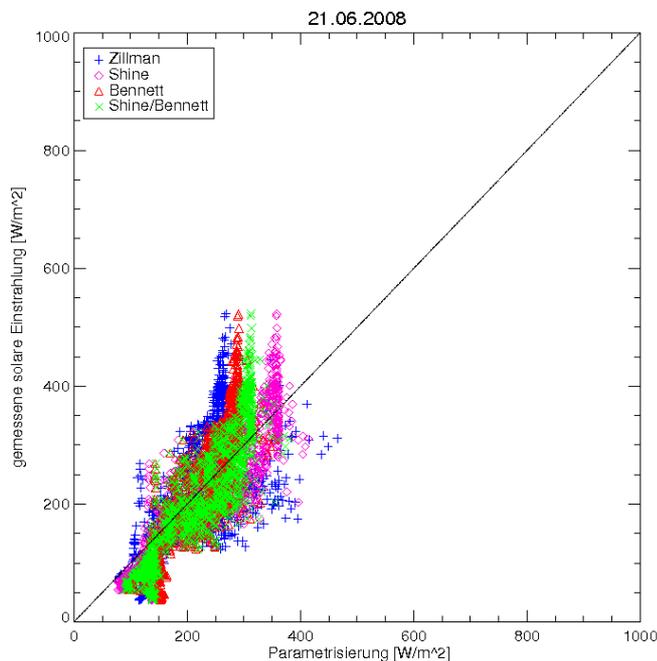


Abbildung 6.16: Gemessene solare Einstrahlung aufgetragen über die Parametrisierungen für den 21.06.2008

Die Tabellen 6.2 und 6.3 stellen die Korrelationen und den RMSE der einzelnen Parametrisierungen der kurzwelligigen Strahlung dar. In Tabelle 6.2 erkennt man, dass die Parametrisierung von Shine am stärksten mit den Messwerten für den 19. Juni korreliert ist³. Der *Root Mean Square Error*⁴ (RMSE) zeigt die geringste Abweichung bei der Parametrisierung von Bennett. Für den größtenteils bedeckten Himmel (Tabelle 6.3), haben die Parametrisierungen einen kleineren Fehler, der zwischen 50 und 74 W/m^2 liegt.

In Abb. 6.14 (unten) ist die parametrisierte langwellige Strahlung dargestellt. Man erkennt, dass der Bedeckungsgrad in der Parametrisierung von Zillman, vor allem bei kleineren Bedeckungsgraden, einen stärkeren Einfluss hat als es für die drei anderen Parametrisierungen der Fall ist. Dieses Verhalten lässt sich mit Gleichung 3.24 erklären. Der Bedeckungsgrad geht hier linear in die Gleichung ein.

Dasselbe Verhalten ist auch in Abb. 6.17 zu sehen. Aufgetragen sind hier die Parametrisierungen der langwelligigen Strahlung für alle Bedeckungsgrade über den Bedeckungsgrad. Hier macht sich die Nichtlinearität der Parametrisierungen insofern bemerkbar, dass für einen bestimmten Bereich des Bedeckungsgrades Zillman höhere Werte berechnet als

³In diesem Fall wurde die optische Dicke auf 10 gesetzt, da sie den Wolkenbildern nach zu urteilen den Tag über etwa um diesen Wert schwankte.

⁴Der RMSE ist ein Maß für die Differenz zwischen zwei Messreihen. Näheres dazu siehe unter http://en.wikipedia.org/wiki/Mean_squared_error

die übrigen drei. Bei vollbedecktem Himmel unterscheiden sich die Parametrisierungen kaum, lediglich 20-30 W/m^2 liegen sie auseinander.

Parametrisierung 19.06.08	Korrelation	RMSE [W/m^2]
Zillman	0.879	97.97
Shine	0.923	87.13
Bennett	0.901	83.48
Shine/Bennett	0.908	85.34
Shine $\alpha_u = 0.4, \tau = 15$	0.892	76.77

Tabelle 6.2: Korrelation und RMSE der kurzwelligen Strahlungsparametrisierungen für den 19. Juni

Parametrisierung 21.06.08	Korrelation	RMSE [W/m^2]
Zillman	0.716	74.13
Shine	0.905	68.31
Bennett	0.873	61.05
Shine/Bennett	0.886	54.75
Shine $\alpha_u = 0.61, \tau = 15$	0.893	50.05

Tabelle 6.3: Korrelation und RMSE der kurzwelligen Strahlungsparametrisierungen für den 21. Juni

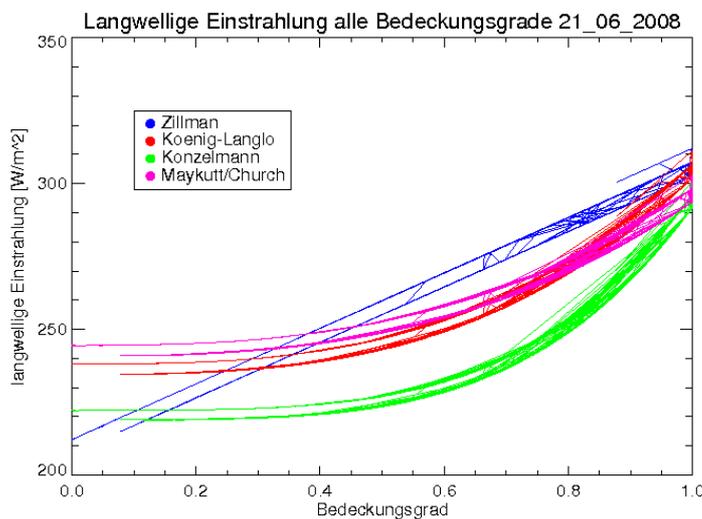


Abbildung 6.17: Langwellige Strahlung aufgetragen über dem Bedeckungsgrad aus den Daten vom 21.06.08

Betrachtet man den RMSE und die Korrelation der Parametrisierungen für die langwellige Strahlung (Tabelle 6.4 und 6.5) kann man sehen, dass der Fehler bei allen Parametrisierungen etwa $17\text{-}36\text{ W/m}^2$ beträgt.

Maykut und Church haben für den 19. und 21. Juni den kleinsten Fehler. Bei der Korrelation liegen die Parametrisierungen jedoch nicht weit voneinander entfernt. Für den 19. Juni, bei wechselhafter Bewölkung zeigt Zillmans Parametrisierung die größte Korrelation mit den Messwerten.

Parametrisierung 19.06.08	Korrelation	RMSE [W/m^2]
Zillman	0.800	20.55
Konzelmann	0.707	31.40
König-Langlo	0.745	19.97
Maykut & Church	0.784	17.14

Tabelle 6.4: Korrelation und RMSE der langwelligen Strahlungsparametrisierungen für den 19. Juni

Parametrisierung 21.06.08	Korrelation	RMSE [W/m^2]
Zillman	0.824	22.59
Konzelmann	0.819	36.37
König-Langlo	0.836	23.20
Maykut & Church	0.843	21.17

Tabelle 6.5: Korrelation und RMSE der langwelligen Strahlungsparametrisierungen für den 21. Juni

In diesem Abschnitt wurde gezeigt, dass die Parametrisierungen der kurzwelligen Strahlung kleinere Messwerte solarer Einstrahlung meist überschätzen, wobei die Parametrisierungen nahe zusammenliegen. Wird die Einstrahlung größer als etwa 350 W/m^2 liegen die Parametrisierungen meist unterhalb der Messwerte. Zillman zeigt dabei die größten Werte. Bei bedecktem Himmel ist der Fehler der Parametrisierungen insgesamt kleiner als an einem Tag mit wechselhafter Bewölkung. Für die Parametrisierungen der langwelligen Gegenstrahlung ist der Fehler kleiner, wenn der Himmel nicht bedeckt ist, da Wolken eine große Rolle in langwelligen Strahlungsbilanz spielen.

Im folgenden Kapitel werden dieselben Untersuchungen in Bezug auf Daten, die während der Antarktisexpedition gemessen wurden, durchgeführt.

Kapitel 7

Expedition ANT-XXV/2

7.1 Wetterlage und Fahrtverlauf

Der Ausgangs- und Endpunkt des ANT-XXV/2 Fahrt-Abschnittes der Polarstern Expedition war der Hafen von Kapstadt. Am Nachmittag des 6. Dezembers 2008 legte der Eisbrecher Polarstern in Richtung Antarktis ab. Mit zunehmendem Abstand zum afrikanischen Kontinent sank die Windstärke bis zum nächsten Tag auf 5 Bft ab. Der Wind wurde durch ein subtropisches Hochdrucksystem mit einem Kerndruck von 1025 hPa west-süd-westlich von Südafrika verursacht. Bis die ersten Eisberge am 11. Dezember bei etwa 54° Süd und einer Luft- und Wassertemperatur von ca. -1° Celsius, zu sehen waren, blieben die Wetterbedingungen aufgrund durchziehender Kaltfronten wechselhaft. Am 10. Dezember nahm der Wind auf 8 Bft mit Wellenhöhen von 5-6 Metern zu. Am 12. Dezember bei etwa 58° südlicher Breite wurde die Eisgrenze erreicht. Bei guten Sichtverhältnissen wehte der Wind mit durchschnittlich 4 Bft aus Südwest. Ab dem 16. Dezember bestimmte ein flaches Hochdruckgebiet das Wetter in der Region um die Neumayerstation ¹.

Während des Aufenthaltes in der Atka Bucht lagen die Tagestemperaturen um $-4^\circ C$, die Minima in der Nacht bei ca $-10^\circ C$. Da sich das Fahrtgebiet in der Region eines Rückens befand, waren die Luftdruckgradienten nach Verlassen der Shelveiskante am 20. Dezember schwach. Am 21. Dezember erreichte eine Kaltfront von westlicher Richtung das Schiff, welche leichte Schneeschauer aus ihrer Frontseite hervorbrachte. Eine weitere Kaltfront, die das Schiff am 24. Dezember passierte, brachte am darauffolgenden Tag erneut leichten Schneefall.

¹Die Neumayer Station wurde nach dem Geophysiker Georg von Neumayer benannt und ist eine deutsche Polarforschungsstation des Alfred-Wegener-Instituts in der Antarktis

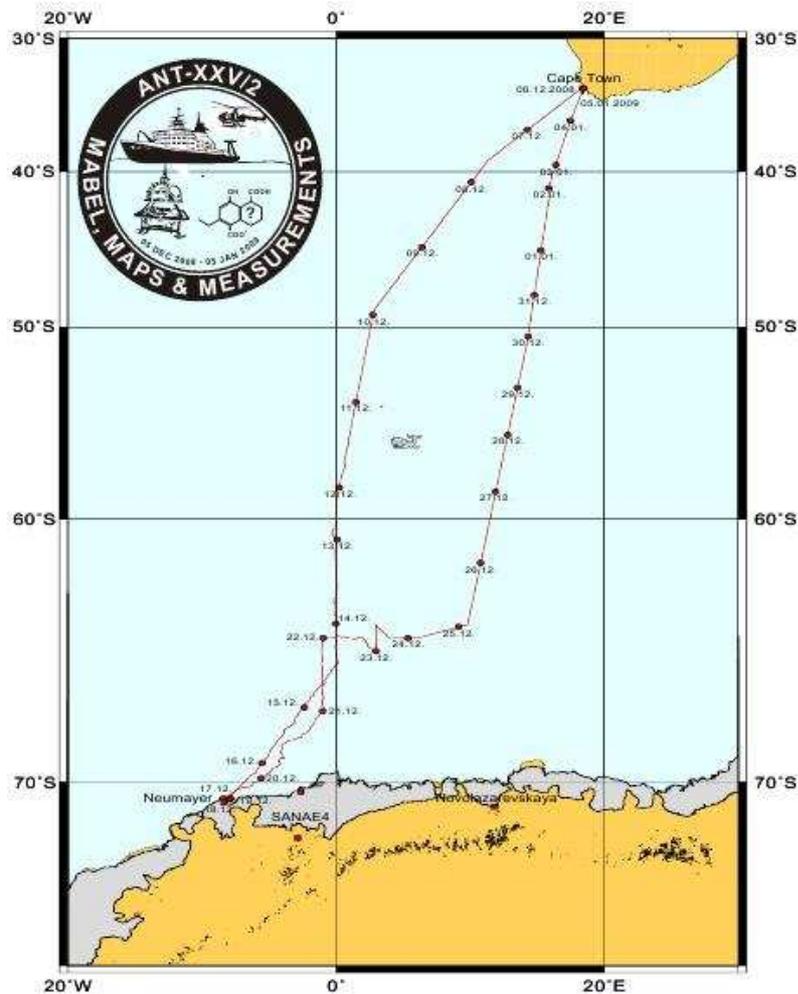


Abbildung 7.1: Fahrtroute der ANT 25-2 Expedition

Bis die Eisgrenze am 25. Dezember wieder verlassen wurde, bestimmte eine Tief, dessen Zentrum nordwestlich der Neumayerstation lag, das Fahrtwetter. Bis zum Morgen des 29. Dezembers lag eine Frontalzone über dem Fahrtgebiet. Während dieser Zeit betrug die Windgeschwindigkeit zwischen 5 und 7 Bft. Am 30. Dezember kam das Schiff wieder unter Hochdruckeinfluss und in den darauffolgenden Tagen durchquerte Polarstern den subtropischen Hochdruckgürtel. Bevor das Schiff am Morgen des 5. Januar 2009 den Hafen erreichte, nahm der Wind in der Kapregion wieder auf bis zu 8 Bft zu. Die gesamte Fahrtroute der ANT XXV-2 Expedition ist in Abb. 7.1 grafisch dargestellt.

7.2 Strahlungserhöhungen

Dank des Pyranometers und Pyrgeometers an Bord wurden auch während dieser Fahrt Strahlungserhöhungen mit Werten bis über 500 W/m^2 beobachtet. Bei welchen Bedingungen des Himmels es zu Strahlungserhöhungen kommen kann, ist in Kapitel 2.2.2 nachzulesen.

Es folgt eine kurze Beschreibung der Tage, an denen das Forschungsschiff von Meereis umgeben war. Meist war dieses zusätzlich von Schnee bedeckt und wies daher eine hohe Albedo auf. Zu jedem Tag wurde eine Grafik erstellt (siehe Abb. 7.3 bis 7.18) mit den jeweils dazugehörigen Bildern der Wolkenkamera, die zum Zeitpunkt der stärksten Strahlungserhöhung gemacht wurden. Die rote Kurve stellt die tatsächliche Einstrahlung dar. Die blaue Kurve beschreibt die solare Einstrahlung nach Zillman (Gleichung 3.5 [Zillman(1972)]), für einen wolkenfreien Himmel. Anhand der Differenzen beider Kurven kann die Strahlungserhöhung, für die betreffenden Tage bestimmt werden. Die Bodenalbedo geht in keine der hier besprochenen Parametrisierungen der solaren Strahlung für den *unbewölkten* Fall ein, da auch keine Wolken vorhanden sind, die die reflektierte Strahlung am Boden zurückreflektieren können. Die Reflektion an Partikeln in der Atmosphäre spielt jedoch auch eine Rolle, wie man in Abb. 7.9 und 7.10 sehen wird. Dort ist die Einstrahlung der solaren Strahlung am Boden 100 bis 200 W/m^2 höher als die Parametrisierung.

In Abb. 7.2 ist das Forschungsschiff Polarstern im Meereis und an der Schelfeiskante zu sehen.



Abbildung 7.2: Polarstern im Meereis am 18.12.2008 (links) und an der Schelfeiskante am 19.12.2008 (rechts). Bilder: privat und www.realnature.tv.

