

# Parametrisierungen der solaren Einstrahlung über dem Ozean im Rahmen des „Meridional Ocean Radiation Experiment“ MORE

Diplomarbeit  
von  
John Kalisch

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



Kiel, Dezember 2005



# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>I</b>
<b>abstract</b>	<b>III</b>
<b>Abkürzungen</b>	<b>V</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Solare Strahlung</b>	<b>3</b>
2.1 Grundlagen . . . . .	3
2.2 Sonnenzenitwinkel . . . . .	4
2.3 Räumliche Variabilität der Strahlung . . . . .	6
<b>3 Parametrisierungen solarer Strahlung</b>	<b>11</b>
3.1 Lineare Parametrisierungen . . . . .	12
3.1.1 Lumb . . . . .	12
3.1.2 Lind . . . . .	13
3.1.3 Dobson und Smith . . . . .	13
3.1.4 Bennett . . . . .	14
3.2 Nichtlineare Parametrisierungen . . . . .	14
3.2.1 Dobson und Smith . . . . .	14
3.2.2 Zillman . . . . .	15
3.2.3 Shine . . . . .	16
3.3 Die Forschungsarbeit von Alexei Sinitsyn . . . . .	17
<b>4 Datenerfassung</b>	<b>23</b>
4.1 Die Forschungsfahrt . . . . .	23
4.2 Messungen . . . . .	23
4.3 Messgeräte . . . . .	25
4.3.1 Pyranometer und Pyrgeometer . . . . .	25
4.3.2 Ceilometer . . . . .	26
4.3.3 Strahlungsthermometer KT 4 und KT 19 . . . . .	27
4.3.4 Disdrometer und Anemometer . . . . .	28
4.3.5 Turbulenzmessung: Lufttemperatur und Luftfeuchte . . . . .	29



# Abbildungsverzeichnis

2.1	Zeitliche Verschiebung der Mittagshöhe (Sonnenhöchststand) für Westerland/Sylt durch die Zeitgleichung. Die Grafik basiert auf persönlichen Mitteilungen von Prof. C. Stick, Institut für Medizinische Klimatologie der CAU Kiel. . . . .	6
2.2	Zonale Mittel der Energieflüsse für Januar (links) und Juli (rechts) nach Josey et al. (1999). Die gestrichelte Kurve zeigt die jeweilige kurzweilige Nettostrahlung. . . . .	7
2.3	Kurzweilige Nettostrahlung an der Meeresoberfläche des Nordpazifik für Juli 1983 - 1990, (a) auf Satellitendaten basierend (Darnell et al., 1992), (b) auf Schiffsbeobachtungen basierend (daSilva et al., 1994), (c) ECMWF - Reanalysedaten (White und daSilva, 1999). . . . .	8
3.1	Regression bei 8/8 Bedeckung. Parametrisierung nach Malevsky et al. (1992) gegen Stundenmittel der gemessenen solaren Einstrahlung. . . . .	19
3.2	Wolkenkategorien nach Sinitsyn. . . . .	19
3.3	Beispiel für die Anpassung der Transmissionskoeffizienten nach Sinitsyn an die Messdaten für (a) Wolkenkategorie 5 und (b) Wolkenkategorie 8. . . . .	20
4.1	(a) Russisches Forschungsschiff <i>Akademik Sergey Vavilov</i> und (b) dessen Fahrtroute von Bremerhaven nach Kapstadt. . . . .	24
4.2	Netto-Radiometer <i>CNR 1</i> von <i>Kipp &amp; Zonen</i> , Foto nach Kipp & Zonen (2002). . . . .	25
4.3	Ceilometer <i>CT25K</i> von <i>Vaisala</i> , Foto nach Vaisala (2005). . . . .	26
4.4	Strahlungspyrometer <i>KT19</i> von <i>Heitronics</i> , Foto nach Heitronics (2005). . . . .	28
4.5	Disdrometer an Bord der <i>Vavilov</i> . . . . .	28
4.6	Aufnahme eines Wolkenfotos am Rande der Antarktis während der zweiten MORE-Forschungsfahrt im November 2005. . . . .	29
4.7	(a) Wetterkarte der UK Met Office (Wetterzentrale, 2005) für den Nordatlantik, (b) Bodentemperaturfeld und Bodenluftdruck nach Analysedaten des ECMWF für den Südatlantik. . . . .	30
4.8	Wolkenunterkantenhöhe (schwarz) und Regenrate (blau) für die gesamte Fahrt von Bremerhaven nach Kapstadt. . . . .	31
4.9	Albedo der glatten Meeresoberfläche für direkte kurzweilige Strahlung. . . . .	35
4.10	Bilanz (schwarz) der kurzweiligen und langweiligen Strahlung. . . . .	36

5.1	Wolkenfoto bei sehr klarer Wetterlage und Cumulusbewölkung vom 16.10.04, 10.30 UTC. . . . .	38
5.2	(a) zeigt das Originalfoto, (b) das nachbearbeitete schwarz-weiße Bild zur exakten Bestimmung der Pixelanzahl von Rand und rundem Himmelsbild. . . . .	39
5.3	(a) zeigt ein Originalfoto, (b) zeigt die Wolkenverteilung nach der Bedeckungsgradberechnung. . . . .	40
5.4	Fehlinterpretation durch Reflexe im Objektiv (Achteck und Rand) sowie durch direkte Sonne. (a) Originalfoto mit $N = 2/8$ , (b) Bedeckungsgradbestimmung ergibt $N = 0.76$ . . . . .	41
5.5	Unterschiedlicher Blaustich bei bedecktem Himmel. Original (a) und Analyse (b) mit $N = 0.99$ , Original (c) und Analyse (d) mit $N = 0.18$ . . . . .	42
5.6	Schwarz nachgezeichnete Schiffsaufbauten zur Abschätzung des maximalen Fehlers. . . . .	43
6.1	Parametrisierungen solarer Einstrahlung nach Lumb (1964) für (a) den 20.10.04 und (b) den 29.10.04. . . . .	46
6.2	Parametrisierungen solarer Einstrahlung nach Lind et al. (1984) für (a) den 20.10.04 und (b) den 29.10.04. . . . .	48
6.3	Okta-Modell. Parametrisierungen solarer Einstrahlung nach Dobson und Smith (1988) für (a) den 20.10.04 und (b) den 29.10.04. . . . .	50
6.4	Nichtlineare Parametrisierungen solarer Einstrahlung nach Dobson und Smith (1988) für (a) den 20.10.04 und (b) den 29.10.04. . . . .	52
6.5	Parametrisierungen solarer Einstrahlung nach Zillman (1972) für den 16.10.04 bis 26.10.04. 18. und 19.10.04 fehlen aufgrund fehlerhafter Daten. . . . .	54
6.6	Parametrisierungen solarer Einstrahlung nach Zillman (1972) für den 27.10.04 bis 04.11.04. . . . .	55
6.7	Parametrisierungen solarer Einstrahlung für einen komplett wolkenfreien Tag nach (a) Zillman (1972) und (b) nach der Modifikation. . . . .	58
6.8	Parametrisierungen solarer Einstrahlung für einen Tag mit stark durchbrochener Bewölkung nach (a) Zillman (1972) und (b) nach der Modifikation. . . . .	59
6.9	Parametrisierungen solarer Einstrahlung eines stratiform bewölkten Tages nach (a) Zillman (1972) und (b) nach der Modifikation. . . . .	60
6.10	Gemessene Einstrahlung (schwarz) und Differenzen (orange) von originaler und modifizierter Strahlungsparametrisierung nach Zillman (1972) für (a) wolkenfreien Himmel, (b) durchbrochene und (c) stratiforme Bewölkung. . . . .	61
6.11	Durchbrochene Bewölkung: Differenzen (orange) von originaler und modifizierter Strahlungsparametrisierung nach Zillman (1972) und (a) Bedeckungsgrad sowie (b) Wasserdampfdruck. . . . .	62
6.12	Berechnung der solaren Einstrahlung von Sylt mit der Parametrisierung nach Sinitsyn für (a) wolkenfreien Himmel, (b) durchbrochene und (c) stratiforme Bewölkung. . . . .	63

6.13	Differenzen von Parametrisierung und Messwerten für die Parametrisierung nach Sinitsyn (dunkelblau) und die modifizierte Parametrisierung nach Zillman (1972) (hellgrün) für (a) wolkenfreien Himmel, (b) durchbrochene und (c) stratiforme Bewölkung. . . . .	63
B.1	(a) bis (f) Wetterkarten der UK Met Office (Wetterzentrale, 2005) für Europa und den Nordatlantik vom 14.10.04 bis 19.10.04. Der rote Punkt zeigt die Schiffsposition. . . . .	84
B.2	(a) bis (d) Wetterkarten der UK Met Office (Wetterzentrale, 2005) für Europa und den Nordatlantik vom 20.10.04 bis 23.10.04. Der rote Punkt zeigt in (a) die Schiffsposition, in (b) bis (d) befindet sich das Forschungsschiff südlich des Kartenausschnittes. . . . .	85
B.3	(a) bis (f) Oberflächentemperaturfeld und Bodenluftdruck aus Analysedaten des ECMWF für den Südatlantik vom 21.10.04 bis 26.10.04. Der schwarze Punkt in (c) bis (f) zeigt die Schiffsposition. . . . .	86
B.4	(a) bis (f) Oberflächentemperaturfeld und Bodenluftdruck aus Analysedaten des ECMWF für den Südatlantik vom 27.10.04 bis 01.11.04. Der schwarze Punkt zeigt die Schiffsposition. . . . .	87
B.5	(a) bis (d) Oberflächentemperaturfeld und Bodenluftdruck aus Analysedaten des ECMWF für den Südatlantik vom 02.11.04 bis 05.11.04. Der schwarze Punkt zeigt die Schiffsposition. . . . .	88
C.1	Parametrisierungen solarer Einstrahlung nach Bennett (1982) für den 16.10.04 bis 26.10.04. 18. und 19.10.04 fehlen aufgrund fehlerhafter Daten. Schwarz zeigt die auf 5 Minuten gemittelte gemessene solare Einstrahlung, rot ist die parametrisierte Einstrahlung, grün die Differenz von Parametrisierungen und jeweiligem 5 - Minuten - Mittel der gemessenen Einstrahlung und blau die Differenz von Parametrisierungen und jeweiligem 30 - Minuten - Mittel der gemessenen Einstrahlung. . . . .	90
C.2	Parametrisierungen solarer Einstrahlung nach Bennett (1982) für den 27.10.04 bis 04.11.04. Schwarz zeigt die auf 5 Minuten gemittelte gemessene solare Einstrahlung, rot ist die parametrisierte Einstrahlung, grün die Differenz von Parametrisierungen und jeweiligem 5 - Minuten - Mittel der gemessenen Einstrahlung und blau die Differenz von Parametrisierungen und jeweiligem 30 - Minuten - Mittel der gemessenen Einstrahlung. . . . .	91
D.1	Parametrisierungen solarer Einstrahlung nach der Modifikation von Zillman (1972) für den 16.10.04 bis 26.10.04. 18. und 19.10.04 fehlen aufgrund fehlerhafter Daten. . . . .	95
D.2	Parametrisierungen solarer Einstrahlung nach der Modifikation von Zillman (1972) für den 27.10.04 bis 04.11.04. . . . .	96