11.12.08 An diesem Tag befand sich das Forschungsschiff kurz vor der Eisgrenze. Es waren lediglich ein paar große Eisberge zu sehen. Um 10:40 UTC ereignete sich der stärkste Strahlungsanstieg des Tages mit 47,59%. Zu diesem Zeitpunkt befand sich eine Stratocumulusschicht mit einer Bedeckung von ca. 7/8 und einer optischen Dicke kleiner als 10 über dem Sensor des Messgerätes. Im Verlauf der nächsten Stunden sind immer wieder Strahlungserhöhungen in der Grafik zu erkennen, die sich aufgrund einer dünnen

Stratocumulusschicht und der später folgenden Altocumulus Bewölkung ergaben. Im weiteren Verlauf wird die Altocumulusschicht immer dichter. Zum selben Zeitpunkt nimmt die Stärke der Einstrahlung ab.

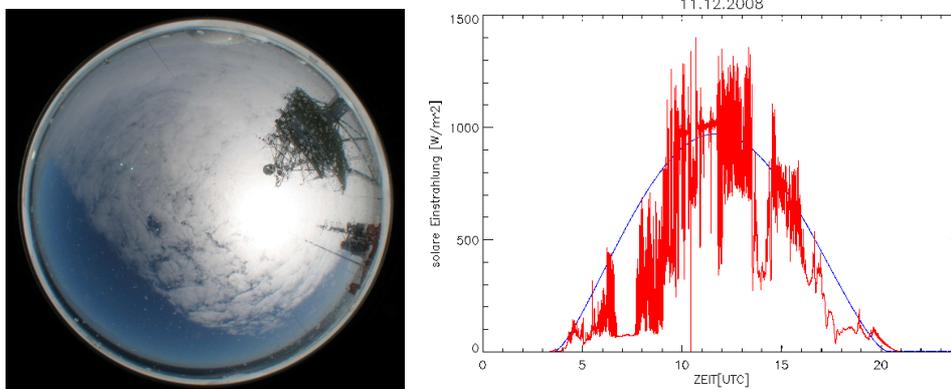


Abbildung 7.3: Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (10:40 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 11.12.2008.

12.12.08 Der 12. Dezember war von vielen Wolken geprägt. Am Nachmittag nahm die Bedeckung erst ab, stieg dann aber fast bis zur vollen Bedeckung an. Hauptsächlich handelte es sich um Stratocumuli und Cirrostratus, der zum Abend zunehmend zu Stratus wurde. Die Polarstern befand sich den ganzen Tag in Gewässern, die zu 90% von Meereis bedeckt waren. Die größte Erhöhung mit über 521 W/m^2 oder auch 57% über der parametrisierten Einstrahlung fand um kurz vor 11 UTC bei einem Zenitwinkel von ca. 37° statt. Zu diesem Zeitpunkt war der Himmel fast vollständig von einer dünnen Stratocumulusschicht bedeckt, durch deren Lücken die Sonne durchscheinen konnte.

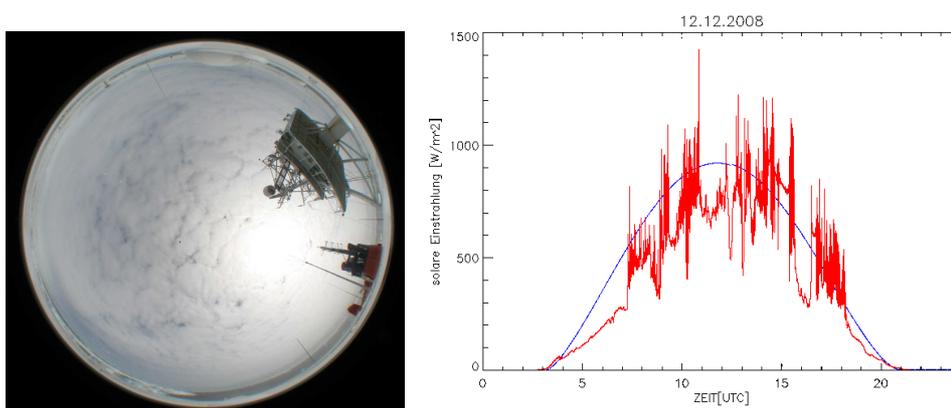


Abbildung 7.4: Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (10:51 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 12.12.2008.

13.12.08 Der Himmel war zunächst fast vollkommen bedeckt und lockerte am Mittag und Nachmittag auf etwa 3/8 Bewölkung auf. Mit knapp über 50% (387 W/m^2) erfuhr das Strahlungsmessgerät um 14:34 UTC die größte Erhöhung des Tages. Zu diesem Zeitpunkt war der Himmel von einer sehr dünnen Stratocumulusschicht zu etwa 6/8 bedeckt. Später schob sich eine optisch dickere Cumulusschicht unter den Stratus und verdichtete sich. Die solare Einstrahlung sank deutlich.

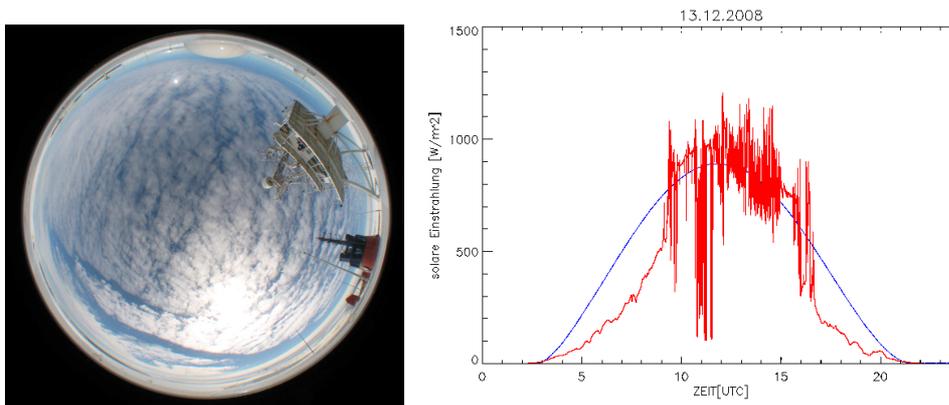


Abbildung 7.5: Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (14:34 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 13.12.2008.

15.12.08 Zum Zeitpunkt der größten Strahlungserhöhung, die mit 74,11% eine absolute Erhöhung um 592 W/m^2 ergab, zeigte der Himmel eine Stratocumulusbewölkung mit 6/8 Bedeckung. Die gesamte Strahlungserhöhung verlief über einen Zeitraum von knapp 3 Minuten bei einem Zenitwinkel von etwa 44° .

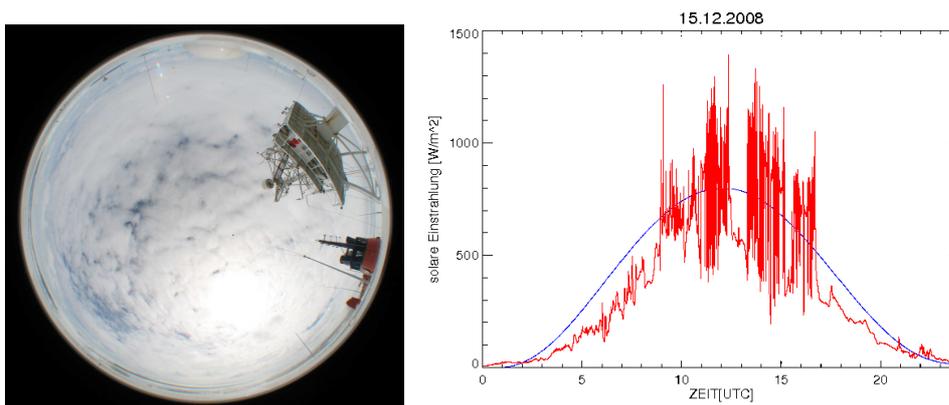


Abbildung 7.6: Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (12:21 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 15.12.2008.

16.12.08 Im Verlauf des Tages war der Himmel größtenteils mit einer dünnen hohen Cirrostratusschicht und einer tieferen dichteren Stratocumulusschicht bedeckt, die teilweise auch Lücken aufwies. An diesem Tag gab es kaum Strahlungserhöhungen. Um 11:12 UTC ereignete sich eine Erhöhung der Strahlung um 11,3% aufgrund einer Wolkenlücke in der tieferen Wolkenschicht.

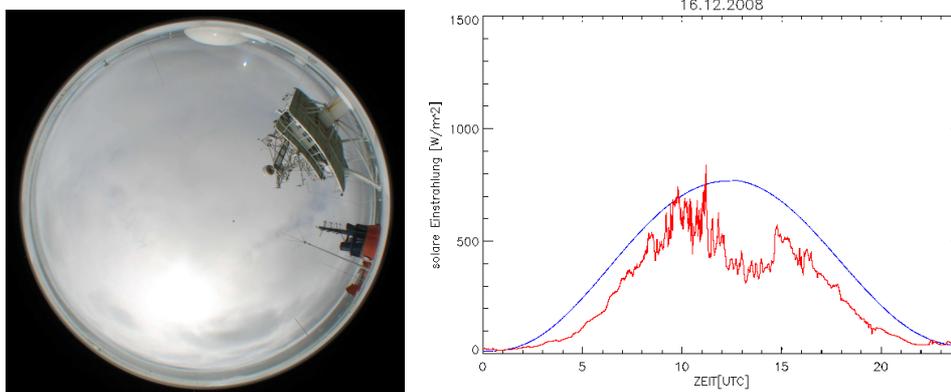


Abbildung 7.7: Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (11:12 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 16.12.2008.

17.12.08 In der Nacht zum 17.12.08 erreichte das Forschungsschiff Polarstern die Umgebung der Neumayer Station. Die Polarstern legte im Meereis an und blieb bis zum Abend des nächsten Tages. Das gesamte Schiff war bis auf das Heck (siehe Abb. 7.2 (links)) von einer geschlossenen schneebedeckten Meereisdecke umgeben. Am Morgen erreichte die solare Einstrahlung die stärkste Erhöhung mit 279 W/m^2 (54%) bei einem Sonnenzenitwinkel von ca. 60° und einer Cirrostratusbewölkung von 7/8. Der gesamte Zeitraum, in dem die Strahlung 10% um den Höchstwert schwankte, betrug etwa 8 1/2 Minuten.

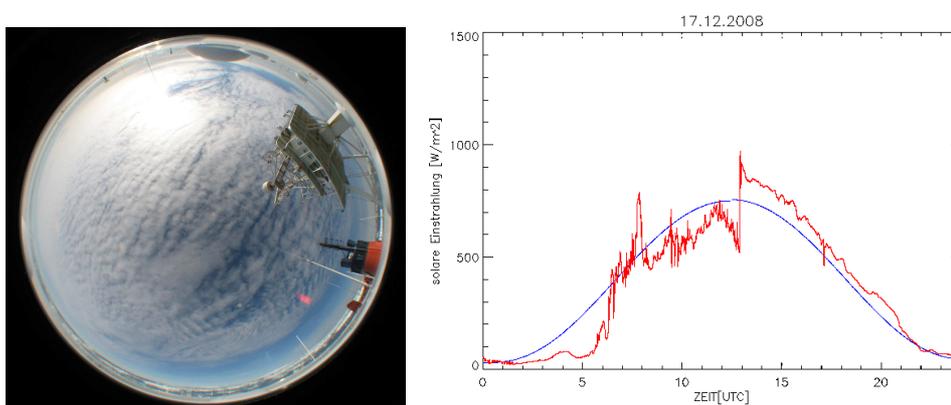


Abbildung 7.8: Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (07:51 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 17.12.2008.

18.12.08 Der 18. Dezember war von einem wolkenfreien Himmel geprägt. Allein in den frühen Morgenstunden zwischen 1 und 4 UTC war der Himmel von einer homogenen Stratusbewölkung bedeckt. zwischen 8 und 10 UTC befand sich die Sonne hinter den Aufbauten des Schiffes. Dies erkennt man an den Einbrüchen in den Messwerten. Die größte Strahlungserhöhung wurde mit 127 W/m^2 (17%) um 13:36 UTC gemessen. Die gesamte Kurve der Parametrisierung jedoch verläuft meist unter der Messkurve.

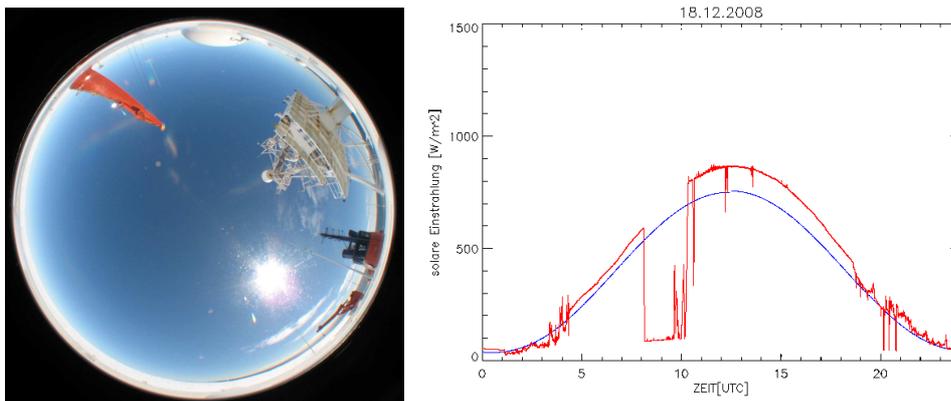


Abbildung 7.9: Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (13:36 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 18.12.2008.

19.12.08 An diesem Tag lag das Schiff an einer Schelfeiskante (siehe Abb. 7.2 (rechts)). Diese ragte etwa 2 m über die Messgeräte hinaus. Die maximale Einstrahlung wurde um 14:57 UTC mit 816 W/m^2 erreicht (Erhöhung um 19,5%). Zu diesem Zeitpunkt befand sich eine dünne Wolkenschicht vor der Sonne. Auch hier verläuft die Messkurve stetig über der Parametrisierung. Man erkennt jedoch, dass sich die Messkurve, anders als am 18. Dezember, gerade am Vormittag denselben Abstand zur Parametrisierung aufweist.

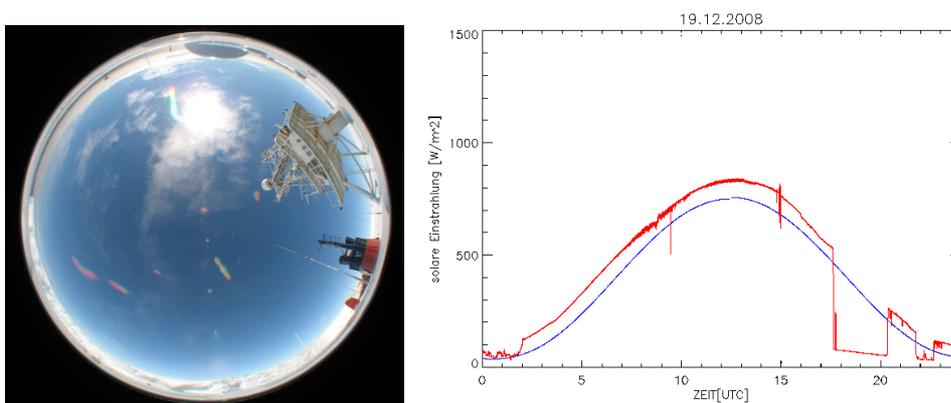


Abbildung 7.10: Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (14:57 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 19.12.2008.

20.12.08 Zwischen 5 und 6 UTC verließ die Polarstern die Schelfeiskante. Zum selben Zeitpunkt traten auch immer häufiger Wolken auf, was man auch in der zunehmend schwankenden solaren Einstrahlung erkennt. Zwischen 16 und 17 UTC erkennt man wiederum einen starken Abfall der gemessenen solaren Einstrahlung. Diese Abnahme steht im Zusammenhang mit dem Übergang der Stratocumuli in eine dichte Stratusschicht. Die größte prozentuale Strahlungserhöhung, die während der gesamten Fahrt gemessen wurde, ereignete sich am 20. Dezember bei einem Sonnenzenitwinkel von 48° um 10:56 UTC. Um 77,49% lag der gemessene Wert über der Parametrisierung. Das ist etwa eine Zunahme um 573 W/m^2 , die zu der Einstrahlung im wolkenfreien Fall von 740 W/m^2 hinzukommen. Somit lag dieser Wert sogar über dem Maximum der gemessenen Strahlungserhöhung von Sylt im Jahre 2007 [Jahnke(2008)]. Der gesamte Anstieg über der Zillman-Kurve dauerte 1 Minute und 22 Sekunden. Der Himmel war zu 7/8 von Stratocumuluswolken bedeckt, jedoch befand sich eine Wolkenlücke direkt neben der Sonne, wie man in Abb. 7.11 sieht.

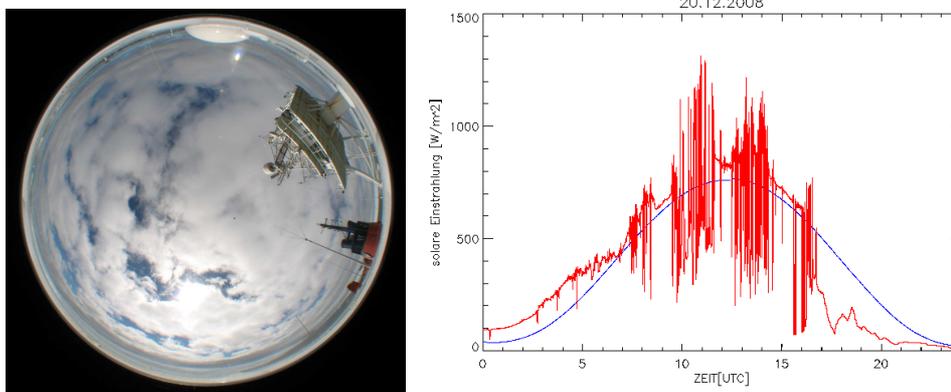


Abbildung 7.11: Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (10:56 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 20.12.2008.

21.12.08 Den größten Teil des Tages war der Himmel vollständig bedeckt. Um 9:13 UTC gab es die größte Erhöhung der solaren Einstrahlung um ca. 52% mit 356 W/m^2 . Zur selben Zeit hatte das Wasser um das Schiff herum eine spiegelglatte Oberfläche und war nur geringfügig von Eisschollen bedeckt. Eine dünne Stratocumuluschicht bedeckte mit 7/8 den Himmel.

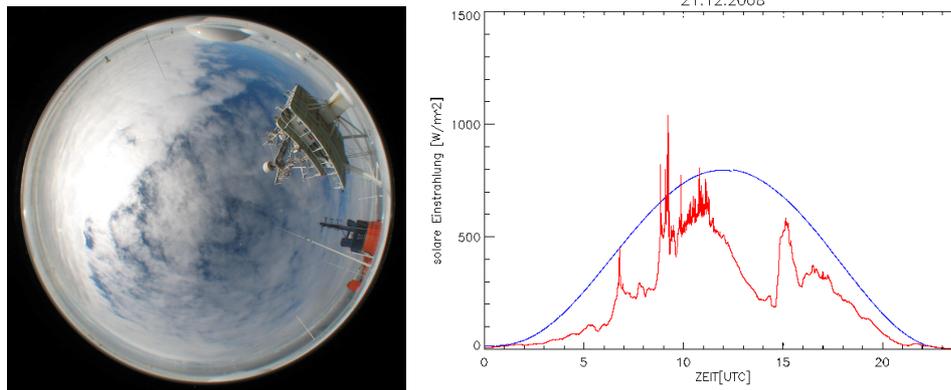


Abbildung 7.12: Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (09:13 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 21.12.2008.

22.12.08 Mit einer Erhöhung der solaren Strahlung um 64,24%, was 167 W/m^2 entspricht, ereignete sich um 18:49 UTC bei einer hohen dünnen Stratocumulusbewölkung von 5/8 die stärkste Erhöhung des Tages. Diese dauerte 22 Sekunden, berücksichtigt man die stärkste Erhöhung und die Werte die 10 % darunter liegen. Die Eisbedeckung betrug ca 80 %. Aufgrund des tiefen Sonnenstandes war hier eine Reflexion der Strahlung auf dem wellenfreien Wasser und den Eisschollen gut möglich. Etwas später kurz vor 20 UTC ereignete sich noch ein Strahlungsanstieg auf etwa 300 W/m^2 . Der Himmel war zu 6/8 von einer Stratocumulusbewölkung bedeckt.

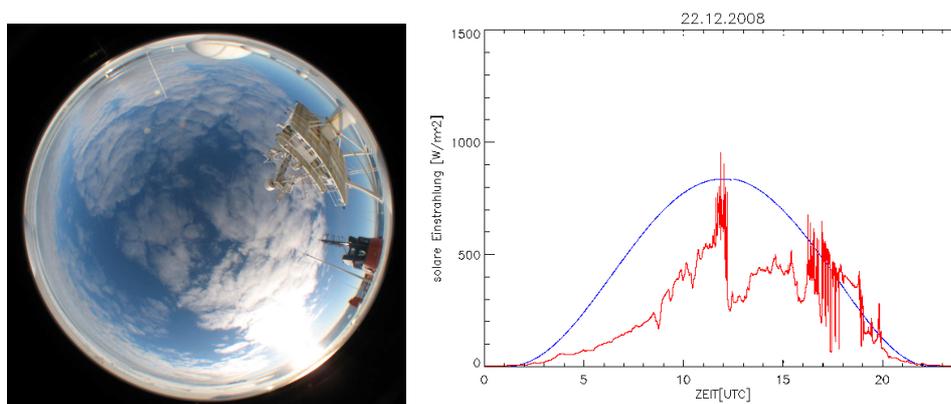


Abbildung 7.13: Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (18:49 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 22.12.2008.

23.12.08 Um 11:21 UTC, zum Zeitpunkt der größten Strahlungserhöhung, dominierte eine Stratocumulusbewölkung den Himmel. Diese war optisch dicker als die meisten

der vorherigen Stratocumulusschichten, wies jedoch öfters Lücken auf. Mit einer absoluten Erhöhung der Strahlung von 596 W/m^2 um 72%, war auch diese Erhöhung bei einem Zenitwinkel von 42° sehr stark. Der gesamte Zeitraum der Erhöhung betrug ca. 3 Minuten. Dieser Wert liegt etwas über dem Durchschnitt für die Dauer der Strahlungserhöhungen, die während dieser Fahrt gemessen wurden.

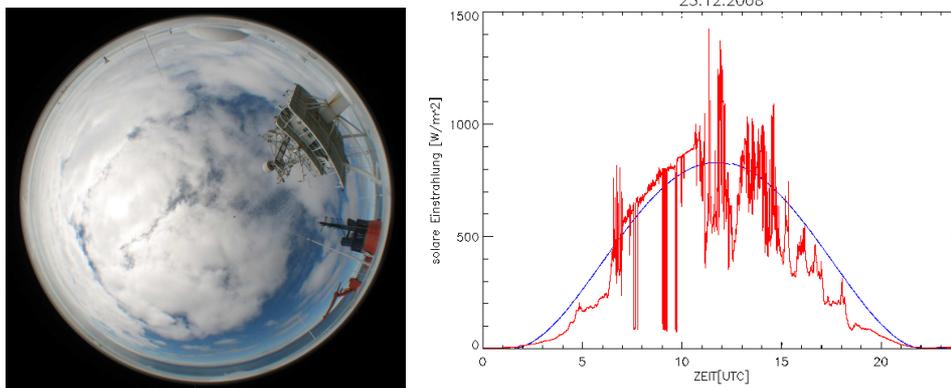


Abbildung 7.14: Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (11:21 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 23.12.2008.

24.12.08 Kurz nach 8 UTC ereignete sich die größte Strahlungserhöhung mit 48,41% um 308 W/m^2 . Zu diesem Zeitpunkt war der Himmel zu 6/8 mit Wolken bedeckt. Im unteren Bereich lag eine tiefere Stratocumulusschicht mit darüberliegendem Cirrostratus. Solange die Sonne nicht vollständig bedeckt war, gab es immer wieder kurz andauernde Strahlungserhöhungen.

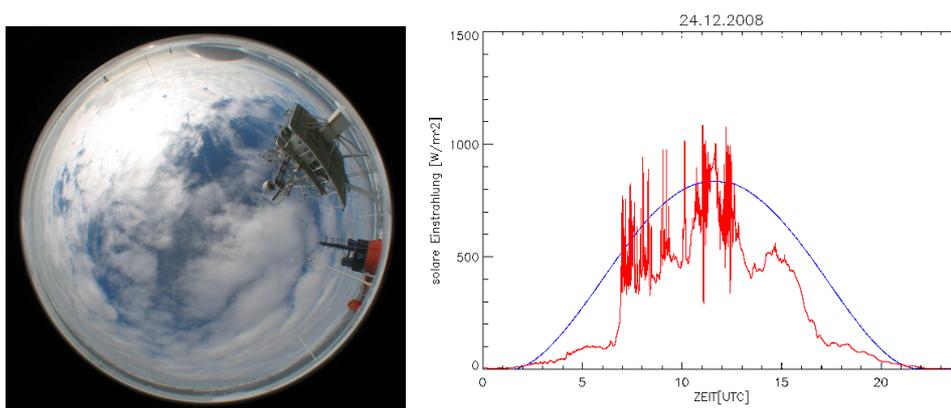


Abbildung 7.15: Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (08:02 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 24.12.2008.

25.12.08 Mit einer Dauer von etwa 70 Sekunden ereignete sich um 14:44 UTC die stärkste Strahlungserhöhung des Tages. Bei einer Bewölkung von 5/8 Cumuluswolken erreichte die Strahlung eine Erhöhung um 448 W/m^2 (67,16%). Ab ca. 16 UTC sank die gemessene Einstrahlung stark ab. Hier lag der Sensor im Schatten der Schiffsaufbauten. Kurz vor 19 UTC, bei direkter Sonne und wenigen bis gar keinen Wolken ist erneut zu erkennen, dass die Strahlungskurve der gemessenen Einstrahlung über der blauen parametrisierten Strahlungskurve verläuft.

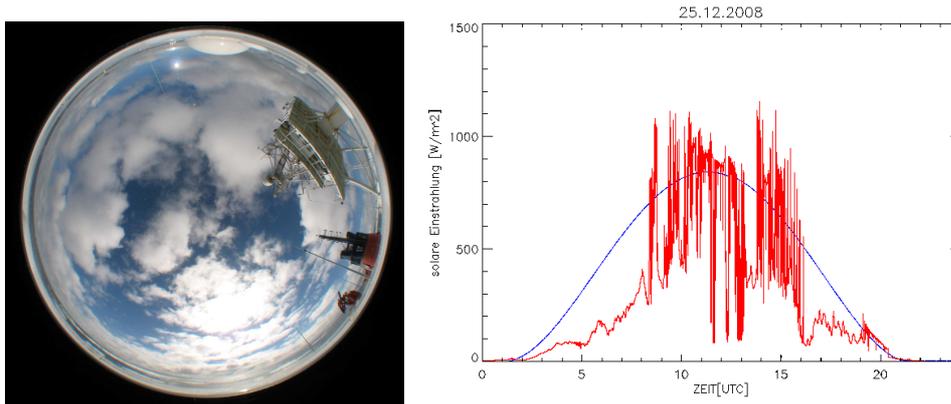


Abbildung 7.16: Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (14:44 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 25.12.2008.

26.12.08 Kurz vor 2 UTC ist ein unnormaler starker Anstieg in der solaren Strahlung erkennbar. mit bis zu 37 W/m^2 ergab das einen relativen Anstieg von über 900%. Dies lag allerdings vermutlich daran, dass sich Eiskristalle auf der Kuppel des Pyranometers gebildet hatten, an denen die Sonnenstrahlung reflektiert werden konnte.

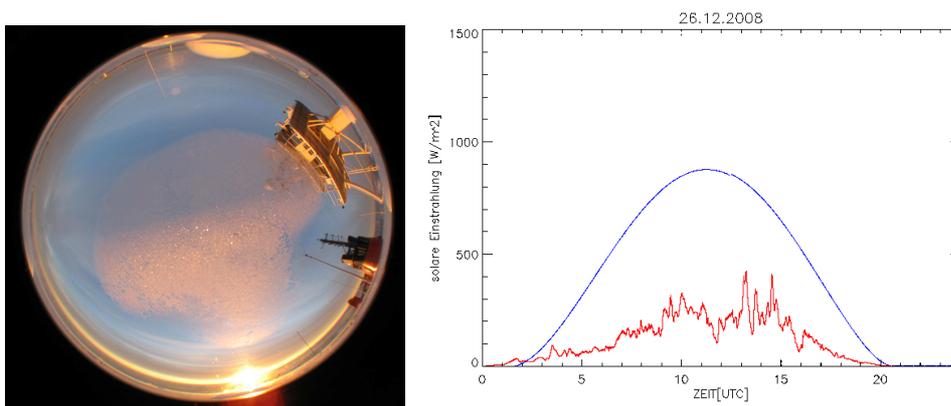


Abbildung 7.17: Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Erhöhung (01:42 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 26.12.2008.

27.12.08 Nur noch selten gab es ein paar kleinere Eisschollen. Das Strahlungsmaximum lag mit 839 W/m^2 um 10:17 UTC nur knapp unter der Kurve für den wolkenfreien Fall. Zu diesem Zeitpunkt war die optische Dicke unter 10, da man die Sonne im dichten Nebel erkennen konnte.

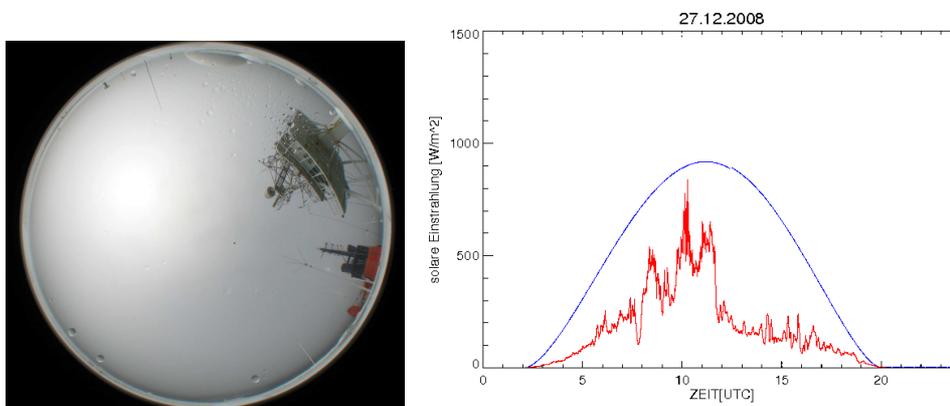


Abbildung 7.18: Kamerabild für den Zeitpunkt der stärksten Einstrahlung (10:11 UTC) und solare Einstrahlung mit Parametrisierung für den wolkenfreien Himmel am 27.12.2008.