# Tabellenverzeichnis

4.1	Wetterlage während der Forschungsfahrt. Wetterkarten der UK Met Office (Wetterzentrale, 2005) im Anhang in Abbildungen B.1 und B.2. . . . .	32
4.2	Wetterlage während der Forschungsfahrt, Karten aus Analysedaten des ECMWF im Anhang, Abbildungen B.3, B.4 und B.5. . . . .	33
6.1	Statistik der Parametrisierung nach Lumb (1964): Mittelwert $\overline{\Delta Q}$ der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 5 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung sowie Standardabweichung $\sigma$ der Differenzen. . . . .	47
6.2	Statistik der Parametrisierung nach Lind et al. (1984): Mittelwert $\overline{\Delta Q}$ der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 5 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung sowie Standardabweichung $\sigma$ der Differenzen. . . . .	49
6.3	Statistik der Parametrisierung nach Dobson und Smith (1988): Mittelwert $\overline{\Delta Q}$ der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 5 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung sowie Standardabweichung $\sigma$ der Differenzen. . . . .	50
6.4	Statistik der nichtlinearen Parametrisierung nach Dobson und Smith (1988): Mittelwert $\overline{\Delta Q}$ der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 5 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung sowie Standardabweichung $\sigma$ der Differenzen. Am 20.10.04 wurde der Wert für 18.30 Uhr nicht berücksichtigt. . . . .	53
6.5	Vergleich der Parametrisierungen nach Zillman (1972) und der Modifikation für die gesamte Forschungsfahrt: Mittelwert $\overline{\Delta Q}$ der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 5 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung sowie Standardabweichung $\sigma$ der Differenzen. . . . .	57
6.6	Vergleich der Parametrisierungen nach Zillman (1972) und der Modifikation für die wolkenfreie Atmosphäre: Mittelwert $\overline{\Delta Q}$ der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 3 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung sowie Standardabweichung $\sigma$ der Differenzen. . . . .	59

6.7	Vergleich der Parametrisierungen nach Zillman (1972) und der Modifikation für stark durchbrochene Bewölkung: Mittelwert $\overline{\Delta Q}$ der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 3 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung sowie Standardabweichung $\sigma$ der Differenzen. . . . .	60
6.8	Vergleich der Parametrisierungen nach Zillman (1972) und der Modifikation für stratiforme Bewölkung: Mittelwert $\overline{\Delta Q}$ der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 3 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung sowie Standardabweichung $\sigma$ der Differenzen. . . . .	61
6.9	Statistik der Parametrisierung nach Sinitsyn für Sylt bei wolkenfreiem Himmel, durchbrochener und stratiformer Bewölkung: Mittelwert $\overline{\Delta Q}$ der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 3 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung sowie Standardabweichung $\sigma$ der Differenzen. . . . .	64
C.1	Statistik der Parametrisierung nach Bennett (1982): Mittelwert $\overline{\Delta Q}$ der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 5 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung sowie Standardabweichung $\sigma$ der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 5 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung. In der letzten Zeile sind die Werte des gesamten Datensatzes. 18. und 19.10.04 fehlen aufgrund fehlerhafter Daten. . . . .	92
D.1	Statistik der originalen Parametrisierung nach Zillman (1972): Mittelwert $\overline{\Delta Q}$ der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 5 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung sowie Standardabweichung $\sigma$ der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 5 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung. In der letzten Zeile sind die Werte des gesamten Datensatzes. 18. und 19.10.04 fehlen aufgrund fehlerhafter Daten. . . . .	94
D.2	Statistik der modifizierten Parametrisierung nach Zillman (1972): Mittelwert $\overline{\Delta Q}$ der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 5 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung sowie Standardabweichung $\sigma$ der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 5 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung. In der letzten Zeile sind die Werte des gesamten Datensatzes. 18. und 19.10.04 fehlen aufgrund fehlerhafter Daten. . . . .	97

# Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden verschiedene Parametrisierungen der solaren Einstrahlung unter maritimen Bedingungen untersucht. Sie unterscheiden sich hauptsächlich in den benötigten Eingangsgrößen. Besonderes Augenmerk wird auf die Bilder der Wolkenkamera gerichtet, die eine von synoptischen Wolkenbeobachtungen unabhängige Berechnung der solaren Einstrahlung am Boden ermöglichen. Die Grundlage bildet der Datensatz der ersten Forschungsfahrt des Meridional Ocean Radiation Experiment MORE vom Jahr 2004.

Strahlungsparametrisierungen nach Lumb (1964), Lind et al. (1984) und Dobson und Smith (1988) definieren synoptische Wolkenkategorien, innerhalb derer die Transmissivität der bewölkten Atmosphäre approximiert wird. Die Einteilung der Bewölkung in Kategorien ist relativ grob und kann bei geringfügig unterschiedlichen Beobachtungen zu großen Differenzen der berechneten Einstrahlung führen.

Die Strahlungsparametrisierung nach Zillman (1972) zeigt gute Übereinstimmungen mit gemessenen solaren Strahlungsflüssen. Die atmosphärische Transmissivität wird aus dem Wasserdampfdruck am Boden und dem Wolkenbedeckungsgrad abgeleitet. Dabei ist die Berechnung des Bedeckungsgrades nach Long und DeLuisi (1998) aus Bildern der Wolkenkamera bei unbewölktem Himmel fehlerhaft.

Bei allen Parametrisierungen kann die Einstrahlung bei wolkenfreiem Himmel am genauesten berechnet werden. Durchbrochene Cumulusbewölkung führt zu starken Fluktuationen der Einstrahlung, die aber im Mittel gut wiedergegeben werden kann. Stratiforme Bewölkung führt zu großen Fehlern, da die optische Dicke der Wolkenschicht in den Strahlungsparametrisierungen unberücksichtigt bleibt.

Als Ergebnis der Analysen der Strahlungsberechnungen kann die Parametrisierung nach Zillman soweit modifiziert werden, dass der systematische Fehler für den Datensatz der Forschungsfahrt gegen Null geht bei gleichzeitiger Reduzierung der Standardabweichungen der Differenzen von berechneter und gemessener Einstrahlung. Eine Überprüfung der modifizierten Strahlungsparametrisierung mit einem Datensatz der Nordseeinsel Sylt bestätigt diese positiven Resultate.



# abstract

In this thesis different parametrizations of incoming solar radiation at sea were studied. The differences lie mainly in the required measured components. Special attention is focused on images of the cloud camera, that allows the calculation of insolation at the sea surface without using synoptical observations of the sky. The studies are based on the data set of the first research cruise of the Meridional Ocean Radiation Experiment MORE in 2004.

Parametrizations of insolation by Lumb (1964), Lind et al. (1984) and Dobson und Smith (1988) define synoptical cloud categories that estimate the transmittance of the cloudy atmosphere. The classification of the categories is relatively rough and small reporting differences can cause large calculated irradiance differences.

The parametrization by Zillman (1972) produces relatively exact results according to the direct measurements of solar fluxes. The atmospherical transmittance is deduced from the pressure of water vapour at the ground level and the total amount of clouds. The calculation of the amount of clouds according to Long und DeLuisi (1998) using clear sky images is inaccurate. Each parametrization calculates the insolation most accurately under clear sky conditions. Broken cumulus clouds cause large fluctuations of the measured insolation that can be reproduced by parametrizations in long-term mean only. Stratus clouds cause the biggest errors, because the optical thickness of the clouds is not taken into account in parametrizations.

As a result of the work the parametrization of the solar fluxes by Zillman is modified to minimize the systematic error and to reduce the standard deviation of the differences of calculated and measured insolation for the first MORE data set. The reduced errors of the modified parametrization are verified by a data set of the island Sylt in the North Sea.



# Abkürzungen

ARM	Atmospheric Radiation Measurement Program
DWD	Deutscher Wetterdienst
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ERBE	Earth Radiation Budget Experiment
GEWEX	Global Energy and Water Cycle Experiment
IDL	Interactive Data Language
IfM	Institut für Meereskunde Kiel
IfM-GEOMAR	Leibniz - Institut für Meereswissenschaften Kiel
ISCCP	International Satellite Cloud Climatology Project
LIDAR	Light Detecting and Ranging
MSG	Meteosat Second Generation
PhD	Philosophiae Doctor (lat.), Doktor der Wissenschaften
RADAR	Radio Detecting and Ranging
RTE	radiative transfer equation
SRB	shortwave radiation budget
SST	Sea Surface Temperature
TIFF	Tagged Image File Format
VOS	Voluntary Observing Ships of the World Weather Watch
UTC	Coordinated Universal Time
WCRP	World Climate Research Programme
WMO	World Meteorological Organisation



# Kapitel 1

## Einleitung

Die Idee des Meridional Ocean Radiation Experiment MORE ist das Resultat der engen Zusammenarbeit von Prof. Dr. Andreas Macke (IfM-GEOMAR) und Prof. Dr. Sergey Gulev (Shirshov Institute of Oceanology). Hierbei sollen auf meridionalen atlantischen Messfahrten mit russischen Forschungsschiffen vor allem strahlungsbeeinflussende Faktoren experimentell erfasst und später mit Daten der Fernerkundung verglichen und verknüpft werden, um neue Parametrisierungen solarer Strahlung zu erarbeiten, zeitliche wie räumliche Variabilitäten der SST besser verstehen zu lernen und Energiebilanzklimatologien zu verbessern.

Von allen Faktoren der Energiebilanzierung besitzt die solare Einstrahlung den größten Anteil. Gleichzeitig ist sie aber auch der unsicherste Term mit dem größten Fehlerpotential.

Die moderne Satellitenfernerkundung durch MSG ermöglicht eine flächendeckende Bestimmung der solaren Einstrahlung über dem Atlantik, jedoch besteht sie erst seit 2004. Liegen keine direkten Messungen oder indirekte Satellitendaten solarer Einstrahlung an der Meeresoberfläche vor, kann die Strahlung durch Strahlungsparametrisierungen approximiert werden. Hier sollen leicht zu messende strahlungsrelevante atmosphärische Zustandsgrößen eingehen. Den größten Einfluß auf die parametrisierte Einstrahlung hat neben der Solarkonstanten der Sonnenzenitwinkel.

Die Streuungs- und Absorptionseigenschaften von Wolken müssen ebenfalls berücksichtigt werden. Wolken reflektieren an ihrer Oberseite einen Teil der einfallenden Strahlung zurück in den Weltraum. Dieser Abschattungseffekt führt am Boden zu einer verminderten Globalstrahlung, wobei allerdings der Anteil diffuser Strahlung erhöht wird. Lokal können durchbrochene Cumuluswolken oder dünne Cirren aber auch strahlungserhöhend wirken, wenn direkte solare Strahlung die Atmosphäre fast ungehindert passieren kann und umgebende Bewölkung und Wolkenränder zusätzlich diffuse Strahlung zum Beobachter streuen.

Lumb (1964) entwickelte eine grundlegende solare Strahlungsparametrisierung, auf die viele weitere Arbeiten basieren. Hier werden synoptisch beobachtete Wolkengattungen

und Bedeckungsgrade in Wolkenkategorien eingeteilt, innerhalb derer die Transmissivität der bewölkten Atmosphäre approximiert werden kann. Diese Form der Strahlungsberechnung eignet sich gut für VOS-Wettermeldungen und synoptische Beobachtungen, kann aber bei kleinen Ungenauigkeiten der Beobachtung zu großen Fehlern führen.