7.2.1 Zusammenfassung

In Tabelle 7.1 sind die stärksten Strahlungserhöhungen der jeweiligen Tage in absoluten und relativen Werten, die Dauer, Uhrzeit und der vorherrschende Sonnenzenitwinkel dargestellt. Man erkennt, dass sich die meisten Strahlungserhöhungen bei Zenitwinkeln zwischen 40° und 60° ereigneten. Die Dauer der Strahlungserhöhung für den 22. Dezember lag bei über einer Stunde. Man sollte hierbei beachten, dass der Himmel zum größten Teil wolkenlos war. Wie man schon bei anderen wolkenlosen Tagen sah, lag die Messkurve hier immer über der Parametrisierung, so auch am 18. und 19. Dezember (siehe Abb. 7.9 und 7.10), sodass es keine wirkliche Strahlungserhöhung ist. Die tatsächliche Einstrahlung wird von der Parametrisierung bei Vorhandensein einer großen Bodenalbedo allgemein unterschätzt. Berücksichtigt man diesen Fehler, sollte bei allen Strahlungserhöhungen diese systematische Abweichung einbezogen werden. Je nach Sonnenstand kann diese bis zu ca. 150 W/m^2 betragen. Da dieser Fehler aber nicht genau bestimmt werden konnte, aufgrund der Ungewissheit ob diese systematische Abweichung auch bei anderen Bedeckungssituationen galt, wurde er in Tabelle 7.1 nicht berücksichtigt.

Die stärksten Erhöhungen der solaren Strahlung ereigneten sich bei hohen Bedeckungsgraden, jedoch befanden sich meist Wolkenlücken direkt in der Nähe der Sonne. Bei optisch dünnen Wolken, welche die Sonne zum großen Teil verdeckten und auch kaum Lücken in der Nähe der Sonne aufwiesen, fielen die Strahlungserhöhungen meist nicht so stark aus. Bei Stratocumulus (tiefere optisch dickere Wolken) waren diese meist höher als bei den hohen optisch dünneren Cirrostratuswolken. Außerdem befanden sich zum Zeitpunkt der Strahlungserhöhungen bei tieferen Wolken diese weitestgehend über

dem Sensor des Strahlungsmessers. Mehrfachreflexionen zwischen Wolkenunterkante und Oberfläche wurden somit begünstigt und verstärkten vermutlich die Strahlungserhöhungen.

Tag	Erhöhung [%]	Erhöhung [W/m^2]	Dauer bei 10% Erh.[<i>sec</i>]	Dauer bei 20% Erh.[<i>sec</i>]	Dauer über clearsky [<i>sec</i>]	Uhrzeit [UTC]	Zenitwinkel θ [°]
11.12.2008	47, 59	451	4	4	12	10 : 40	33, 4
12.12.2008	57, 64	521	4	4	34	10 : 51	37, 24
13.12.2008	50, 89	387	62	96	276	14 : 34	46, 75
14.12.2008	---	---	---	---	---	---	---
15.12.2008	74, 11	592	10	16	176	12 : 21	44, 35
16.12.2008	11, 3	97	66	---	130	11 : 12	47, 10
17.12.2008	54, 65	279	504	562	1414	07 : 51	60, 73
18.12.2008	17, 48	127	---	---	---	13 : 36	48, 13
19.12.2008	19, 5	130	---	---	---	14 : 57	51, 50
20.12.2008	77, 49	573	22	36	82	10 : 56	48, 13
21.12.2008	52, 05	356	28	32	95	09 : 13	51, 50
22.12.2008	64, 26	167	22	182	> 1std.	18 : 49	73, 9
23.12.2008	71, 86	596	10	16	172	11 : 21	42, 40
24.12.2008	48, 41	308	6	18	74	08 : 02	54, 43
25.12.2008	67, 16	448	40	48	70	14 : 44	52, 43
26.12.2008	930, 41	33	---	---	---	01 : 42	88, 80

Tabelle 7.1: Tabelle der Strahlungserhöhungen für den Fahrtabschnitt ANT-XXV/2. Für den 14. Dezember liegen aufgrund eines Defekts des Pyranometers keine Messungen vor.

7.3 Strahlungsparametrisierungen

Wie in Kapitel 6 werden die vorgestellten Parametrisierungen überprüft. Hierbei werden die Parametrisierungen der solaren und langwelligen nach unten gerichteten Strahlung mit der gemessenen Einstrahlung verglichen.

In den folgenden Grafiken (Abb. 7.19 bis 7.26), ist jeweils die gemessene solare Einstrahlung als schwarze Kurve und die Parametrisierungen in unterschiedlichen Farben gegen die Uhrzeit aufgetragen.

In den Grafiken vom 18. und 19. Dezember (Abb. 7.19 und 7.20), erkennt man, dass die gemessene solare Einstrahlung von allen vier Parametrisierungen der Strahlung für die vorwiegend wolkenfreien Tage (siehe Abb. 7.21 und 7.22 (unten)) deutlich unterschätzt wird. Die größte Differenz erkennt man bei der Parametrisierung von Bennett. Sie weist in der Mittagszeit eine Differenz von über $200 W/m^2$ zur gemessenen Einstrahlung auf.

Da bei der Parametrisierung von Shine/Bennett der wolkenfreie Fall mit der Parametrisierung von Shine einhergeht, verlaufen beide Kurven bei diesen Bedingungen gleich (daher wird die Kurve von Shine durch Shine/Bennett verdeckt). Diese weisen ebenfalls die größte Differenz zur gemessenen Kurve in der Mittagszeit auf, allerdings hier mit nur ca. 120 W/m^2 .

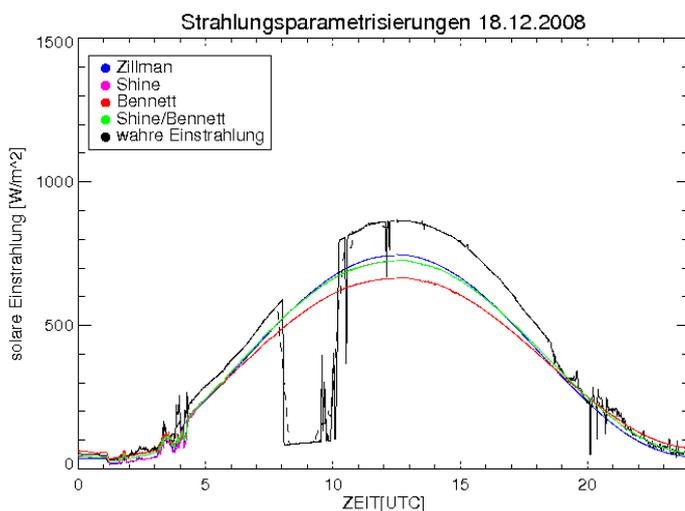


Abbildung 7.19: Solare Einstrahlung und Parametrisierungen der Einstrahlung am 18.12.2008.

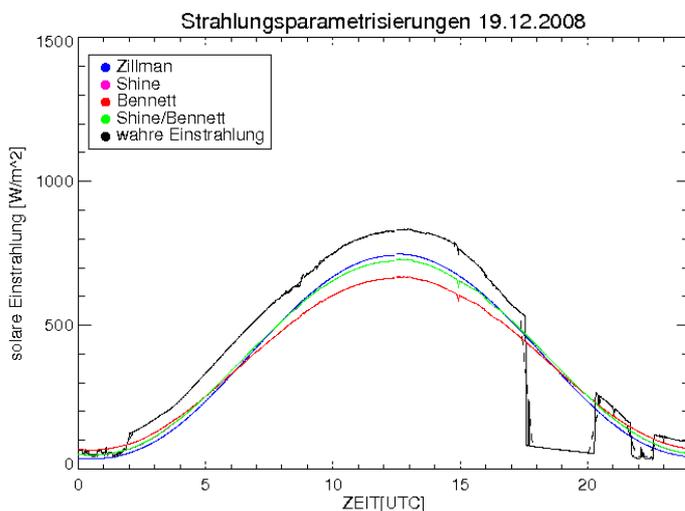


Abbildung 7.20: Solare Einstrahlung und Parametrisierungen der Einstrahlung für den 19.12.2008.

Die Kurven der Parametrisierungen in Abb. 7.20 zeigen einen ähnlichen Verlauf wie in Abb. 7.19 mit größten Abweichungen um die Mittagszeit, wobei hier wieder die Parametrisierung von Bennett die größte und Zillmann die kleinste Differenz aufweist. Bei

sehr tiefen Sonnenständen (vor 5 UTC und nach 20 UTC) verhalten sich die Parametrisierungen für den wolkenfreien Fall genau umgekehrt. Hier zeigt Zillmann die größte und Bennett die kleinste Differenz zum Messwert.

Desweiteren erkennt man in Abb. 7.20, dass zwischen 5 und 6 UTC die Parametrisierungen einen größeren Abstand zur Messkurve aufweisen als am 18. Dezember (Abb.7.19). Der Grund hierfür liegt vermutlich in der Schelfeiskante, die direkt neben dem Schiff auftrug. An dieser waren den ganzen Tag über Reflexionen möglich, die dann zu einem erhöhten kurzwelligen Strahlungsfluss auch bei tieferem Sonnenstand führen konnten.

Die Schwankungen in der kurzwelligen Einstrahlungskurve werden durch die Abschätzung des Sensors resultierend aus den Schiffsaufbauten erzeugt. Im Gegensatz dazu erkennt man im zeitlichen Verlauf der langwelligen Strahlung (Abb. 7.21) keine Einbrüche, die es aufgrund von Wolken gegeben hätte. Somit hat auch das Programm zur Berechnung des Bedeckungsgrades richtig funktioniert.

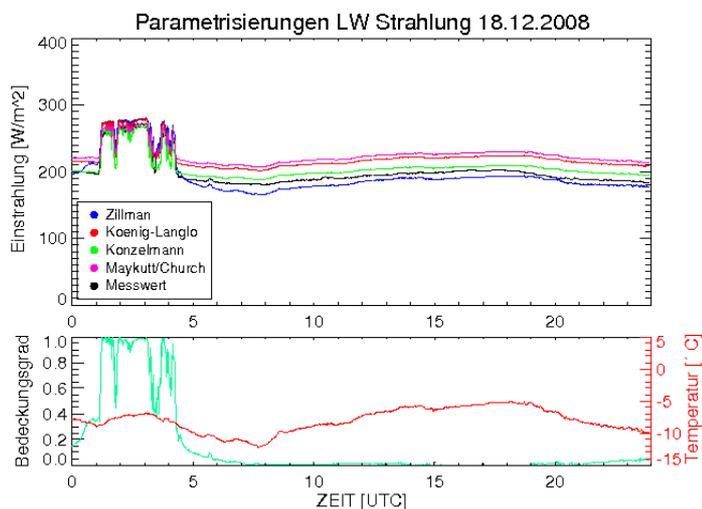


Abbildung 7.21: Langwellige Gegenstrahlung und Parametrisierungen der Gegenstrahlung für den 18.12.2008 (oben) Bedeckungsgrad und Temperatur (unten).

In der Grafik für den 19. Dezember (Abb. 7.22) erkennt man eine ziemlich konstante, nach unten gerichtete langwellige Strahlung. Hier liegt die Kurve von Zillman meist auf oder knapp unter der Messkurve. Die übrigen Parametrisierungen überschätzen jedoch die langwellige Einstrahlung.

Der Vormittag des 20. Dezembers begann mit einer geringen Bewölkung (Abb. 7.24). Zwischen 10 und 12 und zwischen 13 und 14 UTC konnte man einen Anstieg des Bedeckungsgrades feststellen. Ab 16 UTC stieg der Bedeckungsgrad bis 8/8 an. Denselben Verlauf, was wiederum die Richtigkeit des Programms zu Berechnung des Bedeckungsgrades bestätigt, kann man in der langwelligen nach unten gerichteten Strahlung erkennen.

In den Fällen mit geringem Bedeckungsgrad verlaufen die Parametrisierungen der kurz-

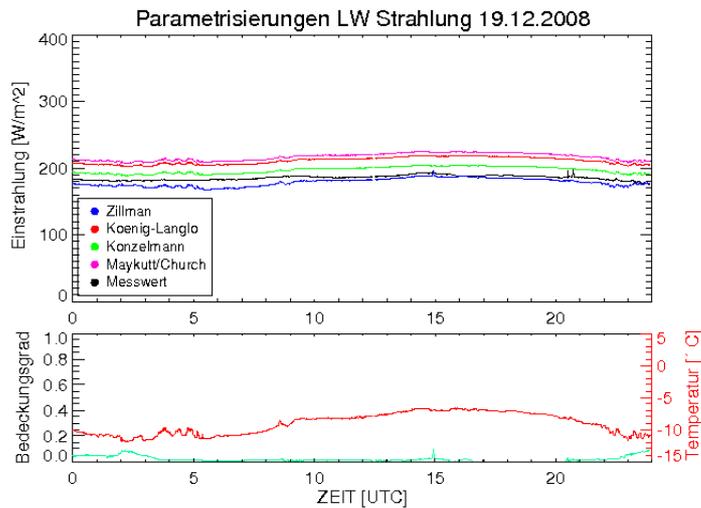


Abbildung 7.22: Langwellige Gegenstrahlung und Parametrisierungen der Gegenstrahlung für den 19.12.2008 (oben) Bedeckungsgrad und Temperatur (unten).

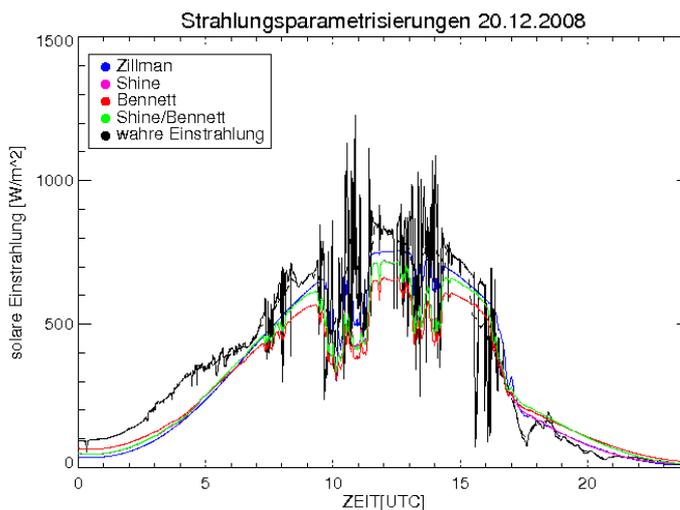


Abbildung 7.23: Solare Einstrahlung und Parametrisierungen der Einstrahlung am 20.12.2008.

welligen Strahlung annähernd wie im wolkenfreien Fall (siehe Abb. 7.23 0-5 UTC und 7.20). In der gemessenen Einstrahlung sind jedoch schon hier mehrere kleinere Fluktuationen zu erkennen. Während des starken Wechsels des Bedeckungsgrades (Abb. 7.24 (unten)) der innerhalb von 2 Stunden zwischen 4/8 und 8/8 Bedeckung variierte, ergaben sich starke Fluktuationen in der gemessenen solaren Einstrahlung. Die Parametrisierungen konnten in diesem Fall nur die unteren Werte der Schwankungen einigermaßen wiedergeben.

Für den 26. Dezember (Abb. 7.25) erkennt man, dass die beobachtete Einstrahlung zwi-

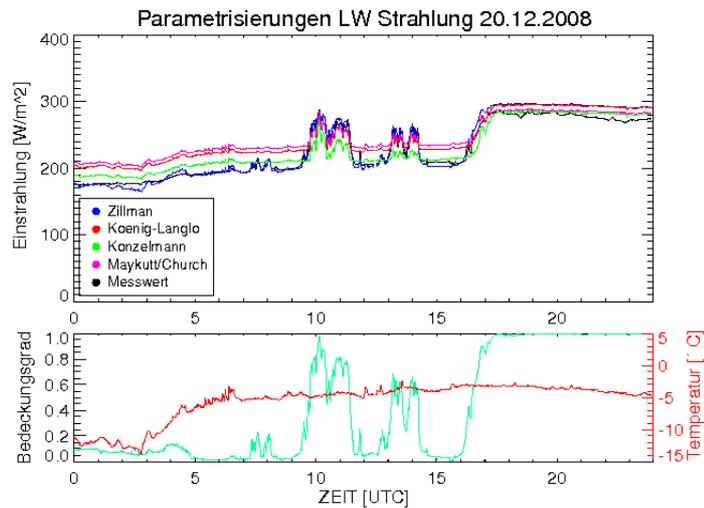


Abbildung 7.24: Langwellige Gegenstrahlung und Parametrisierungen der Gegenstrahlung für den 20.12.2008 (oben) Bedeckungsgrad und Temperatur (unten).

schen 1 und 2 UTC eine recht hohe Einstrahlung aufweist. Dies lag vermutlich an der unverdeckten Sonne (über dem Schiff befand sich eine dünne Wolkenschicht, siehe Abb. 7.17), die nur knapp über dem Horizont stand und so auch von unten die Wolken bescheinen konnte. Durch Reflexionen an den Wolkenunterkanten und auf dem Meereis konnte hier die Strahlung größere Werte als die Parametrisierung erreichen.