Jedoch nimmt im heutigen Zeitalter der Automatisierung und Einsparung von Arbeitskräften die Anzahl der VOS-Wettermeldungen und der bemannten Wetterstationen drastisch ab. Deshalb ist die solare Strahlungsparametrisierung nach Zillman (1972) interessant, in der die Transmissivität der Atmosphäre aus dem Wasserdampfdruck in Bodennähe und dem Bedeckungsgrad abgeleitet wird. Wasserdampf ist eines der wichtigsten Absorptionsgase und mit der Bewölkung korreliert. Aus den Bildern einer Wolkenkamera lassen sich nach Long und DeLuisi (1998) die Bedeckungsgrade berechnen. Somit kann unabhängig von synoptischen Beobachtungen und der Wolkengattung die solare Einstrahlung parametrisiert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die erste MORE-Forschungsfahrt 2004 von Deutschland nach Südafrika begleitet. Neben meteorologischen Standardmessungen wurden Wolkenfotos aufgenommen und die solare Einstrahlung gemessen. Dieser Datensatz ist durch seine meridionale Ausdehnung einzigartig.

Im Folgenden werden verschiedene Ansätze, die solare Einstrahlung zu parametrisieren, vorgestellt. Dabei wird der Schwerpunkt auf Strahlungsparametrisierungen gelegt, die von synoptischen Wetterbeobachtungen unabhängig sind. Aus den Bildern der Wolkenkamera müssen die Bedeckungsgrade berechnet werden; die dabei auftretenden Schwierigkeiten sollen diskutiert und Ideen zur Lösung entwickelt werden. Des Weiteren soll versucht werden anhand der Daten der MORE-Fahrt bestehende Strahlungsparametrisierungen zu modifizieren, um die Qualität der berechneten Einstrahlungen zu steigern. Mit Strahlungsmessungen und Bedeckungsgraden der Nordseeinsel Sylt existieren von der Forschungsfahrt unabhängige maritime Daten, um die Verbesserungen der Parametrisierungen zu überprüfen.

## Kapitel 2

# Solare Strahlung

Die Sonne ist der Antrieb für das Leben auf der Erde. Ihre elektromagnetische Strahlung ist für den Wärme- und Energiehaushalt der Erde von primärer Bedeutung. Durch sie werden Luftbewegungen und Meeresströmungen verursacht, der Wasserkreislauf wird angetrieben und damit treten alle Erscheinungen, die als Wetter bezeichnet werden, auf. Das Sonnenlicht ist für die Photosynthese der Pflanzen notwendig, die die Grundlage der menschlichen und tierischen Ernährung sowie aller fossilen Energievorräte bildet.

### 2.1 Grundlagen

Der Ursprung der solaren Strahlung liegt in der etwa 400 km dicken Hauptstrahlungsschicht der Sonne, der Photosphäre. Sie hat eine Strahlungstemperatur von rund 6000 K. Nach weniger als 8 Minuten erreicht die emittierte elektromagnetische Strahlung die 150 Millionen Kilometer entfernte Erdbahn.

Das Spektrum der solaren Strahlung entspricht fast der Planckschen Strahlungskurve eines Schwarzkörperstrahlers mit 6000 K. Der entsprechende Wellenlängenbereich reicht von 0.29  $\mu\text{m}$  bis 4.0  $\mu\text{m}$ . Er lässt sich nach DWD (1987) in drei Bereiche einteilen:

Strahlungsart	Wellenlänge [ $\mu\text{m}$ ]	Anteil [%]
UV-Strahlung	0.29 - 0.4	7
Sichtbare Strahlung	0.4 - 0.73	42
IR-Strahlung	0.73 - 4.0	49
Gesamtstrahlung	0.29 - 4.0	98

Das Strahlungsmaximum liegt im sichtbaren grün-blauen Bereich bei 0.48  $\mu\text{m}$  (DWD, 1987). Die mittlere Bestrahlungsstärke auf eine senkrecht zur Strahlung stehenden Ebene beträgt am Oberrand der Erdatmosphäre 1368  $\text{W}/\text{m}^2$  (Solarkonstante). Durch die Exzentrizität der Erdbahn variiert sie im Laufe eines Jahres um etwa  $\pm 3.4\%$ . Auf ihrem Weg durch die Atmosphäre erfährt die solare Strahlung eine Veränderung ihrer Eigenschaften durch Extinktion und Reflexion.

Extinktion ist die Summe aus Streuung (Rayleigh-, Mie-Streuung) und Absorption. Sie erfolgt in der Erdatmosphäre an Luftmolekülen, Aerosolen, Eiskristallen und Regentropfen. Ist der streuende Partikel sehr viel kleiner als die Wellenlänge des Sonnenlichts (Luftmolekül), kommt es ausschließlich zur Rayleigh-Streuung. Hierbei wird blaues Licht etwa 10-mal stärker gestreut als rotes. Die Vorwärts- und Rückwärtsstreuung sind gleich groß und übersteigen die Streuung in andere Richtungen. Nimmt die Größe der Streupartikel zu und gilt für den Größenparameter  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{2\pi \cdot r}{\lambda} \approx 0.1 \quad , \quad (2.1)$$

wobei  $r$  der Partikelradius und  $\lambda$  die Wellenlänge sind, so geht die Rayleigh- in die Mie-Streuung über. Bei der Mie-Streuung ist die Intensität der Streuung kaum noch von der Wellenlänge abhängig und das Streulicht ist zum größten Teil vorwärts gerichtet. Als Streupartikel kommen sphärische Teilchen wie Aerosole und Wolkentröpfchen in Frage. Sind die Partikel nicht sphärisch und bedeutend größer als die Wellenlänge (Eiskristalle, Regentropfen), so wird die geometrische Optik (Snelliussches Brechungsgesetz, Fresnel'sche Formeln) angewandt.

Ausführlicher wird in Liou (2002) auf die Streuung solarer Strahlung eingegangen.

Absorption findet hauptsächlich an Aerosolen, Wolkentröpfchen und Niederschlag sowie an Gasen statt. Während Festkörper und Flüssigkeiten kontinuierliche Absorptionsspektren haben, absorbieren Gase in schmalen Absorptionslinien, die von diskreten Quantenübergängen bei der Anregung der Moleküle und von Übergängen der Valenzelektronen abhängig sind. Die Absorption solarer Strahlung wird zum überwiegenden Teil von Wasserdampf verursacht. Energetisch spielt Ozon in der Absorption keine große Rolle; trotzdem ist es das wichtigste absorbierende Gas, da es die aggressive lebensfeindliche UV-Strahlung mit Wellenlängen unterhalb von  $0.3 \mu\text{m}$  von der Erdoberfläche abschirmt.

Als Reflexion wird das Zurückwerfen der Strahlung in die Richtung der Strahlungsquelle bezeichnet. Dazu gehört auch die Rückstreuung. Da Wolken aus einer Vielzahl von Streupartikeln bestehen, die weitestgehend wellenlängenunabhängig Mie-streuend wirken, ist hier die Reflexion hoch und Wolken erscheinen im sichtbaren Spektralbereich hell und weiß. Je nach Einfallswinkel der Strahlung, Art und Dicke der Wolke schwankt die Wolkenalbedo (Verhältnis aus diffuser Wolkenreflexion und einfallender Strahlung) zwischen 30 % und 92 %.

Auf die Reflexion der Meeresoberfläche wird noch in Kapitel 4.5 genauer eingegangen.

## 2.2 Sonnenzenitwinkel

Der Winkel der einfallenden Strahlung, der Sonnenzenitwinkel, hat von allen Faktoren den größten Einfluss auf die Einstrahlung am Boden. Er ist der Winkel, unter dem ein Beobachter die Sonne am Himmel sieht, gemessen zwischen der Senkrechten und dem

Sonnenmittelpunkt. Per Definition ist der Sonnenzenitwinkel  $\theta = 0$ , wenn die Sonne genau senkrecht über dem Beobachter steht. Er berechnet sich nach Liou (2002) aus der geographischen Breite  $\phi$ , der Deklination  $\delta$  und dem Stundenwinkel  $h$ :

$$\cos \theta = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos h \quad . \quad (2.2)$$

Die vielfach benutzte Gleichung zur Berechnung der Deklination nach Brodbeck (2001)

$$\delta = 0.40954 \sin(0.0172(T - 79.34974)) \quad (2.3)$$

mit dem Tag  $T$  nach dem Julianischen Kalender reicht in ihrer Genauigkeit für die Berechnungen in dieser Arbeit nicht aus. Der Fehler im berechneten Sonnenzenitwinkel lag bei etwa  $1.5^\circ$ . Als Referenz lagen amtliche nautische Tabellen vom Office of the U.S. Naval Observatory (2003) und Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (2003) vor. In dieser Arbeit wurde die Deklination  $\delta$  nach WMO - No.8 (1996) berechnet:

$$\delta = \arcsin(0.397748 \sin(x - 77.51^\circ + 1.92^\circ \sin x)) \quad . \quad (2.4)$$

Für  $x$  gilt:

$$x = 0.9856^\circ T - 2.72^\circ \quad , \quad (2.5)$$

wobei  $T$  wieder den Tag im Jahr nach dem Julianischen Kalender darstellt.

Der Stundenwinkel  $h$  hängt mit der wahren Ortszeit (WOZ) nach folgender Formel zusammen (WMO - No.8, 1996):

$$h = \frac{2\pi(\text{WOZ} - 12 \cdot 3600\text{s})}{86400\text{s}} \quad . \quad (2.6)$$

Am wahren Mittag ( $\text{WOZ} = 12$ ) ist  $h = 0$ , am Vormittag ist  $h$  negativ, am Nachmittag positiv. Die WOZ ist eine ungleichmäßig laufende Zeit, weil sich der Stundenwinkel der Sonne durch die Exzentrizität der Erdumlaufbahn und die Schiefe der Ekliptik nicht mit konstanter Winkelgeschwindigkeit ändert. Sie lässt sich in die mittlere Ortszeit (MOZ) und die Zeitgleichung  $Z$  zerlegen:

$$\text{WOZ} = \text{MOZ} + Z \quad . \quad (2.7)$$

Die MOZ ist von der geographischen Länge  $\lambda$  abhängig. Östlich des Nullmeridians ist  $\lambda$  positiv, westlich negativ. Pro Längengrad ist die Zeitverschiebung 4 Minuten:

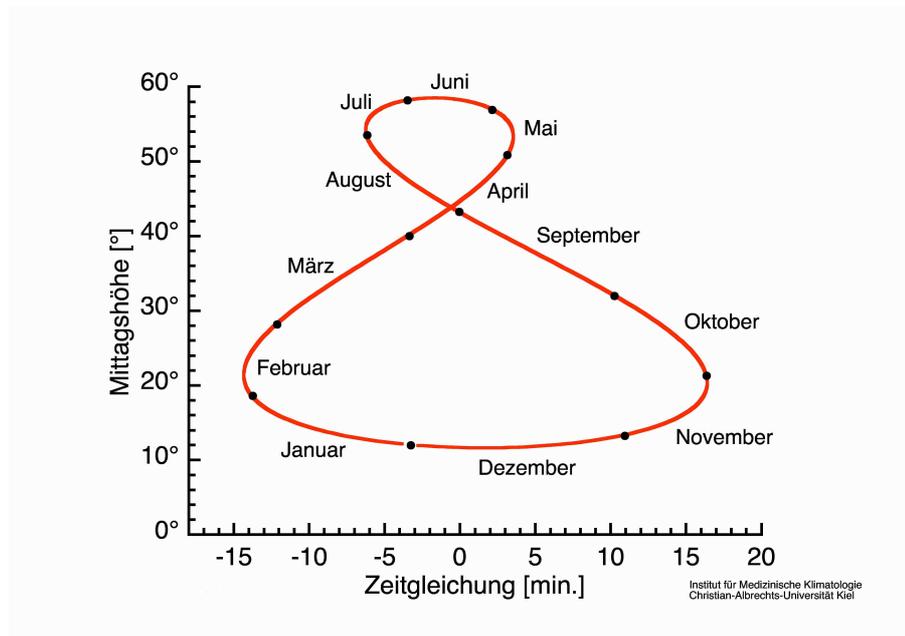
$$\text{MOZ} = \text{UTC} + \lambda \cdot 4 \cdot 60\text{s} \quad , \quad (2.8)$$

wobei UTC für Greenwich-Zeit steht.

Mit Gleichung 2.5 folgt für die Zeitgleichung  $Z$  nach WMO - No.8 (1996):

$$Z[\text{sec}] = (-7.66 \sin x - 9.87 \sin(2x + 24.99^\circ + 3.83^\circ \sin x)) \cdot 60\text{s} \quad . \quad (2.9)$$

Zur Berechnung der Zeitgleichung reicht eine zeitliche Auflösung von einem Tag aus. In Abbildung 2.1 wird die Verschiebung der WOZ aufgrund der Zeitgleichung für den



**Abbildung 2.1:** Zeitliche Verschiebung der Mittagshöhe (Sonnenhöchststand) für Westerland/Sylt durch die Zeitgleichung. Die Grafik basiert auf persönlichen Mitteilungen von Prof. C. Stick, Institut für Medizinische Klimatologie der CAU Kiel.

Standort Westerland auf Sylt gezeigt. Die erste MORE-Forschungsfahrt zur Datenaufnahme fand im Oktober und November 2004 statt (Kapitel 4.1); sie fällt also genau in die Zeit der maximalen positiven zeitlichen Verschiebung des Sonnenhöchststandes.

## 2.3 Räumliche Variabilität der Strahlung

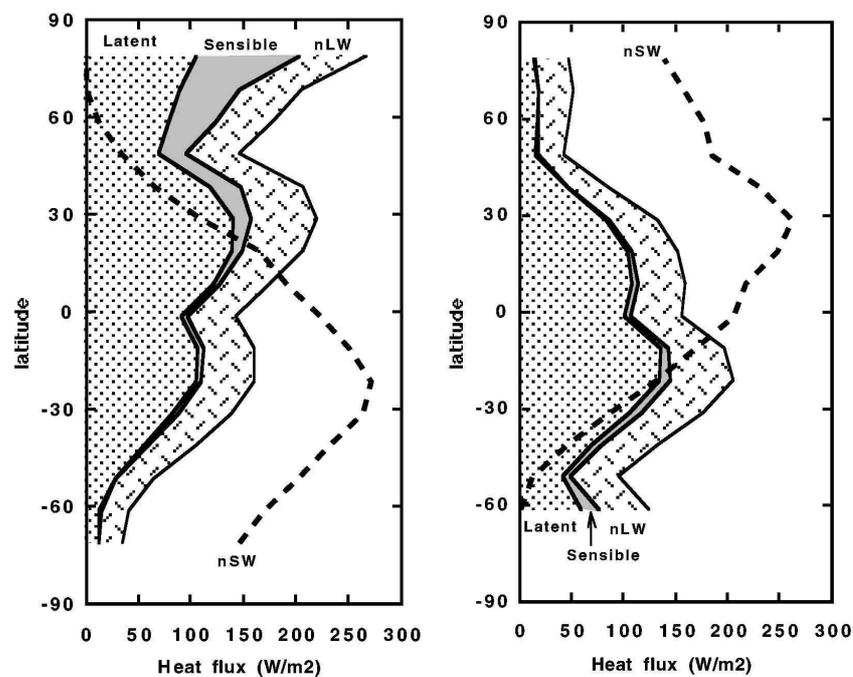
Aus den vorangegangenen Abschnitten geht hervor, dass die Einstrahlung in erster Linie durch den Sonnenstand, und somit durch Lokalzenit und geographischer Breite, und in zweiter Linie durch den Wolkenbedeckungsgrad bestimmt wird. Strahlungsbegünstigt sind also niedrige Breiten gegenüber hohen sowie wolkenarme und trockene Gebiete gegenüber wolkenreichen und feuchten.

Abbildung 2.2 zeigt nach Josey et al. (1999) den zonal gemittelten Energiefluss für die Komponenten:

- latente Wärme durch Verdunstung und Sublimation (Punktmuster)
- fühlbare Wärme (grau schraffiert)
- langwellige Nettoausstrahlung (Strichmuster)
- und kurzwellige Nettoeinstrahlung (unterbrochene Linie).

Die solare Einstrahlung stellt hier den Energiegewinn für die Erdoberfläche dar, die anderen Komponenten tragen zum Energieverlust bei. Sie sind in der Grafik jedoch mit gleichem Vorzeichen versehen, um die quantitative Vergleichbarkeit zu erhöhen. Dominant sind die solare Einstrahlung und der Energieverlust durch die latente Wärme.

Die solare Einstrahlung mit regionalen Spitzenwerten von  $1000 \text{ W/m}^2$  an sonnigen Ta-



**Abbildung 2.2:** Zonale Mittel der Energieflüsse für Januar (links) und Juli (rechts) nach Josey et al. (1999). Die gestrichelte Kurve zeigt die jeweilige kurzweilige Nettostrahlung.

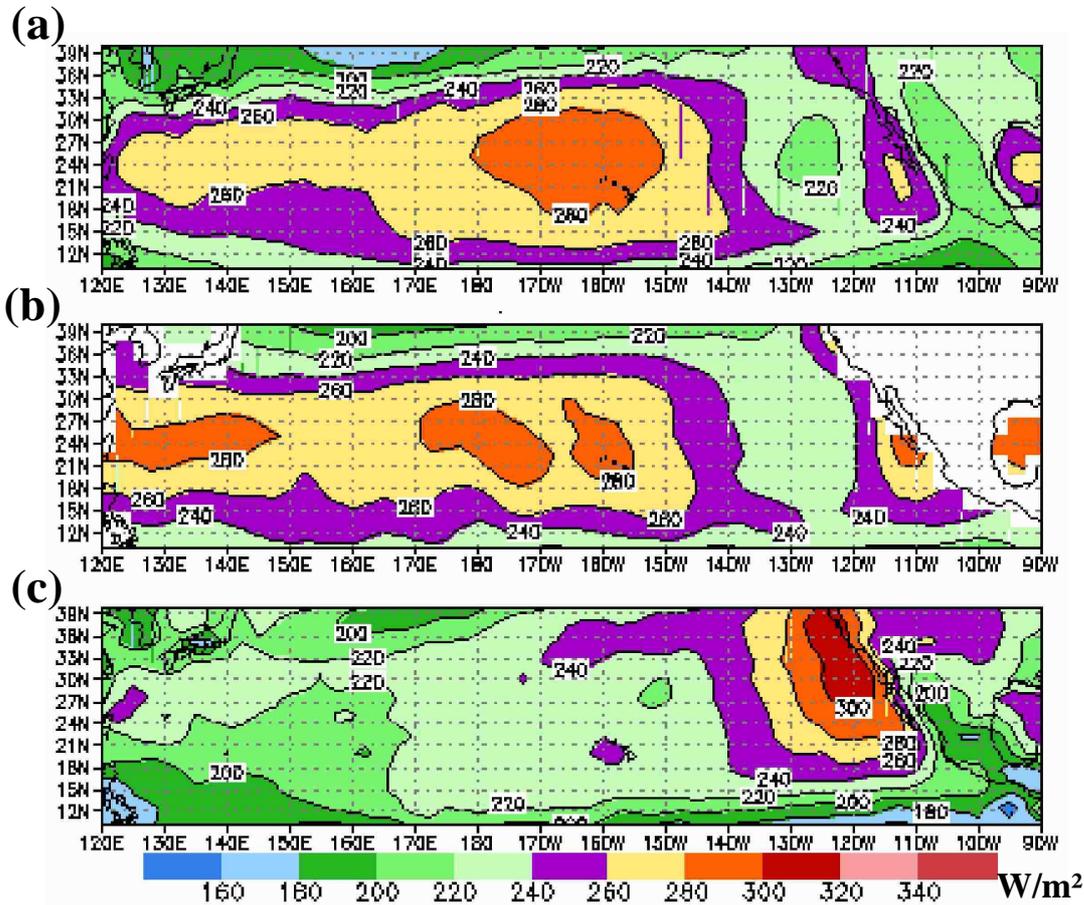
gen erreicht im Mittel etwa  $200 \text{ W/m}^2$  in der Sommerhemisphäre, wobei der mittlere latente Wärmeverlust in der Winterhemisphäre bei  $100 \text{ W/m}^2$  liegt. Die langwellige atmosphärische Gegenstrahlung und die langwellige Ausstrahlung betragen beide einige  $100 \text{ W/m}^2$ , sodass die Nettobilanz aus beiden typischerweise bei  $40$  bis  $80 \text{ W/m}^2$  liegt. Durch die Grafik lassen sich jedoch noch nur grobe Rückschlüsse auf die Erwärmung oder Abkühlung der Erdoberfläche ziehen, da die Advektion von Wärme durch Meeresströmungen unberücksichtigt bleibt.

Eine Strahlungsbilanzierung der auf der MORE-Fahrt gewonnenen Messergebnisse findet sich in Kapitel 4.5.

Die Abbildung 2.3 nach Taylor et al. (1999) zeigt Analysen der solaren Einstrahlung für den Nordpazifik als Mittel der Jahre 1983 bis 1990 basierend auf unterschiedlichen Methoden der Abschätzung. Obwohl im MORE-Projekt ausschließlich Daten des Atlantik untersucht werden, soll diese Grafik die Unterschiede und Fehler verschiedener Ana-

lysemethoden aufzeigen und die Notwendigkeit von verbesserten Parametrisierungen begründen.

Abbildung 2.3 (a) zeigt die solare Nettostrahlung nach Darnell et al. (1992) basierend auf



**Abbildung 2.3:** Kurzwellige Nettostrahlung an der Meeresoberfläche des Nordpazifik für Juli 1983 - 1990, (a) auf Satellitendaten basierend (Darnell et al., 1992), (b) auf Schiffsbeobachtungen basierend (daSilva et al., 1994), (c) ECMWF - Reanalysedaten (White und daSilva, 1999).

Satellitendaten. Die Satellitenfernerkundung liefert im Allgemeinen gute flächendeckende Ergebnisse, allerdings sind dafür exakte periodische Kalibrierungen notwendig, die nicht immer möglich sind. Whitlock et al. (1995) haben im Rahmen des WCRP die erste globale Strahlungsbilanz aus Satellitendaten berechnet; hiernach überschätzt die globale, monatlich gemittelte GEWEX SRB die Einstrahlung um etwa  $15 W/m^2$ .

In 2.3 (b) ist die solare Nettostrahlung anhand von Daten durch Schiffsbeobachtungen nach daSilva et al. (1994) dargestellt. Die berechneten Einstrahlungen auf Grundlage der VOS-Daten stimmen relativ gut mit den Satellitendaten aus (a) überein, obwohl sie nur auf einfachen Parametrisierungen nach Reed (1977) basieren, die die Wolkenbeobachtungen der Schiffsoffiziere und deren festgestellte Bedeckungsgrade berücksichtigen. Die Wetterbeobachtung durch VOS ist auf der Südhemisphäre sehr lückenhaft. Die Qualität

der Wetterbeobachtung durch Schiffsoffiziere ohne meteorologische Ausbildung ist ungewiss.

Abbildung 2.3 (c) zeigt die Ergebnisse der ECMWF-Reanalyse nach übernommenen Daten von White und daSilva (1999). Die Reanalyse benutzte ein hochentwickeltes Strahlungstransportmodell, das die Wolken jedoch nicht korrekt wiedergibt. Deshalb kommt es zu großen Fehlern der Nettostrahlungsberechnung.