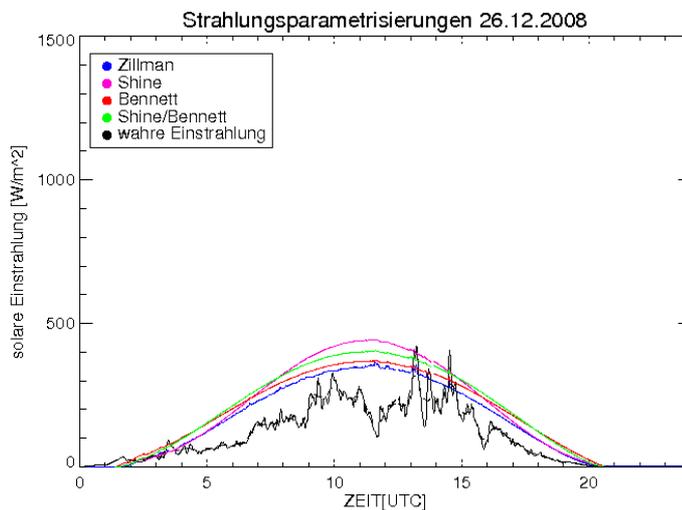


Abbildung 7.25: Solare Einstrahlung und Parametrisierungen der Einstrahlung am 26.12.2008.

Die gemessene kurzwellige Einstrahlung wies am 26. Dezember zum Teil große Schwankungen auf. Diese lassen sich erklären, wenn man sich die Bilder der Wolkenkamera

ansieht. Der Himmel war zu 8/8 bedeckt, doch zu den Zeiten der Strahlungsmaxima erkennt man (bei der Betrachtung von mehreren aufeinanderfolgenden Bildern), dass die optische Dicke aufgrund von Lücken in der unteren Wolkenschicht für einige Augenblicke unter 10 sank, sodass die Sonne teilweise hindurchscheinen konnte.

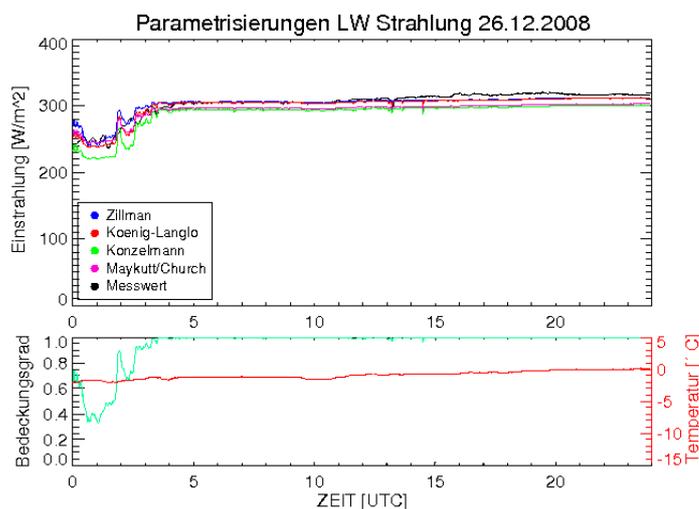


Abbildung 7.26: Langwellige Gegenstrahlung und Parametrisierungen der Gegenstrahlung für den 26.12.2008 (oben) Bedeckungsgrad und Temperatur (unten).

In der Zeit zwischen 0 und 3 UTC ist die Berechnung des Bedeckungsgrades (Abb. 7.26 unten) nicht korrekt, da sich in diesem Zeitraum auch Eiskristalle auf der Kuppel der Wolkenkamera befanden (siehe Kamerabild in Abb. 7.17). Diese leuchteten rötlich und führten damit zu einem falschen Ergebnis bei der Berechnung des Bedeckungsgrades (siehe Kapitel 4.3, Gleichung 4.4). Im Verlauf der Kurve für die langwellige gemessene Einstrahlung erkennt man jedoch, dass der Himmel tatsächlich nur teilweise bedeckt war (Abb. 7.26 oben). Der weitere Verlauf des Bedeckungsgrades zeigt einen mehr oder weniger konstant bedeckten Himmel, der sich auch im Verlauf der nach unten gerichteten langwelligeren Strahlung widerspiegelt.

Man erkennt einen Unterschied in den Parametrisierungen der langwelligeren Gegenstrahlung für den 20. und 26. Dezember bei wolkenbedeckten Abschnitten (Abb. 7.24, 17 bis 24 UTC und Abb. 7.26, 4 bis 24 UTC). Die gemessene nach unten gerichtete Strahlung wird am 20. Dezember von den Parametrisierungen überschätzt, wohingegen sie am 26. Dezember über den Parametrisierungen liegt. Die jeweiligen Parametrisierungen verhalten sich untereinander jedoch ähnlich. Die Parametrisierung nach Zillman liegt im bewölkten und teilweise bewölkten Fall über bzw. teilweise auf selber Höhe wie die von König-Langlo. Maykut und Church und Konzelmann liegen jeweils darunter. Der Unterschied in der langwelligeren Einstrahlung lässt sich durch die unterschiedlichen Temperaturen erklären. Am 20. Dezember lagen die Temperaturen zu Beginn unter -10°C , später bei vollbedecktem Himmel bei -4°C Grad und am 26. Dezember den ganzen Tag bei 0°C

(siehe Abb. 7.24 und 7.26 (unten)). Die optische Dicke der Wolken war nach eigenen Beobachtungen zufolge am 26. Dezember höher als am 20. Dezember. Zum Teil war auch Nebel vorhanden. Dieser Umstand ließ höhere Messwerte von ca. 30 W/m^2 der nach unten gerichteten langwelligen Strahlung bei voller Bedeckung zu.

7.3.1 Bewertung der Parametrisierungen

7.3.1.1 Kurzweilige Einstrahlung

Das Verhalten der Parametrisierungen untereinander bei einem wolkenfreien Himmel, wird auch anhand Abb. 7.27 (a) deutlich. Es sind die Parametrisierungen von Shine, Bennett und Zillman für den wolkenfreien Himmel über dem Zenitwinkel aufgetragen. Für tiefe Sonnenstände, also bei einem hohen Zenitwinkel, liegt die Kurve der Parametrisierung von Bennett über den Restlichen. Bei einem Zenitwinkel von ca. 70° schneidet sie die beiden anderen Kurven. Bei höherem Sonnenstand verläuft die Parametrisierung nach Zillman über den beiden anderen Kurven.

Der nichtlineare Faktor des Bedeckungsgrades bei Zillman wird in Abb. 7.27 (b) klar. Aufgetragen ist der Wolkenfaktor V_w über den Zenitwinkel der Parametrisierungen von Shine, Zillman und Bennett. Man erkennt, dass bei mittleren Bedeckungsgraden der Wolkenfaktor V_w höher ist und dieser damit in der Parametrisierung nach Zillman stärker gewichtet wird.

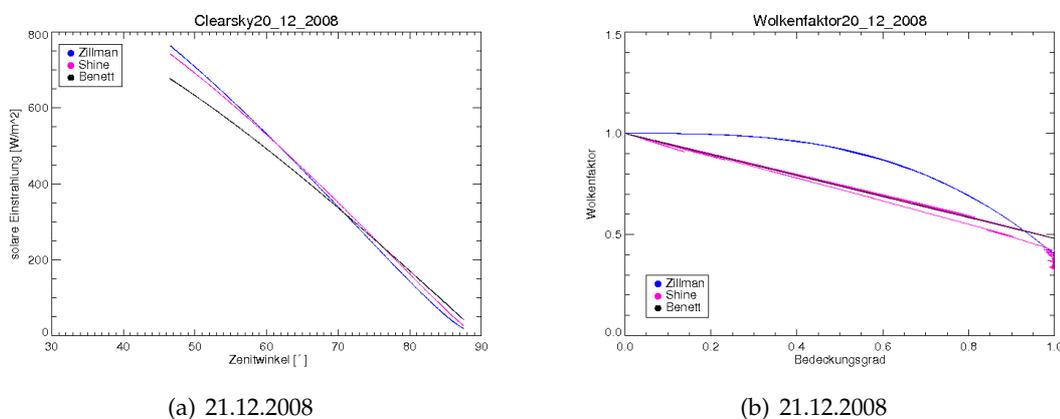


Abbildung 7.27: Vergleich der Parametrisierungen für den wolkenfreien Fall (a) und die Reduktion aufgrund von Wolken (b) anhand der Daten vom 21. Dezember

Bei variierendem Bedeckungsgrad lässt sich durch die Abbildungen 7.19 bis 7.26 nicht klären, wie sich die einzelnen Parametrisierungen verhalten. Daher wurden Streuplots angefertigt (siehe Abb. 7.28 bis 7.31). Aufgetragen ist die gemessene solare Einstrahlung gegen die dazugehörigen Ergebnisse der Parametrisierungen.

Deutlich zu erkennen sind die Unterschätzungen der Parametrisierungen im unbewölkten Fall aufgrund der Nichtberücksichtigung der Bodenalbedo (Abb. 7.28 und 7.29). Hier ist auch der Unterschied des Verlaufs der Parametrisierungen zwischen dem 18. und

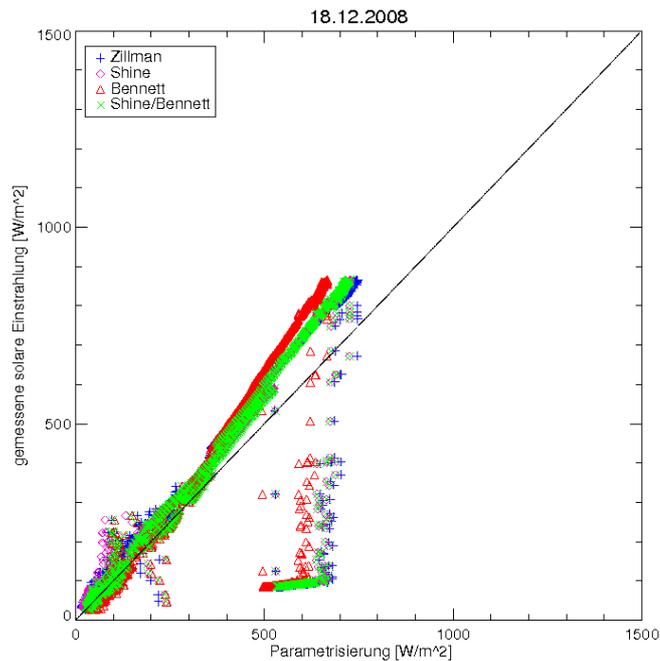


Abbildung 7.28: Solare Einstrahlung aufgetragen über die Parametrisierungen für den 18.12.2008

dem 19. Dezember zu erkennen. Während am 18. Dezember (Abb. 7.28) bis ca. 300 W/m^2 die Parametrisierungen auf oder nahe der Diagonalen verlaufen, unterschätzen diese in Abb. 7.29 schon bei deutlich kleineren Werten die Messung. Mit zunehmender Einstrahlung steigt die Differenz der Parametrisierung von Bennett zur Diagonalen am meisten. Die Wolkenbedingungen und die Temperaturen verhalten sich an beiden Tagen ähnlich. Der einzige Unterschied ist die am 19. Dezember aufragende Schelfeiskante neben dem Messgerät. Selbst bei tieferen Sonnenständen konnte die Sonne an der Eiskante reflektiert werden und zu einer höheren gemessenen Einstrahlung führen. Die Ausreißer, die sich unterhalb der Diagonalen befinden (Abb. 7.28 und 7.29), entstanden aufgrund der Abschattung des Sensors und sind daher zu vernachlässigen.

In Abbildung 7.30 ist die solare Einstrahlung über den Parametrisierungen für den 20. Dezember aufgetragen. Man erkennt, dass die Parametrisierungen besonders für Werte welche über 300 W/m^2 liegen, die tatsächliche Einstrahlung systematisch unterschätzt wird. Das liegt vor allem daran, dass bei Wolkenlücken der "broken cloud effect" auftreten kann, welcher nicht parametrisiert wird. Auch die zusätzliche erhöhte Bodenalbedo, die mitunter Mehrfachreflexionen ermöglicht, erschwert die richtige Simulation der gemessenen Werte. Deutlich ist die größte Abweichung bei höheren Werten in der Parametrisierung von Bennett zu erkennen.

Im Gegensatz dazu wird in Abb. 7.31 deutlich, dass alle solaren Einstrahlungsparametrisierungen systematisch die gemessene Einstrahlung überschätzen. Besonders die Parametrisierung nach Shine zeigt hier die größten Differenzen. Diese Tatsache verdeutlicht,

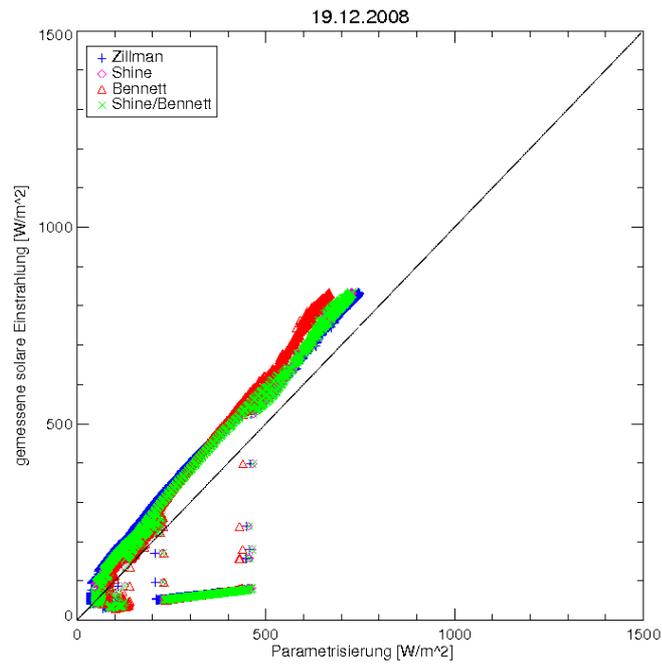


Abbildung 7.29: Solare Einstrahlung aufgetragen über die Parametrisierungen für den 19.12.2008.

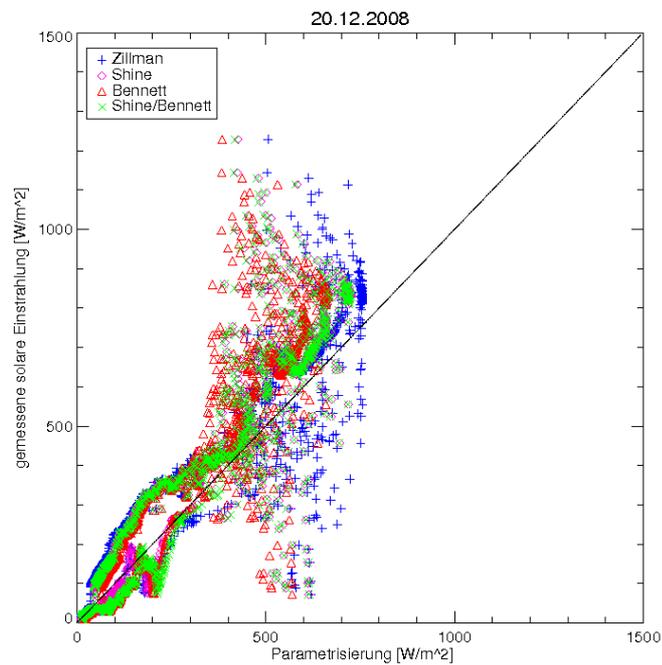


Abbildung 7.30: Solare Einstrahlung aufgetragen über die Parametrisierungen für den 20.12.2008.

dass bei meist vollbedecktem Himmel die gemessene Einstrahlung kleiner ist, als sie von den Parametrisierungen dargestellt wird.

Bei wechselhafter Bewölkung jedoch wie am 20. Dezember (Abb. 7.30) liegt die gemessene Einstrahlung zum größten Teil über den Parametrisierungen.

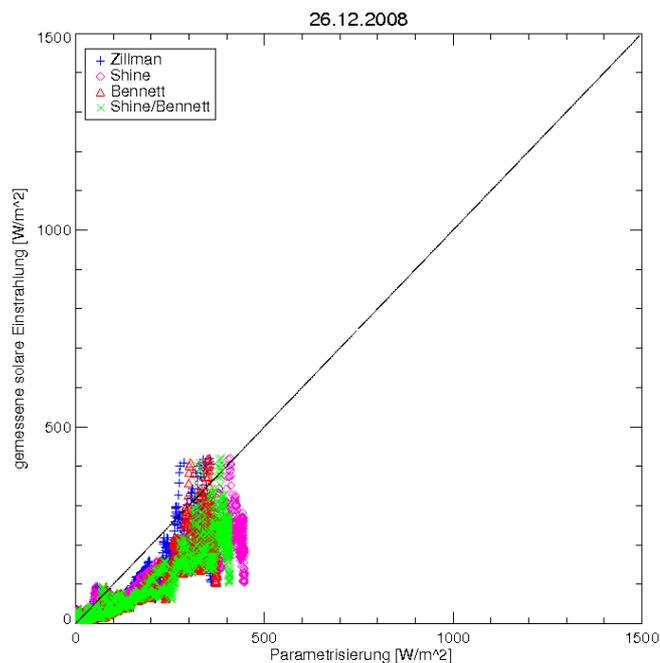


Abbildung 7.31: Solare Einstrahlung aufgetragen über die Parametrisierungen für den 26.12.2008.

In den Tabellen 7.2 bis 7.9 werden die Korrelationen und der RMSE der einzelnen Parametrisierungen der kurzwelligen und langwelligen Strahlung dargestellt. Der Hauptunterschied zwischen den 4 Tagen, die hier vorgestellt wurden, ist der variierende Bedeckungsgrad und das Vorhandensein der Schelfeiskante neben dem Messgerät am 19. Dezember im Gegensatz zum 18. Dezember, wo das Schiff von einer Meereisdecke umgeben war (siehe Abb. 7.2). Der Fehler, der durch die Abschattung der Schiffsaufbauten entstand, wurde in den Tabellen 7.2, 7.3, 7.6 und 7.7 berücksichtigt.

Am 18. und 19. Dezember (Tabelle 7.2 und 7.3) zeigt die Zillman-Parametrisierung die kleinsten Fehler des quadratischen Mittels. Mit kontinuierlichen Albedo-Messungen und Messungen der optischen Dicke der Wolken könnte jedoch die Parametrisierung von Shine optimiert werden.

Für den 20. Dezember (Tabelle 7.4) zeigt die Parametrisierung von Zillman den kleinsten Fehler des quadratischen Mittels. Selbst bei mehreren Versuchen des Anpassens der Albedo und der optischen Dicke der Bewölkung konnte die Parametrisierung nach Shine keinen kleineren RMSE aufweisen.

Für den 26. Dezember (Tabelle 7.5) erkennt man den kleinsten Fehler des quadratischen Mittels ebenfalls für die Parametrisierung nach Zillman, jedoch ließ sich der Fehler bei

Shine auf knapp 42 W/m^2 unter der Annahme einer Albedo von 0.0 und einer optischen Dicke der Wolken von 20 minimieren.

Selbst eine einfache Parametrisierung, wie die von Zillman, kann die gemessene Einstrahlung gut wiedergeben. Jedoch erkennt man, dass sich der Fehler und die Korrelation deutlich verbessern ließen, würden die optische Dicke und die Albedo korrekt als Variablen in die Parametrisierung von Shine eingehen. Wie man am Beispiel der beiden wolkenfreien Tage des 18. und 19. Dezembers (siehe Abb. 7.19 und 7.20) sehen kann, spielt die Albedo der Oberfläche beim kurzwelligem Strahlungstransport eine große Rolle. Die variierende optische Dicke der Wolken bzw. die variierende Sichtbarkeit der Sonne durch die Wolken trägt ebenfalls erheblich zu Strahlungsschwankungen und Erhöhungen bei.

Parametrisierung 18.12.08	Korrelation	RMSE [W/m^2]
Zillman	0,997	68,67
Shine	0,996	76,39
Bennett	0,996	106,8
Shine/Bennett	0,996	75,40
Shine $\alpha_u = 1, \tau = 10$	0,837	162,66

Tabelle 7.2: Korrelation und RMSE kurzwelligen Strahlungsparametrisierungen für den 18. Dezember

Parametrisierung 19.12.08	Korrelation	RMSE [W/m^2]
Zillman	0,998	74,69
Shine	0,998	80,29
Bennett	0,999	116,0
Shine/Bennett	0,998	80,17
Shine $\alpha_u = 1, \tau = 10$	0,927	118,44

Tabelle 7.3: Korrelation und RMSE kurzwelligen Strahlungsparametrisierungen für den 19. Dezember

Parametrisierung 20.12.08	Korrelation	RMSE [W/m^2]
Zillman	0,920	115,50
Shine	0,918	124,12
Bennett	0,911	145,27
Shine/Bennett	0,910	130,84
Shine $\alpha_u = 1, \tau = 10$	0,913	119,74

Tabelle 7.4: Korrelation und RMSE kurzwelligen Strahlungsparametrisierungen für den 20. Dezember

Parametrisierung 26.12.08	Korrelation	RMSE [W/m^2]
Zillman	0,890	90,06
Shine	0,893	166,40
Bennett	0,885	104,18
Shine/Bennett	0,887	123,85
Shine $\alpha_u = 0, \tau = 20$	0,893	41,69

Tabelle 7.5: Korrelation und RMSE kurzweiligen Strahlungsparametrisierungen für den 26. Dezember

Unter wolkenfreiem Himmel unterschätzen alle Parametrisierungen die Messkurve, bei total bedecktem Himmel liegen alle darüber. Für einen kleineren Zenitwinkel und der daraus resultierenden geringeren Einstrahlung, zeigt die Parametrisierung nach Bennett die besten Ergebnisse. Bei höherem Sonnenstand und größerer Einstrahlung weist die Parametrisierung von Zillman die kleinste Differenz auf. Diesen Sachverhalt erkennt man in den Streuplots (Abb. 7.28 bis 7.31).

7.3.2 Vergleich mit den Ergebnissen von J. Kalisch

Im Rahmen der Diplomarbeit von Kalisch (2005) wurden auch schon die Parametrisierungen der solaren Einstrahlung nach Bennett und Zillman angewandt ([Bennett(1982)] und [Zillman(1972)]). Die Bewertungen der Parametrisierungen werden hier kurz verglichen.

In den Berechnungen der Parametrisierung nach Bennett, welche für ein Meereismodell entwickelt wurde, fällt in der Diplomarbeit von Kalisch eine allgemeine Unterschätzung der gemessenen Einstrahlung durch die Parametrisierung auf [Kalisch(2005)]. Es tritt ein systematischer Fehler bei wolkenfreiem Himmel auf. Bennett unterschätzt die solare Einstrahlung bei höheren Sonnenständen um ca. $100 W/m^2$. War der Himmel von einer größtenteils geschlossenen, dünnen Wolkendecke bedeckt, ergaben sich die größten Differenzen zur Messkurve. An einem Tag mit geringer Bedeckung und Schönwettercumuli zeigen Parametrisierung und Messung die größte Übereinstimmung. Auch in den hier vorgestellten Berechnungen zeigt die Parametrisierung nach Bennett allgemein die größten Unterschätzungen der solaren Strahlung. Im unbewölkten Fall ist hier der größte systematische Fehler von $100 - 150 W/m^2$ ersichtlich (Abb. 7.19). Für praktische Anwendungen ist diese Parametrisierung demnach eher ungeeignet.

Die Parametrisierung von Zillman zeigt in der Arbeit von Kalisch besonders im wolkenfreien Fall eine hohe Übereinstimmung mit den Beobachtungen. Bei durchbrochener Cumulusbewölkung treten die größten Differenzen zwischen Parametrisierung und Beobachtung auf. Allgemein jedoch weist die Parametrisierung nach Zillman kleinere Fehler auf als die nach Bennett. Auch in den hier betrachteten Beispieltagen erkennt man für den wolkenfreien Fall (Abb. 7.19 und 7.20) die kleinsten Abweichungen zur Messkurve bei Zillman. Bei durchbrochener Bewölkung (Abb. 7.30) erkennt man ebenfalls große Differenzen in der Parametrisierung von Zillman, jedoch auch in allen anderen Parame-

trisierung. Ferner verdeutlichen die Fehler und Korrelationen der Parametrisierung von Zillman, dass diese Parametrisierung für die Anwendung geeigneter ist als die von Bennett.

7.3.2.1 Langwellige Einstrahlung

In den Tabellen 7.6 bis 7.9 für die Parametrisierungen der langwelligen Strahlung erkennt man, dass sowohl im wolkenfreien Fall als auch für den teilweise bedeckten Himmel die Parametrisierung nach Zillman den kleinsten Fehler aufweist. Unter voller Bedeckung, wie am 26. Dezember, ist der Fehler der Parametrisierung von Zillman ebenfalls klein, jedoch ist der von König-Langlo am kleinsten (Tabelle 7.9).

Parametrisierung 18.12.08	Korrelation	RMSE [W/m^2]
Zillman	0,979	9,88
Konzelmann	0,952	9,75
König-Langlo	0,964	21,62
Maykut & Church	0,959	26,74

Tabelle 7.6: Korrelation und RMSE der langwelligen Strahlungsparametrisierungen für den 18. Dezember

Parametrisierung 19.12.08	Korrelation	RMSE [W/m^2]
Zillman	0,850	7,48
Konzelmann	0,908	11,82
König-Langlo	0,908	25,79
Maykut & Church	0,908	31,43

Tabelle 7.7: Korrelation und RMSE der langwelligen Strahlungsparametrisierungen für den 19. Dezember

Parametrisierung 20.12.08	Korrelation	RMSE [W/m^2]
Zillman	0,994	10,04
Konzelmann	0,95	12,86
König-Langlo	0,967	20,05
Maykut & Church	0,973	22,91

Tabelle 7.8: Korrelation und RMSE der langwelligen Strahlungsparametrisierungen für den 20. Dezember

Parametrisierung 26.12.08	Korrelation	RMSE [W/m^2]
Zillman	0,941	7,13
Konzelmann	0,958	16,63
König-Langlo	0,957	6,70
Maykut & Church	0,960	12,39

Tabelle 7.9: Korrelation und RMSE der langwelligen Strahlungsparametrisierungen für den 26. Dezember

Die Parametrisierung nach M & C zeigt für beinahe alle Tage den größten Fehler und eine gute Korrelation mit den beobachteten Werten der langwelligen Gegenstrahlung. Allgemein kann man sagen, dass die Parametrisierung von Zillman für unterschiedliche Bedeckungsgrade am besten geeignet ist, da sie den kleinsten Fehler und eine gute Korrelation zeigt. Gerade im wolkenfreien Fall ist der Fehler in der Parametrisierung von Zillman deutlich geringer als in den anderen.

Kapitel 8

Modellierung der Strahlungserhöhungen

Um die gemessenen Strahlungserhöhungen genauer untersuchen zu können, wurden sie mit einem Strahlungstransportmodell simuliert. Dazu wurde das Strahlungstransportmodell GRIMALDI von Scheirer verwendet. Die Grundlage bildet ein Programmcode, der den Durchgang von Photonen durch eine Modellatmosphäre berechnet. Die Lösung des Strahlungstransportes von GRIMALDI basiert auf der Monte-Carlo-Methode [Scheirer(2001)].

Auf ihrem Weg durch die Modellatmosphäre mit den gewünschten optischen Eigenschaften wird eine große Anzahl von Photonen verfolgt, nachdem diese mit der vorgegebenen Sonneneinfallrichtung initialisiert wurden. Wolken werden mit Hilfe eines Gitters in das Modell integriert. Jede Gitterbox des Modellgebiets wird als homogen in Bezug auf ihre optischen Eigenschaften behandelt. Die Wolken sind durch ihre Extinktionskoeffizienten, Einfachstreueralbeden und Phasenfunktionen beschrieben.

In den durchgeführten Berechnungen wurden im wesentlichen 3 Parameter variiert:

- Sonnenstand,
- Bodenalbedo,
- Wolkenart (Form, vertikale Ausdehnung und optische Dicke).

Anhand der Uhrzeit und der Positionsdaten des Forschungsschiffes ergaben sich die größten Strahlungserhöhungen im Modell bei Sonnenständen von 45° und 62° .

Da die Albedo des Untergrundes während der Fahrten nicht erfasst werden konnte, wurde sie in dem Programm mit einer Schrittweite von 0,1 zwischen 0 und 1 variiert um möglichst alle Untergrundarten abzudecken.

Für die Berechnungen wurde die Wellenlänge von $0,55 \mu m$ gewählt, da sie das Maximum der Intensität im solaren Spektrum (siehe Abb. 2.2) darstellt.

Es standen zwei unterschiedliche Wolkensimulationen zur Verfügung, die als Beispielwolken dienen sollten. Hierbei handelte es sich um eine homogene Cumuluswolke und eine homogene Altocumuluswolke, welche im Rahmen der Dissertation von Schade

erstellt wurden [Schade(2009)]. Es sind Darstellungen idealisierter Wolken. Diese sind wichtig um ein klares und eindeutiges Ergebnis in Bezug auf deren Rolle bei Strahlungserhöhungen zu erhalten.

Für die Modellatmosphäre wurde das Vertikalprofil eines Arktischen Sommers gewählt, welches im Programmcode zur Auswahl steht. Die Ergebnisse anhand der hier erläuterten Eingangsdaten sind in den Tabellen 8.1 und 8.2 dargestellt.

8.1 Monte Carlo Methode

Um den Strahlungstransport in einer dreidimensionalen inhomogenen Atmosphäre zu berechnen, wird häufig die Monte Carlo Methode verwendet. Ein Photon erfährt beim Durchdringen eines Mediums unterschiedliche Wechselwirkungen. Diese sind Streuung und Absorption, also Extinktion. Die von den Photonen zurückgelegte Wegstrecke wird durch die Wahrscheinlichkeit bestimmt, dass ein Photon eine bestimmte optische Dicke durchdringen kann. Das Strahlungsfeld wird über die direkte Simulation der Absorptions- und Streuprozesse einer genügend großen Anzahl von einfallenden Photonen, die ein bestimmtes Medium durchdringen, ermittelt. Jedem Photon wird eine verfügbare optische Dicke (verfügbare Extinktion) bei der Initialisierung gegeben, den es auf dem Weg durch die Atmosphäre abbaut um den Ort der Wechselwirkung zu bestimmen.