Obwohl die solaren Strahlungsparametrisierungen anhand von Satellitendaten und VOS-Daten ähnliche Ergebnisse liefern, sind Fehler vorhanden und die Verbesserung beider angebracht. Die theoretische Betrachtung verschiedener Parametrisierungen findet sich im nächsten Kapitel, ein qualitativer Vergleich in Kapitel 6.

Eine Verbesserung der Einstrahlungsberechnung durch Satellitendaten wird nicht Gegenstand dieser Arbeit sein, soll aber in der weiteren MORE-Forschung thematisiert werden.



## Kapitel 3

# Parametrisierungen solarer Strahlung

Flächendeckende direkte Strahlungsmessungen sind nicht möglich, insbesondere nicht auf See. Direkte Messungen werden dort nur von Forschungsschiffen durchgeführt, Handelsschiffe sind nicht mit Pyranometern ausgestattet. Globale Daten der Satellitenfernerkundung liegen nur für die letzten Jahre vor und sind oft mit großen Fehlern behaftet. Allerdings lassen sich Einstrahlungen näherungsweise durch Strahlungsparametrisierungen berechnen, die auf leicht messbaren atmosphärischen Zustandsgrößen aufbauen. Für den Strahlungstransport in der Atmosphäre sind folgende Parameter wichtig:

- Solarkonstante
- Sonnenzenitwinkel
- Bedeckungsgrade der tiefen, mittleren und hohen Wolken
- Wolkengattungen der tiefen, mittleren und hohen Wolken
- Wolkenunter- und Wolkenoberkantenhöhe der tiefen, mittleren und hohen Wolken
- optische Eigenschaften der Wolken (Albedo, Tropfenradius, Wasser- und Eisgehalt)
- Vertikalstruktur der Luftfeuchtigkeit
- Vertikalstruktur der Lufttemperatur
- Bodenalbedo
- Aerosolverteilung.

Die Parameter unterliegen einer natürlichen Variabilität, auf die verschiedene Strahlungsparametrisierungen mit unterschiedlicher Sensitivität reagieren. In den Parametrisierungen kann immer nur eine kleine Auswahl der Parameter berücksichtigt werden; gegenüber den anderen Parametern verhält sich diese Parametrisierung dann unsensitiv.

### 3.1 Lineare Parametrisierungen

Der Sonnenzenitwinkel ist der wichtigste Faktor einer Strahlungsparametrisierung. Er ist in jeder Parametrisierung unerlässlich.

Die solare Einstrahlung  $Q_{SW}$  wird im einfachsten Fall für die Meeresoberfläche durch

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

parametrisiert, wobei  $T_F$  der atmosphärische Transmissionfaktor ist und  $Q_0$  die am Ober-  
rand der Atmosphäre einfallende solare Strahlung:

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

$S_0$  bezeichnet hier die mittlere Solarkonstante mit  $1368 \text{ W/m}^2$  und  $\theta$  ist der Sonnenzenitwinkel (siehe Kapitel 2.2).

In diesem Kapitel wird der atmosphärische Transmissionsfaktor durch Gleichungen, die linear vom Sonnenzenitwinkel abhängig sind, parametrisiert. Es sollen die gebräuchlichsten Strahlungsparametrisierungen vorgestellt werden, die für die Berechnung stündlicher Mittelwerte entwickelt wurden.

#### 3.1.1 Lumb

Die Strahlungsparametrisierung nach Lumb (1964) gehört zu den 1 - Schritt - Parametrisierungen, bei der der Transmissionsfaktor direkt von der Bewölkung abhängt. Die Einstrahlung für den wolkenfreien Himmel (Clear-Sky) ist dabei keine separate Größe in der Berechnung. Lumb benutzt die Gleichungen 3.1 und 3.2, und somit folgt:

$$Q_{SW} = S_0 \cdot \cos \theta \cdot T_F \quad (3.3)$$

Die Transmissivität ist neben dem Sonnenstand vom Beckungsgrad und den vorherrschenden Wolkengattungen abhängig. Lumb erstellt die Wolkenkategorien 1 bis 9, in die die Bewölkung nach ihrer optischen Dicke aufsteigend eingeordnet wird. Beispielsweise gelten für Kategorie 1 alle Bedeckungsgrade bis  $2/8$ , Kategorie 5 bezeichnet Cirrostratus-Wolken, die den ganzen Himmel bedecken, bei gleichzeitiger Anwesenheit von bis zu  $4/8$  tiefen Wolken, und Kategorie 9 gilt für  $8/8$  Schlechtwetter-Stratus oder Schlechtwetter-Cumulus unter Altostratus oder Nimbostratus mit Regen. Für jede Kategorie gibt es die Transmissionskoeffizienten  $a$  und  $b$ , wobei  $b$  noch mit dem Kosinus des Sonnenzenitwinkels multipliziert wird, um die Verringerung der Transmission bei niedrigen Sonnenständen (langer Weg durch die Atmosphäre) zu berücksichtigen. Für den Transmissionsfaktor  $T_F$  gilt die lineare Gleichung:

$$T_F = a_i + b_i \cos \theta \quad , \text{ mit } i = 1, \dots, 9 \quad (3.4)$$

Ein Nachteil dieser Parametrisierung ist, dass nicht alle existenten Bewölkungsvarianten in den 9 Kategorien enthalten sind. Dobson und Smith (1988) konnten nur etwa 50% ihrer Wolkenbeobachtungen in die Kategorien einordnen. Aus diesem Grund kann Lumb's

Parametrisierung nicht ohne Modifikationen für Strahlungsbilanzberechnungen benutzt werden.

Bei der Berechnung von stündlichen Mittelwerten gibt Lumb eine Genauigkeit der Parametrisierung von  $\pm 10\%$  für die Summe der solaren Einstrahlung von 5 Tagen im Nordatlantik ( $45^\circ\text{N}$  bis  $65^\circ\text{N}$ ) an.

Die Transmissionskoeffizienten wurden aus Strahlungsmessungen von der Station *Juliett* ( $52,5^\circ\text{N}$ ,  $20^\circ\text{W}$ ) der Jahre 1958 bis 1961 berechnet. Dobson und Smith (1988) haben anhand des Originaldatensatzes Lumb's Transmissionskoeffizienten jedoch nicht reproduzieren können und vermuteten, dass Lumb einige unpassende Daten nicht berücksichtigte.

### 3.1.2 Lind

Die Strahlungsparametrisierung nach Lind et al. (1984) hat große Ähnlichkeit mit der von Lumb (1964). Hier wird der gleiche Ansatz für die Berechnung der solaren Einstrahlung unter Berücksichtigung des Sonnenzenitwinkels, des Bedeckungsgrades und der Wolkengattung verwendet:

$$Q_{SW} = S_0 \cdot \cos \theta \cdot (a_i + b_i \cos \theta) \quad . \quad (3.5)$$

Lind et al. haben allerdings die 9 Kategorien von Lumb erweitert, sodass alle Wolkenbeobachtungen berücksichtigt werden können. Außerdem wurden neue Transmissionskoeffizienten  $a_i$  und  $b_i$  berechnet. Der verwendete Datensatz für die solare Einstrahlung stammt aus dem JASIN-Experiment (Joint Air-Sea Interaction) von 1978, das im Nordatlantik bei  $59^\circ\text{N}$  und  $12^\circ\text{W}$  stattfand.

### 3.1.3 Dobson und Smith

Die Strahlungsparametrisierung nach Dobson und Smith (1988) gehört ebenfalls zu den 1 - Schritt - Parametrisierungen, die auf Lumb (1964) aufbauen. Die Strahlungsberechnung erfolgt wieder nach:

$$Q_{SW} = S_0 \cdot \cos \theta \cdot (a_i + b_i \cos \theta) \quad . \quad (3.6)$$

Dobson und Smith führen das *Okta-Modell* ein. Das sind die Kategorien 0 bis 9, die nur auf dem Bedeckungsgrad basieren, wobei Kategorie 9 für die unbekannte Wolkenbedeckung (verursacht durch Nebel oder Schneefall) steht. Dieses Modell wurde ursprünglich entwickelt, um den Einfluß der Wolkengattungen auf die berechneten Einstrahlungen zu testen.

Mit den Strahlungs- und Wolkenbedeckungsdaten von verschiedenen nordpazifischen und nordatlantischen Seewetterstationen der Jahre 1959 bis 1975 wurden die kategorie-spezifischen Transmissionskoeffizienten ermittelt.

### 3.1.4 Bennett

Die Strahlungsparametrisierung nach Bennett (1982) ist eine 2 - Schritt - Parametrisierung. Im ersten Teil wird die solare Einstrahlung für den wolkenfreien Himmel mit einer konstanten Transmissivität der Atmosphäre von  $T_0 = 0.72$  berechnet. Im zweiten Teil wird die Wolkenbedeckung berücksichtigt wobei der Bedeckungsgrad linear eingeht. Für die solare Einstrahlung des wolkenfreien Himmels gilt:

$$Q_{SW}(0) = Q_0 \cdot T_0 \quad (3.7)$$

$$= S_0 \cdot \cos \theta \cdot 0.72 \quad (3.8)$$

Für alle Bedeckungsgrade  $N$  ergibt sich die Strahlungsparametrisierung  $Q_{SW}(N)$  aus der Multiplikation der Einstrahlung für den wolkenfreien Himmel mit dem Reduktionsfaktor der Strahlung durch die Wolken  $T_W$ . Mit dem Reduktionsfaktor

$$T_W = 1.0 - 0.52 \cdot N \quad , \text{ mit } N \in [0, 1] \quad (3.9)$$

folgt für die Einstrahlung bei bewölktem Himmel:

$$Q_{SW}(N) = Q_{SW}(0) \cdot T_W \quad (3.10)$$

$$= Q_{SW}(0) \cdot (1.0 - 0.52 \cdot N) \quad (3.11)$$

Der Faktor von 0.52 vor dem Bedeckungsgrad berücksichtigt die mittlere Albedo der Wolken und ist nach Bennett unabhängig von der geographischen Breite.

## 3.2 Nichtlineare Parametrisierungen

Nichtlineare Strahlungsparametrisierungen können sowohl 1 - Schritt -, als auch 2 - Schritt - Parametrisierungen sein, bei denen der Transmissionsfaktor  $T$  eine nichtlineare Funktion des Sonnenzenitwinkels  $\theta$  ist.

### 3.2.1 Dobson und Smith

Bei der Analyse von Strahlungsdaten und linearen Strahlungsparametrisierungen haben Dobson und Smith (1988) in ihrer Arbeit eine Nichtlinearität der Transmissivität im Sonnenzenitwinkel festgestellt. Ihre berechneten Transmissionskoeffizienten nach Lumb (1964) ergaben für die Sommermonate höhere Werte für  $a_i$  und niedrigere Werte für  $b_i$  als die Daten der Wintermonate.