Je mehr Photonen verfolgt werden, umso genauer wird die Monte-Carlo-Methode. Die Richtungsänderungen, die ein Photon während der Streuprozesse erfährt, resultieren aus einem Zufallsprozess, der mit der aktuellen Streufunktion $P(\theta)$ gewichtet wird. $P(\theta)$ kann als Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion mit dem Streuwinkel θ für die Streuung eines Photons in eine bestimmte Richtung betrachtet werden. $R(0, 1)$ ist eine Zufallszahl aus dem Intervall $(0, 1)$.

$$\int_0^\theta P(\theta') \sin(\theta') d\theta' = R(0, 1) \int_0^\pi P(\theta') \sin(\theta') d\theta' . \quad (8.1)$$

Aufgrund der zufälligen Orientierung der Streukörper (mit Radius r) im betrachteten Gebiet ist die Wahrscheinlichkeit ihrer azimutalen Ablenkung ϕ für alle Richtungen gleich und lautet:

$$\phi = 2\pi r . \quad (8.2)$$

Die Weglänge l , die das Photon bis zur ersten Wechselwirkung zurückgelegt hat ist nach dem Bouguer-Lambert-Beer Gesetz verteilt:

$$l = -\frac{1}{\epsilon} \ln R(0, 1) \quad (8.3)$$

mit dem Volumenextinktionskoeffizient ε .

Die Position \underline{r} , die das Photon nach der ersten Wechselwirkung annimmt, wird aus der Ausgangsposition \underline{r}_0 und der gewürfelten Richtung \underline{k} berechnet:

$$\underline{r} = \underline{r}_0 + l\underline{k} , \quad (8.4)$$

wobei \underline{k} ein Richtungsvektor ist, der sich aus dem vorherigen Richtungsvektor \underline{k}' , dem Streuwinkel θ und dem Azimutwinkel ϕ ergibt.

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Photon absorbiert wird, beträgt $1 - \omega_0$ mit der Einfachstreueralbedo ω_0 . Der Vorgang der Wechselwirkungen des Photonenbündels mit den Streukörpern wird jeweils mit neuer Weglänge solange wiederholt, bis es aus dem Modellgebiet ausgetreten ist oder vollständig absorbiert wurde. Die Photonen besitzen am Anfang ein Gewicht, das sich bei jeder Wechselwirkung um den Faktor ω_0 verringert. Das Gewicht, welches am Schluss übrigbleibt, wird zur Albedo oder Transmission gezählt. Anschließend werden diese aufsummiert und ergeben die Strahlungsflussdichten der bewölkten Atmosphäre für bestimmte Raumwinkelintervalle.

8.2 Modellierung von Strahlungserhöhungen

Um Strahlungserhöhungen auf dem 14×15 km großen Simulationsgebiet unter der Wolke zu erhalten, mussten zwei separate Durchläufe durchgeführt werden: eine für den wolkenfreien Himmel und eine für die jeweilige Wolke. Für die Berechnung der Strahlungserhöhung wurde der Strahlungsfluss des wolkenfreien Himmels von dem des bewölkten Himmels abgezogen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die zwei Wolkentypen vorgestellt.¹

8.2.1 Erhöhungen für eine homogene Cumuluswolke

In Abb. 8.1 ist die im Programm GRIMALDI verwendete, homogene Cumuluswolke grafisch dargestellt. Neben der Wolke ist das Gebiet unter der Wolke, für das die Strahlungserhöhungen berechnet wurden, zu erkennen. Die Unterkantenhöhe der Wolke liegt bei 1,2 km, die Ausdehnung der Wolke beträgt 6×7 km mit einer vertikalen Mächtigkeit von 1,2 km. Der Farbbalken gibt den Extinktionkoeffizienten für jeden einzelnen Punkt der dreidimensionalen Wolke (links) und aufsummiert über die Höhe (rechts) wieder. Die optische Dicke beträgt für diese Cumuluswolke $\tau = 60$.

In Tabelle 8.1 und 8.2 sind die prozentualen und absoluten Strahlungserhöhungen bei unterschiedlicher Bodenalbido und den zwei Sonnenständen für die jeweiligen Wolken dargestellt. Die Strahlungserhöhungen für die Cumuluswolke (siehe Tabelle 8.1) fangen für kleinere Albeden bei geringeren Werten an als bei der Altocumuluswolke (Tabelle

¹Das Verhalten der Strahlungserhöhungen bei unterschiedlichen Zenitwinkeln und inhomogenen Wolken wurde unter anderem in der Diplomarbeit von Jahnke behandelt [Jahnke(2008)]

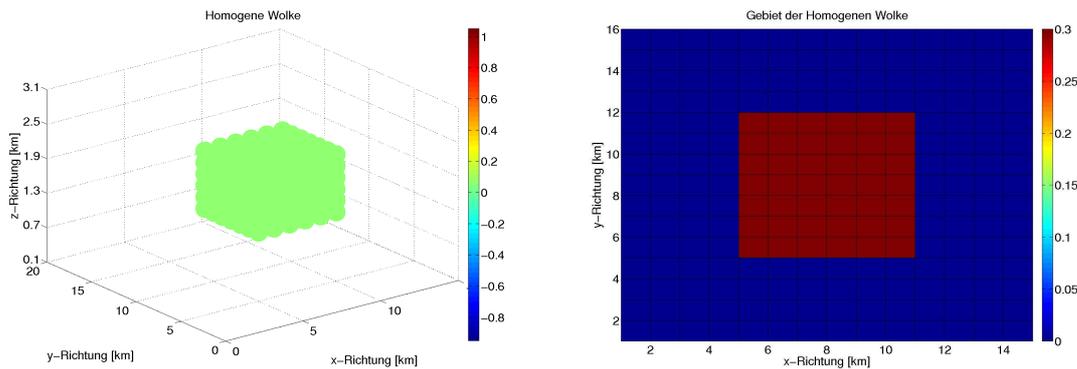


Abbildung 8.1: Modell und Modellgebiet der homogenen Wolke Quelle: Dissertation von Schade (2009)

8.2). Jedoch hat die Albedo für die Cumuluswolke einen größeren Einfluss auf die Strahlungserhöhungen, wie man anhand der Zunahme um 40 - 60 % je nach Sonnenstand erkennt. Somit scheint der Sonnenstand und die Bodenbedo bei der Cumuluswolke eine größere Rolle zu spielen als bei der Altocumuluswolke. Die Zunahme der Strahlungserhöhungen verläuft bei tiefen Sonnenständen stärker als bei geringeren. Man erhält die stärkste relative Erhöhung bei dem tieferen Sonnenstand von $\theta = 62, 8^\circ$.

An den hellen Wolkenkanten der Cumuluswolke kann die Strahlung besonders stark reflektiert werden. Bei Änderungen der Sonnenhöhe ist auch der Azimutwinkel verändert, sodass eine größere Unterfläche der Wolke beschienen werden kann und somit mehr Fläche für Reflexion liefert. Für 12 Uhr liegt der Azimutwinkel bei 0° . Die Strahlung der Sonne trifft hier direkt auf eine Seite der Wolke. Somit ist die effektive Fläche, an der Reflexionen stattfinden können kleiner.

8.2.2 Erhöhungen für eine homogene Altocumuluswolke

Die homogene Altocumuluswolke (Abb. 8.2) erstreckt sich über das gesamte Modellgebiet von 15×16 km mit einer Wolkenunterkantenhöhe von 3,4 km. Ihre vertikale Ausdehnung beträgt 600 m. In der Mitte befindet sich eine Wolkenlücke von 4×6 km. Die Farbbalken zeigen analog zu Abb. 8.1 den Extinktionskoeffizienten. Die optische Dicke der Wolke lässt sich aus dem Extinktionskoeffizienten berechnen und beträgt bei dieser Wolke $\tau = 8$.

Mit Hilfe von Berechnungen der Strahlungserhöhungen anhand des GRIMALDI Modells kann man erkennen, dass sich die Intensität mit einer höheren Albedo verstärkt (Tabelle 8.2). Die Stärke nimmt für beide Zenitwinkel gleichermaßen zu. Die relativen Erhöhungen für den tieferen Sonnenstand liegen insgesamt etwa 4 % über den Erhöhungen für 12 Uhr. Dieses Verhalten liegt daran, dass der Azimutwinkel für 17 Uhr ebenfalls verändert ist und bei etwa 157° liegt und somit auch eine größere effektive Fläche zu den Reflexionen beiträgt.

Änderungen in der Bodenbedo und dem Sonnenzenitwinkel tragen zu Änderungen

Albedo	maximale Strahlungserhöhungen			
	[%] 12 Uhr	[W/m ²] 12 Uhr	[%] 17 Uhr	[W/m ²] 17 Uhr
0.0	64.73	469.67	70.12	469.47
0.1	66.15	483.25	71.26	482.26
0.2	67.79	495.22	73.99	500.80
0.3	71.00	518.64	78.31	529.99
0.4	73.99	540.47	84.26	570.51
0.5	77.35	565.02	89.96	608.85
0.6	81.12	592.49	96.24	651.38
0.7	85.35	623.49	103.45	700.14
0.8	90.20	658.88	111.80	756.64
0.9	95.79	699.78	121.59	822.94
1.0	102.37	747.81	133.26	901.87

Tabelle 8.1: Prozentuale und Strahlungserhöhungen und absolute Einstrahlung für die Cumuluswolke

Albedo	maximale Strahlungserhöhungen			
	[%] 12 Uhr	[W/m ²] 12 Uhr	[%] 17 Uhr	[W/m ²] 17 Uhr
0.0	85.48	620.22	89.66	600.28
0.1	87.09	636.22	87.85	594.58
0.2	85.29	623.06	89.81	607.89
0.3	87.36	638.16	91.87	621.75
0.4	89.08	650.71	93.47	632.63
0.5	90.92	664.19	95.20	644.33
0.6	92.91	678.74	97.07	656.94
0.7	95.07	694.49	99.08	670.57
0.8	97.42	711.65	101.34	685.86
0.9	99.99	730.44	103.85	702.85
1.0	102.83	751.18	106.56	721.46

Tabelle 8.2: Prozentuale Strahlungserhöhungen und absolute Einstrahlung für die Altocumuluswolke

in den Strahlungserhöhungen bei, jedoch zeigen diese einen kleineren Einfluss im Falle der Altocumuluswolke, als bei der Cumuluswolke. Die Strahlungserhöhungen, die sich für die Altocumuluswolke ergeben haben, fallen kleiner aus. Dies liegt vermutlich an der kleineren optischen Dicke und der daraus folgenden kleineren Albedo und somit geringerer Reflexion. Ferner lässt die Altocumuluswolke im Programm auch nur wenig direkte Strahlung zu, da sie beinahe das gesamte Gebiet bedeckt. Trifft Strahlung von oben auf die Wolke, kann nur ein kleiner Teil zum Boden gelangen. Da um 12 Uhr ein tiefer Sonnenstand herrscht und nur wenig Strahlung durch die Wolkenlücken gelangen,

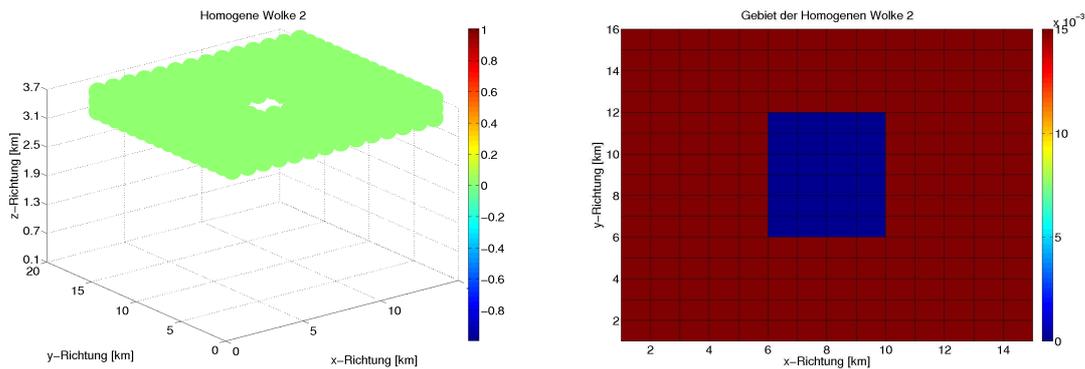


Abbildung 8.2: Modell und Modellgebiet der homogenen Altocumulus Wolke Quelle: Dissertation von Schade (2009)

sind auch die Möglichkeiten für Mehrfachreflexionen zwischen Wolkenunterkante und Oberfläche geringer.

Vergleicht man die gemessenen Strahlungserhöhungen (Tabelle 6.1 und 7.1) mit den hier modellierten Werten, stellt man fest, dass diese durchaus im Bereich der theoretisch möglichen Werte liegen. Mit GRIMALDI wurde jedoch nur eine diskrete Wellenlänge modelliert, wohingegen die Strahlungserhöhungen der Messungen sich aus dem gesamten Spektrum der kurzwelligen Sonnenstrahlung ergeben. Somit können die Strahlungserhöhungen im Modell vermutlich größer werden, da GRIMALDI nur das Maximum des solaren Spektrums zur Verfügung stand (ein größeres Spektrum wäre zu rechenintensiv gewesen). Auch treten bei realen Messungen keine idealen Wolken auf, wie sie hier im Programm benutzt wurden.

Auf den Expeditionen in polare Regionen trat vorherrschend Altocumulusbewölkung auf, sodass die meisten Strahlungserhöhungen bei einer optisch dünnen tiefliegenden Altocumulusbewölkung gemessen wurden. Es gab auch Strahlungsspitzen bei einzelnen Cumuluswolken, jedoch werden diese aufgrund der geringen relativen Feuchte der Luft über Eis vertikal nicht sehr mächtig und hatten somit auch eine geringere optische Dicke. Desweiteren erkennt man auch vor allem bei tiefen Sonnenständen von $\theta = 50 - 70^\circ$ die größten Strahlungserhöhungen (siehe Tabelle 6.1 und 7.1). Das Forschungsschiff erreichte wegen der polwärtigen Eisgrenze höhere Breitengrade in der Arktis als in der Antarktis und konnte daher im Nordpolarmeer tiefere Sonnenstände detektieren. Gerade bei tiefen Sonnenständen und einer vermeintlich geschlossenen Wolkendecke treten häufig Strahlungserhöhungen auf, die zum Teil mehrere Minuten andauern können.

8.2.3 Betrachtung der gemessenen Strahlungserhöhungen

In Abb. 8.3 sind die Strahlungserhöhungen über dem Bedeckungsgrad aufgetragen, die während des ANT XXV/2 Fahrtabschnittes gemessen wurden. Es wurden nur die Strahlungserhöhungen dargestellt, die in eisbedeckten Gewässern gemessen wurden. Deutlich erkennt man, dass mit steigendem Bedeckungsgrad die mögliche Stärke der Strahlungs-

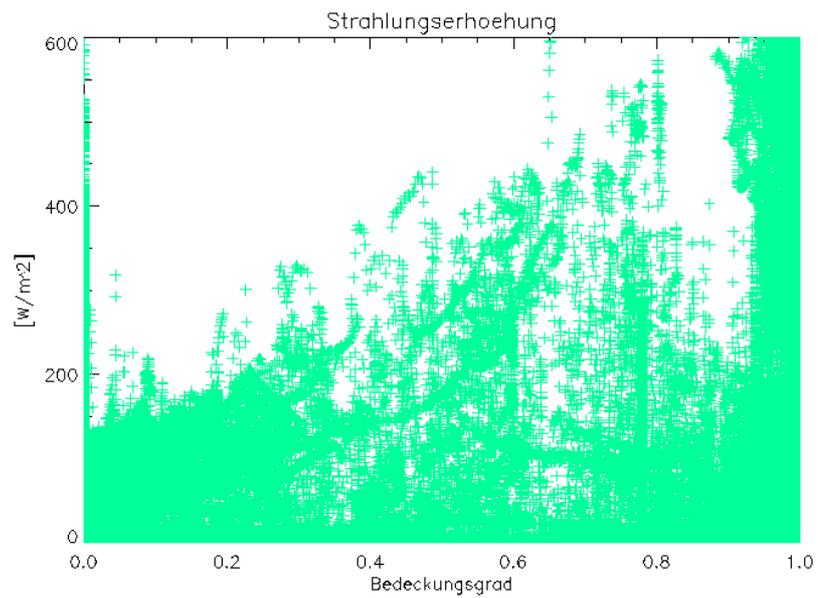


Abbildung 8.3: Strahlungserhöhung, aufgetragen über dem Bedeckungsgrad in eisbedeckten Regionen.

erhöhungen ansteigt. Desweiteren sieht man eine Häufung der Erhöhungen in Bereichen von hohen Bedeckungsgraden größer als 0,8 und im Bereich von 0 bis 0,3. Jedoch traten die meisten und stärksten Erhöhungen der kurzwelligen Einstrahlung bei sehr hohen Bedeckungsgraden auf.

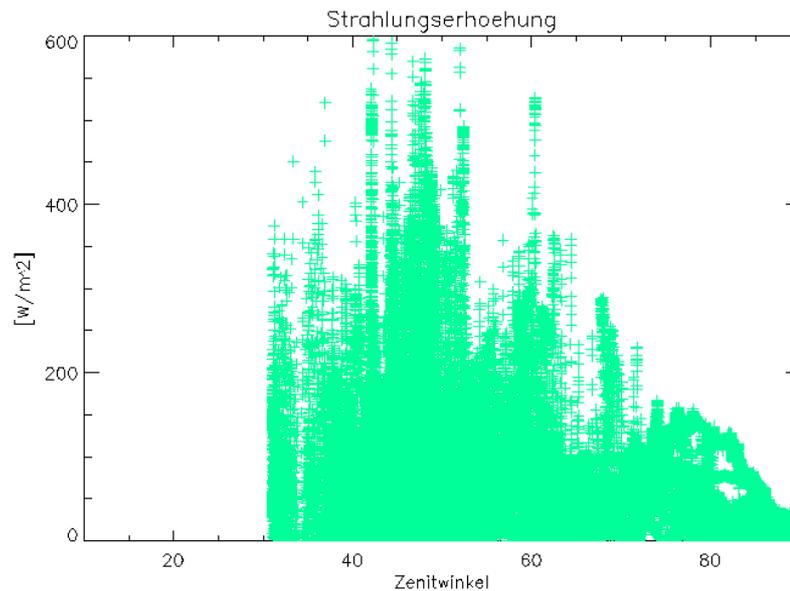


Abbildung 8.4: Strahlungserhöhungen, aufgetragen über Zenitwinkel in eisbedeckten Gebieten.

In Abb. 8.4 sind alle Strahlungserhöhungen der ANTXXV/2 Fahrt über den Sonnenzenitwinkel aufgetragen. Man erkennt ein Maximum der Erhöhungen bei einem Zenitwinkel von ca. 55° . Auch bei ca. 60° erkennt man ein weiteres Maximum. Diese Sonnenstände wurden auch bei GRIMALDI verwendet. Stand die Sonne schon zu tief, konnte nicht mehr genügend kurzwellige Strahlung zur Verfügung gestellt werden, sodass auch die Stärke der absoluten Erhöhungen nicht mehr sehr groß werden konnte. Dennoch trat bei flachen Einfallswinkeln der Strahlung noch häufig eine Erhöhung auf, die relativ gesehen mitunter sehr groß waren, wie man auch in den Tabellen der Strahlungserhöhungen 6.1 und 7.1 gesehen hat. Die im Modell berechneten Strahlungserhöhungen wurden bei jenen Sonnenständen gemacht, wo auch die stärksten gemessenen Erhöhungen stattfanden. Demnach spiegeln sie auch die extremsten Bedingungen wider. Während der Arktis Expedition standen insgesamt zu wenig Daten zur Verfügung, weshalb auf eine grafische Darstellung der Strahlungserhöhung verzichtet wurde.

In diesem Kapitel wurde ein kurzer Einblick in die Strahlungstransportmodellierung gewährt. Anhand von Modellierungen sollen Strahlungstransporte und speziell in diesem Fall, Prozesse bei Strahlungserhöhungen verständlich gemacht werden. Die Wolkenart, der Stand der Sonne und besonders die Albedo des Untergrundes spielen eine große Rolle bei Strahlungstransporten. Die korrekte Modellierung dieser ist für das Verständnis der Energiebilanz der Erde unverzichtbar.

Kapitel 9

Schlussbetrachtung & Ausblick

In dieser Arbeit wurden unterschiedliche Parametrisierungen der kurzwelligen und langwelligen nach unten gerichteten Strahlung untersucht. Die Eingangsgrößen stammten dabei aus dem Datensatz zweier Forschungsfahrten, die in die Arktis und Antarktis unternommen wurden. Zusätzlich wurden Untersuchungen anhand von Daten, die im Verlauf der letzten 14 Jahre an Bord des Forschungsschiffes Polarstern gesammelt wurden, gemacht. Es wurden größtenteils Daten verwendet die eindeutig aufgezeichnet wurden, während sich das Forschungsschiff direkt in Meereisregionen befand, beziehungsweise von Eis umgeben war.

Die verwendeten Parametrisierungen der kurzwelligen Einstrahlung entstammen Arbeiten von Zillman (1972), Shine (1984) und Bennett (1982). Die Strahlungsparametrisierungen zeigen teilweise sehr unterschiedliche Verhaltensweisen und liegen auch im unbewölkten Fall bis zu 200 W/m^2 auseinander. Die solare Einstrahlung am Boden zeigt große Schwankungen bei wechselnder optischen Dicke der Wolken und ständig variierenden Bedeckungsgraden. Die Parametrisierungen können diese Schwankungen nicht wiedergeben und zeigen in solchen Fällen einen großen Fehler und ebenfalls eine geringe Korrelation. Insgesamt zeigen die Parametrisierungen eine Unterschätzung der solaren Einstrahlung insbesondere bei größeren Zenitwinkeln und bei wolkenfreien und gering bewölktem Himmel. Hier zeigt die Parametrisierung nach Bennett die größte Differenz. Bei sehr flachen Zenitwinkeln und hohen Bedeckungsgraden überschätzen die Parametrisierungen die gemessene Einstrahlung.

Parametrisierungen der langwelligen nach unten gerichteten Strahlung stammen aus Arbeiten von Zillman (1972), König-Langlo (1994), Konzelmann (1994) und Maykut & Church (1973). Diese zeigen eine Differenz untereinander von 20 bis 30 W/m^2 . Bei geringer bis keiner Bedeckung überschätzen die Parametrisierungen, abgesehen von der Parametrisierung nach Zillman, die langwellige nach unten gerichtete Strahlung. Im bewölkten Fall liegen sie meistens nahe beieinander. Unter teilweise bedecktem Himmel scheint die Parametrisierung nach Zillman den Verlauf der Messwerte am besten wiederzugeben.

Es wurden auch Strahlungserhöhungen, die während den Forschungsfahrten beobachtet

wurden, untersucht. Gemessene Strahlungserhöhungen verliefen teilweise über mehrere Minuten, und lieferten mit abnehmender Sonnenhöhe länger andauernde Erhöhungen bis zu 590 W/m^2 . Nach dem Strahlungstransportmodell GRIMALDI können Strahlungserhöhungen bei einer großen Bodenalbedo und bei niedrigem Sonnenstand besonders bei optisch dicken Wolken absolute Werte von 400 bis 900 W/m^2 annehmen.

Bei der Bestimmung des Bedeckungsgrades ist ein systematischer Fehler bei sehr tiefen Sonnenständen zu bemerken. Besonders in den frühen Morgenstunden bzw. in den Polarnächten schätzt das Programm den Bedeckungsgrad oft falsch ein. Dies liegt vermutlich daran, dass der Schwellwert für die Differenzierung zwischen Wolke und Himmel nicht ganz passt. Bei sehr flachen Sonnenständen haben die vorherrschenden Wolken einen größeren roten Farbanteil als tagsüber. Das Programm zur Bestimmung des Bedeckungsgrades wurde von Heinle ursprünglich für Wolkenfotos erstellt, die in niederen Breiten aufgenommen wurden [Heinle(2009)]. Ein neuer Schwellwert wurde nicht ermittelt, da nur sehr wenige Tage in der Auswertung der Parametrisierungen davon betroffen waren und der Aufwand dafür für den Rahmen dieser Arbeit nicht im Verhältnis stand.

In zukünftigen Arbeiten könnten vorhandene Parametrisierungen für polare Regionen, die schon mit wenigen Parametern auskommen, weiter optimiert werden, indem vor allem auch die Bodenalbedo unter wolkenfreiem Himmel miteinbezogen werden sollte. Shine (1984) berücksichtigt zwar den Faktor der Bodenalbedo, allerdings nur bei gleichzeitigem Vorhandensein von Wolken. Dass aber auch die Atmosphäre selbst zu einer höheren Einstrahlung in hohen Breitengraden und einer großen Bodenalbedo führen kann, wurde nicht berücksichtigt.

Durch die automatische Ermittlung der Wolkenarten mit Hilfe eines Computer gesteuerten Programmes, wie dem von Heinle (2009), könnte zusätzlich auf den Einfluss unterschiedlicher Eigenschaften der Wolken auf die solare Strahlung eingegangen werden.

Durch die Bestimmungen der Bodenalbedo und Messungen der optischen Dicke von Wolken, könnte vor allem für die Parametrisierung von Shine der Fehler stark reduziert werden.

Die Sichtbarkeit der Sonne ("state of sun disc") scheint ebenfalls eine große Rolle bei der solaren kurzwelligen Strahlung zu spielen. Möglicherweise könnte durch die Beobachtung dieser Variablen der kompliziertere Weg über die Messung der optischen Dicke umgangen und somit die Parametrisierung optimiert werden.

Weitere Forschungsfahrten in polare Regionen sind geplant. Diese sollen weitere Aufschlüsse vor allem des Einflusses der Bodenalbedo auf die Einstrahlung am Boden liefern. Der Zusammenhang mit der vorherrschenden Himmelsituation, die dank der Wolkenkamera automatisch ermittelt werden kann, ist hier von besonderer Bedeutung.

Literaturverzeichnis

- [DWD(1987)] 1987. *Leitfaden des DWD, Nr. 1: Allgemeine Meteorologie*. Deutscher Wetterdienst, Offenbach.
- [Bennett(1982)] Bennett, T. J. J., 1982. A coupled atmosphere-sea ice model study of the role of sea ice in climate predictability. *Journal of the Atmosphere*, 39, 1456–1465.
- [Chiacchio(2002)] Chiacchio, M., e. a., 2002. Evaluation of methods to estimate the surface downwelling longwave flux during arctic winter. *American Meteorology Society*, 41, 306–318.
- [Curry(1996)] Curry, J. A. e. a., 1996. Overview of arctic cloud and radiation characteristics. *American Meteorology Society*, 9, 1731–1764.
- [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.
- [Fitzpatrick(2003)] Fitzpatrick, M. F. e. a., 2003. Transmission of solar radiation by clouds over snow and ice surfaces: A parameterization in terms of optical depth, solar zenith angle, and surface albedo. *Journal of Climate*, 17, 266–275.
- [Franceschini(1968)] Franceschini, G. A., 1968. The influence of clouds on solar radiation at sea. *Deutsche Hydrografische Zeitschrift*, 4, 162–168.
- [Frerichs(1999)] Frerichs, W., 1999. Einfluss unterschiedlicher Strahlungsparametrisierungen in Meereissimulationen der Arktis. Leibniz Institut für Meereswissenschaften an der Universität Kiel.
- [Harder(1996)] Harder, M., 1996. <http://www.markus-harder.de/meereis-klima.html>.
- [Heinle(2009)] Heinle, A., 2009. Mustererkennung, Wolkenklassifikation mit Hilfe einer Vollhimmelskamera, Diplomarbeit. Leibniz Institut für Meereswissenschaften an der Universität Kiel.
- [Heise(2004)] Heise, C., 2004. Der Einfluss durchbrochener Bewölkung auf die solare Einstrahlung: Eine Studie für Kiel, Diplomarbeit. Leibniz Institut für Meereswissenschaften an der Universität Kiel.
- [Jahnke(2008)] Jahnke, I., 2008. „Broken Cloud Effect“ aus Beobachtung und Modell, Diplomarbeit. Leibniz Institut für Meereswissenschaften an der Universität Kiel.

- [Jankiewicz et al.(1998)] Jankiewicz, P., Hupfer, P., und E., R., 1998. Wolken im Bereich der Übergangszonen Eis/Wasser in der Arktis. GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, GKSS/E/3.
- [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*, 17.
- [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.
- [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.
- [Lesins et al.(2009)] Lesins, G., Bourdages, L., Duck, T., Drummond, J., und Eloranta, E. W. V., 2009. Large surface radiative forcing from topographic blowing snow residuals measured in the high Arctic at Eureka. *Atmospheric, Chemistry and Physics*, 9, 1847–1862.
- [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. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 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 clouds on hourly amounts of total solar radiation at the sea surface. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 90, 43–56.
- [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.

- [Makshtas(1998)] Makshtas, A. P., 1998. http://www.tpub.com/content/ArmyCRREL/CR98_09/CR98_090021.htm.
- [Pirazzini(1988)] Pirazzini, R., 1988. Parameterization of the downward longwave radiation from clear and cloudy skies at ny ålesund. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 114, 165–182.
- [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.
- [Schade(2009)] Schade, N., 2009. Atmosphärenbedingte Erhöhungen der solaren Strahlung, Dissertation. Leibniz Institut für Meereswissenschaften an der Universität Kiel.
- [Schade et al.(2007)] Schade, N., Macke, A., Sandmann, H., und Stick, C., 2007. Enhanced solar global irradiance during cloudy sky conditions. *Meteorologische Zeitschrift*, Seiten 295–303.
- [Scheirer(2001)] Scheirer, R., 2001. Solarer Strahlungstransport in der inhomogenen Atmosphäre, Dissertation. 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.
- [Schweiger(2007)] Schweiger, A., 2007. Relationship between arctic sea ice and clouds during autumn. *American Meteorology Society*, doi: 10.1175/2008JCLI2156.1, 4799–4810.
- [Shine(1984)] Shine, K., 1984. Parameterization of the shortwave flux over high albedo surfaces as a function of cloud thickness and surface albedo. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 110, 747–764.
- [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.

Danksagung

Ein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Andreas Macke, für die Vergabe des Themas, die gute Betreuung, die Möglichkeit der Teilnahme an einer Forschungsfahrt in die Antarktis und die anschließende Korrektur dieser Arbeit. Ebenfalls möchte ich mich bei Prof. Kirstin Krüger für die zeitaufwändige Zweitkorrektur bedanken.

Ein großer Dank geht an die gesamte Arbeitsgruppe Wolken & Strahlung für das nette Arbeitsklima und die vielen hilfreichen Antworten bezüglich Programmier- und Parametrisierungsfragen.

Für die ersten hilfreichen Verbesserungsvorschläge wirrer Zeilen danke ich meiner Lieblingsmathematikerin, meinem Lieblingsossi, sowie der kleinen als auch dem großen Mitbegründer des Wurschtigkeitskriteriums.

Meinen Kellerkindern in der alten Botanik danke ich für den Spaßfaktor während der Motivations-, Skat-, Teepausen und für einprägsame Ohrwürmer, die mich "hinter Gittern" besonders motivierten. Mille grazie!

Zu guter Letzt danke ich natürlich meiner Familie, die mir das Studium so weit im Norden überhaupt erst ermöglichte.

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, April 2009

(Viktoria Mohr)