Deshalb haben sie neben der Strahlungsparametrisierung aus Kapitel 3.1.3 noch die folgende nichtlineare 1 - Schritt - Parametrisierung vorgestellt. Für die solare Einstrahlung bei allen Bedeckungsgraden gilt wieder:

$$Q_{SW} = Q_0 T_F \quad (3.12)$$

$$= S_0 \cos \theta \cdot T_F \quad (3.13)$$

Der nichtlineare Transmissionsfaktor  $T_F$  beinhaltet den Wolkenbedeckungsgrad  $N$  und indirekt die Wolkengattung durch die Festlegung neuer Wolkenkategorien  $i$  von 0 bis 10. Die Kategorien basieren ursprünglich auf der Einteilung der Wolkengattungen durch die WMO und wurden anhand des verwendeten Datensatzes für die Transmission der Atmosphäre von nordpazifischen Seewetterstationen (1959-1975) modifiziert. Für den Transmissionsfaktor gilt:

$$T_F = F \exp(-D_0 / \cos \theta) \cdot (N [\exp(-D_i / \cos \theta) + E_i] + (1 - N)) \quad (3.14)$$

Hierbei bezeichnen  $F$  den Anteil der Einstrahlung, der bei wolkenfreiem Himmel nicht von atmosphärischen Gasen ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , ...) absorbiert wird, und  $D_0$  die optische Dicke des wolkenfreien Himmels; beide wurden aus Daten von Sable Island (1969-1980) gewonnen.  $D_i$  ist die optische Dicke von Wolken für direkte Strahlung und  $E_i$  ist der Transmissionsfaktor von Wolken für diffuse Strahlung.  $D_i$  und  $E_i$  sind kategoriespezifisch. Dobson und Smith (1988) testeten ihr lineares *Okta-Modell* (siehe Kapitel 3.1.3), ihre nichtlineare Strahlungsparametrisierung und die Parametrisierung nach Lind et al. (1984) anhand ihres Datensatzes (1959-1975) durch die Berechnung der Standardabweichung der Parametrisierung von der gemessenen solaren Einstrahlung für stündliche Mittelwerte:

Strahlungsparametrisierung	Standardabweichung $W/m^2$
Dobson und Smith (1988), linear	80
Dobson und Smith (1988), nichtlinear	84
Lind et al. (1984)	92

Alle Parametrisierungen sind relativ ungenau, wenn stündliche Mittelwerte parametrisiert werden. Die Mittelungen über einen Tag ergaben Standardabweichungen von  $28 - 31 W/m^2$ . Je länger die Mittelungen, desto genauer sind die Parametrisierungen. Der Langzeitfehler für die gesamte Dauer des Datensatzes lag bei rund  $0.5 W/m^2$ .

Es ist überraschend, dass das simple *Okta-Modell* die geringsten Abweichungen aufweist, obwohl es unabhängig von der Wolkengattung ist. Die Ungenauigkeit von Lind's Parametrisierung könnte an der weitaus geringeren Datenmenge liegen, die zum Erstellen der Parametrisierung benutzt wurde (2 Forschungsschiffe, je 4 Wochen im Nordatlantik).

### 3.2.2 Zillman

Die Strahlungsparametrisierung nach Zillman (1972) beinhaltet neben der Solarkonstante und dem Sonnenzenitwinkel auch den Wasserdampfdruck in 2m Höhe und den Bedeckungsgrad. Sie gehört zu den 2 - Schritt - Parametrisierungen.

Zuerst erfolgt die Berechnung der solaren Einstrahlung für den wolkenfreien Himmel  $Q_{SW}(0)$  mit der Transmissivität für die wolkenfreie Atmosphäre  $T_0$ . Es gilt:

$$Q_{SW}(0) = Q_0 \cdot T_0 \quad (3.15)$$

$$= S_0 \cdot \cos \theta \cdot T_0 \quad . \quad (3.16)$$

Die Transmissivität berechnet Zillman in Abhängigkeit vom Sonnenzenitwinkel  $\theta$  und dem Partialdruck des Wasserdampfes  $p_w$  in der untersten Luftschicht. Somit wird der Rolle des Wasserdampfes als eines der wichtigsten Absorptionsgase gerecht (siehe Kapitel 2.1). Die Transmissivität  $T_0$  der wolkenfreien Atmosphäre berechnet Zillman (1972) nach:

$$T_0 = \frac{\cos \theta}{(\cos \theta + 2.7)p_w 10^{-3} + 1.085 \cos \theta + 0.1} \quad (3.17)$$

mit  $p_w$  in hPa. Für die Einstrahlung folgt daraus:

$$Q_{SW}(0) = \frac{S_0 \cdot \cos^2 \theta}{(\cos \theta + 2.7)p_w 10^{-3} + 1.085 \cos \theta + 0.1} \quad . \quad (3.18)$$

Zillman erweitert die Strahlungsparametrisierung auf die Berücksichtigung aller Wolkenbedeckungsgrade  $N$  mit dem Wolkenfaktor  $T_W$  von Laevastu (1960). Der Wolkenfaktor ist eine nichtlineare Funktion des Bedeckungsgrades. Dadurch ist die Transmissivität bei geringer und mittlerer Bewölkung noch relativ hoch, und erst bei starker Bewölkung verringert sich die Transmissivität deutlich.

Diese Nichtlinearität des Bedeckungsgrades in der solaren Einstrahlung entspricht auch der Beobachtung des *Broken Cloud Effektes*, bei dem bei mittleren Bedeckungsgraden kurzzeitig sogar eine Strahlungserhöhung erfolgen kann. Ursache dafür sind die Reflexionen an Wolkenrändern und Mehrfachreflexionen zwischen Wolkenunterkante und Boden, die zu einer Erhöhung der diffusen Strahlung und somit zu einer verstärkten Globalstrahlung führen können. Weitere Betrachtungen dazu finden sich bei Schade (2005) und Heise (2004).

Für den Wolkenfaktor nach Laevastu (1960) gilt:

$$T_W = 1.0 - 0.6 \cdot N^3 \quad , \text{ mit } N \in [0, 1] \quad . \quad (3.19)$$

Daraus folgt für die Strahlungsparametrisierung mit Gültigkeit für alle Bedeckungsgrade:

$$Q_{SW}(N) = Q_{SW}(0) \cdot (1.0 - 0.6 \cdot N^3) \quad . \quad (3.20)$$

Da die Parametrisierung nach Zillman (1972) ohne die Wolkengattung auskommt, eignet sie sich vor allem für Datensätze, in denen die Wolkengattung nicht bestimmt wurde oder mit zweifelhafter Genauigkeit ermittelt wurde (Beobachtungen von Schiffsoffizieren). Sie ist prädestiniert für die Analyse von Wolkenkameradaten, da hier die nachträgliche Ermittlung der Wolkengattung „per Hand“ aufgrund der großen Datenmengen nicht möglich ist und für diese Aufgabe noch kein Computerprogramm befriedigende Ergebnisse liefert.

### 3.2.3 Shine

Die Strahlungsparametrisierung nach Shine (1984) gehört ebenfalls zu den 2 - Schritt - Parametrisierungen. Shine modifiziert für den wolkenfreien Himmel die Gleichung der

Transmissivität 3.17 nach Zillman (1972).

Die Transmissivität  $T_0$  der wolkenfreien Atmosphäre ergibt sich somit aus:

$$T_0 = \frac{\cos \theta}{(\cos \theta + 1.0)p_w 10^{-3} + 1.2 \cos \theta + 0.0455} \quad (3.21)$$

Daraus folgt für die solare Einstrahlung bei wolkenfreiem Himmel:

$$Q_{SW}(0) = Q_0 \cdot T_0 \quad (3.22)$$

$$= \frac{S_0 \cdot \cos^2 \theta}{(\cos \theta + 1.0)p_w 10^{-3} + 1.2 \cos \theta + 0.0455} \quad (3.23)$$

Für die Berechnung der Wolkenbedeckung bei beliebigem Bedeckungsgrad muss zuerst die solare Einstrahlung bei 8/8 Bewölkung berechnet werden. Hier geht neben dem Sonnenzenitwinkel auch die optische Dicke der Atmosphäre  $\tau$  und die Albedo des Untergrundes  $\rho_u$  ein. Für den komplett wolkenbedeckten Himmel gilt:

$$Q_{SW}(1.0) = \frac{(53.5 + 1274.5 \cos \theta) \sqrt{\cos \theta}}{1.0 + 0.139(1.0 - 0.9345\rho_u)\tau} \quad (3.24)$$

Die solare Einstrahlung bei beliebigem Bedeckungsgrad  $Q_{SW}(N)$  ergibt sich aus der gewichteten Mittelung der Einstrahlung bei wolkenfreiem Himmel und der Einstrahlung bei komplett bedecktem Himmel. Das heißt, dass die Einstrahlung eine lineare Funktion des Wolkenbedeckungsgrades ist:

$$Q_{SW}(N) = (1.0 - N) \cdot Q_{SW}(0) + N \cdot Q_{SW}(1.0) \quad (3.25)$$

Durch die Albedo des Untergrundes in Gleichung 3.24 werden Mehrfachreflektionen zwischen Untergrund und Wolkenunterseite in Gebieten mit einer starken Reflektivität (z.B. Schneeflächen) berücksichtigt.

Die Strahlungsparametrisierung nach Shine (1984) wird in der weiteren Arbeit nicht verwendet, da die optische Dicke der Atmosphäre während der MORE-Forschungsfahrt messtechnisch nicht erfasst werden konnte. Die Albedo hätte zwar ebenfalls parametrisiert werden können, jedoch könnte in diesem Fall nicht geklärt werden, wie groß der Fehler der alleinigen Strahlungsparametrisierung ist.

### 3.3 Die Forschungsarbeit von Alexei Sinitsyn

Das Meridional Ocean Radiation Experiment ist eine Zusammenarbeit des IfM-GEOMAR und des Shirshov Institute of Oceanology (Moskau). Die russische Datenauswertung im MORE-Projekt wird vor allem von Alexei Sinitsyn im Rahmen seiner PhD-Arbeit durchgeführt. In diesem Kapitel soll kurz auf die wesentlichen Aspekte seiner Analysen eingegangen werden. Alle hier vorgestellten Ergebnisse sind Teil seiner Arbeit und wurden mir in persönlichen Kontakten zu Verfügung gestellt.

Die Basis der Arbeit von Alexei Sinitsyn bilden Strahlungsparametrisierungen, die von Beobachtungen des Bedeckungsgrades und der Wolkengattungen abhängig sind. Für diesen Zweck wurden vom russischen Team während der Forschungsfahrt stündlich Wolkenbeobachtungen und meteorologische Standardmessungen durchgeführt. Im Folgenden wurde vor allem auf die Parametrisierungen nach Lumb (1964) (Kapitel 3.1.1), Dobson und Smith (1988) (Kapitel 3.1.3) und Malevsky et al. (1992) aufgebaut. Malevsky et al. benutzen ein Modell, das direkt vom Wolkenbedeckungsgrad  $N$  und indirekt von Wasserdampfdruck bzw. Temperatur abhängt. Für die solare Einstrahlung bei unbewölkter Atmosphäre wird gesetzt:

$$Q_{SW}(0) = c(\sin \theta)^d \quad . \quad (3.26)$$

Hierbei sind  $c$  und  $d$  empirische Koeffizienten, die von der atmosphärischen Transmissivität abhängen. Für die bewölkte Atmosphäre ergibt sich nach Malevsky et al.:

$$Q_{SW}(N) = Q_{SW}(0) \cdot (1 + 0.19N - 0.71N^2) \quad , \text{ mit } N = [0, 1] \quad . \quad (3.27)$$

Malevsky et al. geben außerdem Berechnungsgrundlagen an, die Transmissivität der Atmosphäre anhand der Lufttemperatur oder des Wasserdampfdruckes in Bodennähe zu berechnen. Lufttemperatur und Wasserdampfdruck werden hier als stark korreliert angesehen.

Im ersten Schritt seiner Untersuchungen wendete Sinitsyn das lineare *Okta-Modell* von Dobson und Smith (1988) an und verglich es mit der Parametrisierung nach Malevsky et al. (1992), die passend zur jeweiligen *Okta*-Kategorie berechnet wurde. So konnten für jede *Okta*-Kategorie die Parametrisierung gegen das Stundenmittel der gemessenen Einstrahlung geplottet und eine Regressionsgerade ermittelt werden. Abbildung 3.1 zeigt diese Regression am Beispiel von 8/8 Bewölkung und der Parametrisierung nach Malevsky et al. (1992).

Für jede *Okta*-Kategorie konnten so die jeweiligen Regressionen und Standardabweichungen von Dobson und Smith und Malevsky et al. miteinander verglichen werden. Hierbei ist die Strahlungsparametrisierung nach Malevsky et al. die exaktere.

Es zeigte sich außerdem, dass bei 8/8 Bedeckung die meisten Beobachtungen vorliegen, die Wolken hier meist stratiform waren und deren Regression relativ gering und die Parametrisierung also verhältnismäßig ungenau ist.

Im zweiten Schritt hat Sinitsyn auf Lumb (1964) aufbauend eine eigene Wolkenklassifizierung entwickelt. Sie ist in Abbildung 3.2 gezeigt. Neu ist hier die Berücksichtigung der Sichtbarkeit der Sonne als Indikator für die Transmissivität, was vor allem bei kompletter stratiformer Bewölkung wichtig ist. Die Sichtbarkeit der Sonne kann Werte von 2 (wolkenfreie Umgebung der Sonne) bis 0 (diffuse lokalisierbare Lichtquelle) oder die Bezeichnung *cloudy* (nicht sichtbar) annehmen. Ein zweiter wesentlicher Unterschied zu Lumb's Wolkenkategorien besteht in den Kategorien 6 bis 9, die alle 7/8 und 8/8 Stratumulus mit unterschiedlicher Entstehung der Wolken und abnehmender Sichtbarkeit

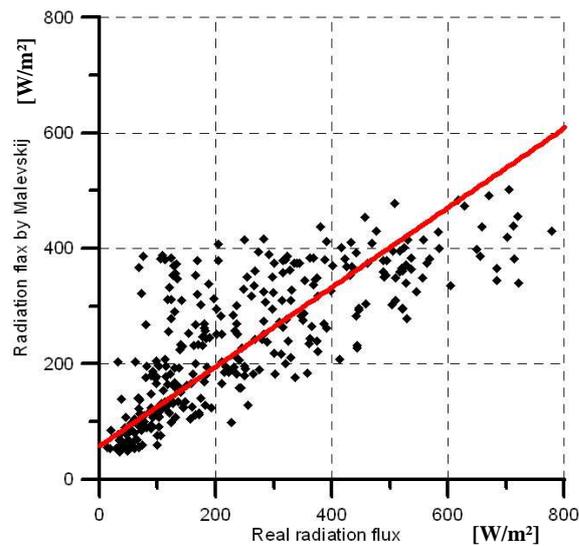


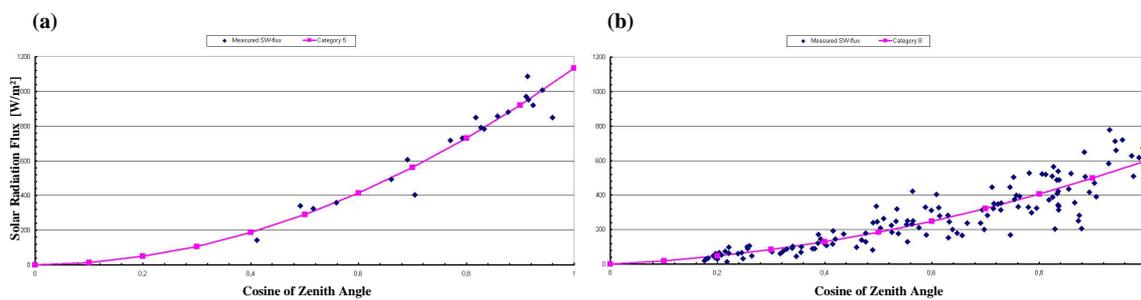
Abbildung 3.1: Regression bei 8/8 Bedeckung. Parametrisierung nach Malevsky et al. (1992) gegen Stundenmittel der gemessenen solaren Einstrahlung.

Category	Criteria used for classification	General description	Estimate of transimtion factor	No. of cases
1	Clear sky	Sky without clouds	$f=0,2246 \times \sinh +0,6191$	10
2	Total amount of cloud $\leq 2$ oktas. Sun=2	Virtual clear sky.	$f=0,1612 \times \sinh +0,6404$	30
3	Total amount of cloud = 3-4 oktas. Sun=1	Only different type of Cumulus	$f=0,1022 \times \sinh +0,677$	9
4	Total amount of cloud = 5-7 oktas. Sun=1	Only different type of Cumulus	$f=0,4907 \times \sinh +0,198$	17
5	Total amount of cloud = 4-8 oktas. Low = 1-4 Sun=1	Above layer of Cumulus located layer of Cirrus-type cloud	$f=0,8121 \times \sinh +0,0162$	20
6	Total amount of cloud = 7-8 oktas. Low = 7-8 Sun=0	Large amounts of Sc, Sc not from Cu	$f=0,6158 \times \sinh +0,083$	23
7	Total amount of cloud = 7-8 oktas. Low = 7-8 Sun=0	Large amounts of Sc, Sc from Cu.	$f=0,3119 \times \sinh +0,1913$	15
8	Total amount of cloud = 7-8 oktas. Low = 7-8 Sun=Cloudly	Large amounts of Sc, Sc not from Cu or Sc neb.	$f=0,3352 \times \sinh +0,1018$	134
9	Total amount of cloud = 7-8 oktas. Low = 7-8 Sun=0/Cloudly	St fr. or Cu fr. of bad weather with As or Ns	$f=0,1158 \times \sinh +0,1403$	56

Abbildung 3.2: Wolkenkategorien nach Sinitsyn.

der Sonne beschreiben. Somit wird versucht, die unsicheren Parametrisierungen für (fast) komplette Stratusbewölkung zu verfeinern und nach ihrer optischen Dicke einzuteilen. Für jede der Kategorien nach Sinitsyn wurde die Forschungsfahrt wieder nach Dobson und Smith (1988) und Malevsky et al. (1992) parametrisiert und die zugehörigen Regressionen berechnet. Hier ergaben sich wieder bessere Resultate für Malevsky et al.. Im letzten Schritt berechnete Sinitsyn passend zu seinen Wolkenkategorien und auf dem Datensatz der MORE-Forschungsfahrt basierend neue Transmissionskoeffizienten  $a_i$  und  $b_i$ , die auf die Gleichungen 3.3 und 3.4 nach Lumb (1964) angewendet werden. Dazu wurden die gemessenen solaren Einstrahlungen gegen den Kosinus des Sonnenzenitwinkels aufgetragen und somit die optimalen Koeffizienten bestimmt.

Abbildung 3.3 (a) zeigt dies am Beispiel von Wolkenkategorie 5 und in (b) für Kategorie



**Abbildung 3.3:** Beispiel für die Anpassung der Transmissionskoeffizienten nach Sinitsyn an die Messdaten für (a) Wolkenkategorie 5 und (b) Wolkenkategorie 8.

8. Zusätzlich sind in den Grafiken die Kurvenverläufe für die Parametrisierung der entsprechenden Kategorie nach Sinitsyn in rosa aufgetragen.

Für Kategorie 8 ist immer noch eine große Streuung der Messwerte um die Parametrisierung zu erkennen. Das bedeutet, dass die Parametrisierung von stratiformer Bewölkung nach wie vor fehlerbehaftet und problematisch ist. Jedoch zeigten Regressionen der Strahlungsparametrisierung nach Sinitsyn für den Datensatz der MORE-Forschungsfahrt bessere Ergebnisse als Dobson und Smith (1988) und Malevsky et al. (1992).

In der weiteren Arbeit strebt Alexei Sinitsyn die Einbeziehung von größeren Datensätzen (MORE-Fahrt 2005) und eventuell Stationsdaten aus St. Petersburg in die Analysen an, um die Wolkenkategorien und deren Transmissionseigenschaften zu verbessern. Die Untersuchung von langwelligen Strahlungsparametrisierungen ist ebenfalls geplant.

In Sinitsyn's Wolkenkategorien wurden nicht alle vorkommenden Wolkengattungen berücksichtigt, da für viele Fälle keine ausreichende Anzahl von Beobachtungen vorhanden war. So können beispielsweise 3/8 bis 8/8 Cirrus ohne tiefe Cumulusbewölkung nicht untergebracht werden. Dadurch kann sein Modell nach Dobson und Smith (1988) nicht für Strahlungsbilanzberechnungen benutzt werden.

Die Berücksichtigung der Sichtbarkeit der Sonne ist ein sehr guter und sinnvoller Ansatz,

jedoch ist diese Beobachtung weder in meteorologischen Standardbeobachtungen noch im VOS-Datensatz enthalten.



# Kapitel 4

## Datenerfassung

Bisherige Parametrisierungen der solaren Einstrahlung basierten entweder auf einem Datensatz von einigen ausgewählten meteorologischen Stationen oder auf den Messergebnissen von Forschungsfahrten. Die Aufzeichnungsdauer der Landstationen beträgt zwar viele Jahre, jedoch sind sie zumeist in den gemäßigten Breiten der Nordhemisphäre lokalisiert. Die Datensätze der Forschungsfahrten umfassen einen relativ kurzen Zeitraum, dafür aber Messdaten entlang der Fahrtroute. Besonders interessant ist hierbei die meridionale Ausdehnung der Forschungsfahrt, da die solare Einstrahlung meridional stark variiert. Demnach sind Datensätze meteorologischer Stationen zur Untersuchung zeitlicher Schwankungen (z.B. saisonale, jährliche und dekadische Variabilitäten) geeignet und Datensätze von Forschungsfahrten für die Erforschung räumlicher Strukturen prädestiniert.

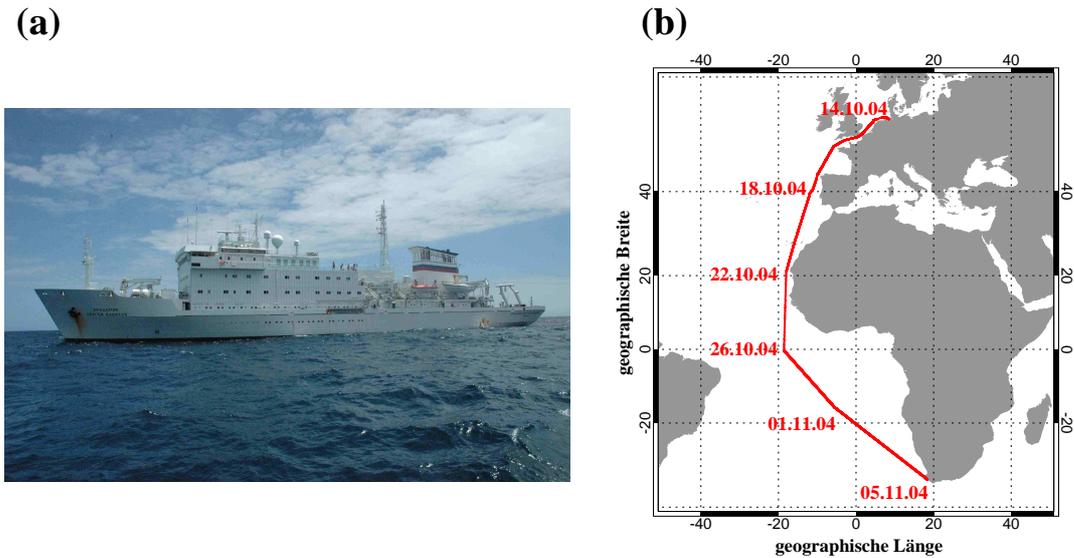
### 4.1 Die Forschungsfahrt

Das Shirshov Institute of Oceanology in Moskau und Prof. Dr. Sergei Gulev ermöglichten die erste Messkampagne des MORE-Projektes an Bord des russischen Forschungsschiffes *Akademik Sergey Vavilov*. Die Messfahrt begann in Bremerhaven/Deutschland am 14.10.04 und endete in Kapstadt/Südafrika am 05.11.04. Die exakte Fahrtroute ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

Es wurde angestrebt einen zusammenhängenden Datensatz zu erstellen. Aufzeichnungslücken in den Daten beziehungsweise nachträglich entfernte Fehlmessungen traten durch defekte Geräte, Wartungsarbeiten oder ungünstige Witterungseinflüsse auf. Hierauf wird im Kapitel 4.3 noch detaillierter eingegangen.

### 4.2 Messungen

Da MORE eine Zusammenarbeit des IfM-GEOMAR und des Shirshov Institute of Oceanology ist, wurden die Messungen untereinander aufgeteilt und die Daten gemeinsam genutzt.



**Abbildung 4.1:** (a) Russisches Forschungsschiff *Akademik Sergey Vavilov* und (b) dessen Fahrtroute von Bremerhaven nach Kapstadt.

An Bord der *Akademik Sergey Vavilov* wurden während des Tages halbstündlich Wolkenfotos aufgenommen (siehe Kapitel 5) und alle drei Stunden eine synoptische Beobachtung durchgeführt. Außerdem wurden folgende Parameter messtechnisch erfasst:

- Globalstrahlung und reflektierte solare Strahlung (Sinitsyn)
- terrestrische Ein- und Ausstrahlung (Sinitsyn)
- Wolkenunterkantenhöhen von bis zu 3 verschiedenen hohen Schichten (Kalisch)
- Strahlungstemperaturen von Atmosphäre und Ozean (Kalisch)
- Regenrate (Kalisch)
- Windgeschwindigkeit (Kalisch)
- Lufttemperatur (Sinitsyn)
- relative Luftfeuchtigkeit (Sinitsyn)
- Schiffsneigung um die Längsachse (Kalisch).

Die Bordanlage hat mit einer zeitlichen Auflösung von einer Sekunde die geographische Länge und Breite, die Geschwindigkeit und die Fahrtrichtung des Forschungsschiffes aufgezeichnet.

## 4.3 Messgeräte

### 4.3.1 Pyranometer und Pyrgeometer

Pyranometer dienen der Messung von solarer Strahlung. Unter der Glaskuppel des Pyranometers befindet sich eine Thermosäule, die eine schwarze, absorbierende Beschichtung trägt. Diese absorbiert solare Strahlung und wandelt sie in Wärme um. Der daraus resultierende Energiefluss wird in der Thermosäule in eine Spannung umgewandelt, die ein Maß für die Intensität der solaren Strahlung ist. Das Pyranometer hat einen Sichtwinkel von  $180^\circ$  und dessen Winkelcharakteristika entsprechen dem Kosinusverhalten.

Pyrgeometer erfassen die terrestrische Strahlung. In Aufbau und Funktionsweise ähneln sie sehr stark den Pyranometern. Das Silikonfenster ist nur für terrestrische Strahlung durchlässig. Obwohl es nicht halbkugelförmig ist, hat es einen Sichtwinkel von  $180^\circ$  und entspricht dem Kosinusverhalten.

Auf der *Vavilov* wurde das Radiometer *CNR 1* von *Kipp & Zonen* eingesetzt. Es besteht



**Abbildung 4.2:** Netto-Radiometer *CNR 1* von *Kipp & Zonen*, Foto nach *Kipp & Zonen* (2002).

aus zwei Pyranometern *CM 3* und zwei Pyrgeometern *CG 3*. Die Pyranometer messen unabhängig voneinander die Globalstrahlung und die reflektierte Strahlung im Wellenlängenbereich von  $0.3$  bis  $3 \mu\text{m}$ , die Pyrgeometer erfassen die atmosphärische Gegenstrahlung sowie die terrestrische Ausstrahlung der Erdoberfläche zwischen  $5$  und  $42 \mu\text{m}$ . Daher ist es möglich die Nettostrahlung im solaren und im terrestrischen Spektralbereich zu bestimmen.

Die erwartete Genauigkeit der Tagessumme des *CNR 1* beträgt nach Herstellerangaben  $\pm 10\%$  (*Kipp & Zonen*, 2002). Eine zusätzliche Fehlerquelle stellt die Schiffsbewegung bei starkem Seegang dar. Die Neigungen des Schiffes um die Längsachse wurden gemessen; jedoch reicht die zeitliche Auflösung der Messungen nicht aus, um die Bewe-

gungen in den folgenden Strahlungsberechnungen zu berücksichtigen. Ein gleichmäßiges Schwanken von Strahlungsmessgeräten um die Horizontallage führt zu einer systematischen Unterschätzung der abwärts gerichteten und zu einer Überschätzung der aufwärts gerichteten solaren Strahlung. Die mit Abstand größten Schiffsbewegungen traten am 17.10.2004 auf. Da an diesem Tag die solaren Einstrahlungen durch Schlechtwetterbewölkung und Gischt meist nur um  $100 \text{ W/m}^2$  betragen, kann der Einfluss der Schiffsbewegung auf die Strahlungsmessungen vernachlässigt werden.

In dem Datensatz der *Vavilov* können die Messwerte für die an der Meeresoberfläche reflektierte solare Strahlung und die terrestrische Ausstrahlung des Wassers nicht genutzt werden, weil das Forschungsschiff zu 40 % den Sichtbereich der nach unten gerichteten Strahlungsmessgeräte einnimmt. Somit müssen diese beiden Komponenten in der weiteren Arbeit für die Nettostrahlungsbilanz approximiert werden (Kapitel 4.5).

### 4.3.2 Ceilometer

Das Ceilometer ermöglicht die aktive Fernerkundung der Atmosphäre in Bezug auf Hydrometeore und Aerosole. Es gehört zu der Gruppe der LIDAR - Geräte (Light Detection And Ranging) und ermöglicht die Bestimmung der Wolkenuntergrenze vom Boden aus. Das Gerät sendet einen Laserstrahl mit 5000 Pulsen pro Sekunde aus. Vor allem an Hydrometeoren wird der Strahl gestreut. Der zurückgestreute Anteil des Strahls wird empfangen und aus der Laufzeit zwischen Aussenden und Empfangen die Höhe des Streuprozesses bestimmt. Die Intensität des Rückstreusignals lässt Aussagen über den Flüssigwassergehalt zu.

Das auf der *Vavilov* verwendete Ceilometer CT25K von *Vaisala* hat bei klaren atmosphä-



Abbildung 4.3: Ceilometer CT25K von Vaisala, Foto nach Vaisala (2005).

rischen Bedingungen eine Reichweite von 25000 ft (7.5 km). Bei bewölkter Atmosphäre ist die Reichweite des Lasers durch die Auslöschung des Signals in der Wolke bedingt; sind die vertikale Ausdehnung und die Tröpfchenanzahl der Wolken gering, können trotzdem Eindringtiefen bis zu 2 km bzw. bis zu 3 verschiedene Wolkenunterkantenhöhen beobachtet werden. Bei Nebel oder Niederschlag ist die Streuung des Lasers so stark, dass selbst tiefe Wolken nicht mehr erkannt werden und das Ceilometer bodennahe Rückstreusignale empfängt. Cirren können aufgrund ihrer Höhe meist nicht erfasst werden. Die zeitlichen Auflösung des CT25K beträgt 15 Sekunden.

Das Schwanken des Schiffes führt zu einer Überschätzung der Rückstreuhöhe, da das Gerät dann nicht mehr senkrecht misst. Im Nordatlantik wurden bei schwerer See maximale Schiffsneigungen von  $\pm 15^\circ$  gemessen, was einen maximalen Fehler von bis zu 3.5 % ergibt. Da Ceilometer und Neigungsmesser nicht absolut zeitsynchron waren und die zeitliche Auflösung des Ceilometers größer als die Periode der Schiffsschwankungen ist, kann dieser Fehler nicht korrigiert werden. Aber es kann davon ausgegangen werden, dass der reale Fehler bedeutend geringer als 3.5 % ist.

### 4.3.3 Strahlungsthermometer KT 4 und KT 19

Strahlungsthermometer werden auch als Pyrometer bezeichnet und dienen der berührungslosen Strahlungstemperaturmessung. Die Messung basiert auf dem Stefan-Boltzmann-Gesetz:

$$M(T) = \sigma T^4 \quad (4.1)$$

Danach ist die emittierte Strahlungsenergie eines schwarzen Körpers nur von der Temperatur  $T$  abhängig,  $\sigma$  bezeichnet die Stefan-Boltzmann-Konstante. Pyrometer erfassen diese Strahlungsenergie und werten sie aus. Durch einen eingebauten Filter messen die Geräte jedoch nur einen bestimmten Wellenlängenbereich der emittierten Strahlung. Um die genaue Temperatur eines realen Körpers zu bestimmen, muss aber noch die Emissivität des Körpers bei genau dieser Wellenlänge bekannt sein.

Ein Quotientenpyrometer misst das Verhältnis der Intensitäten bei zwei verschiedenen Wellenlängen. Durch die Verhältnisbildung spielt hier der Emissionkoeffizient keine Rolle, wenn er in dem gemessenen Wellenlängenintervall konstant ist.

Die Geräte *KT4* und *KT19*, die auf der *Vavilov* verwendet wurden, sind solche Quotientenpyrometer. Das *KT4* war in einem Winkel von  $45^\circ$  auf die Meeresoberfläche gerichtet und hat deren Skin-Temperatur gemessen. Die Skin-Temperatur ist diejenige der obersten, etwa 0.5 mm dünnen ausstrahlungsrelevanten Schicht. Sie ist nicht äquivalent zur SST, die auf Schiffen gewöhnlich mit Pützthermometer oder von der Bordanlage im angesaugten Kühlwasser gemessen wird. Ohnehin sind Temperaturdaten der Bordanlagen nach Kent et al. (1993) von zweifelhafter Qualität.

Das *KT19* war senkrecht nach oben gerichtet und hat die Strahlungstemperatur der Atmosphäre bzw. der Wolkenunterkanten gemessen. Laut Hersteller haben diese Geräte eine Messwertauflösung von 10 mK und eine Genauigkeit von  $\pm 0.5$  K (Heitronics, 2005).



Abbildung 4.4: Strahlungspyrometer KT19 von Heitronics, Foto nach Heitronics (2005).

#### 4.3.4 Disdrometer und Anemometer

Das Disdrometer ermöglicht die optische Niederschlagsmessung nach dem Prinzip der Extinktion von Infrarotstrahlung durch Regentropfen. Es wurde am Institut für Meereskunde der Universität Kiel (heute IFM-GEOMAR) entwickelt und wird heute von der Firma *Eigenbrodt* hergestellt.

Gemessen werden die Tropfenanzahl und die Tropfengrößenverteilung. Das Messvolu-



Abbildung 4.5: Disdrometer an Bord der *Vavilov*.

men ist ein durch eine Infrarotdiode homogen ausgeleuchteter zylindrischer Raum mit einer Länge von 120 mm und einem Durchmesser von 21 mm. Die Messeinheit ist drehbar gelagert und wird durch eine Windfahne rechtwinklig zur Windrichtung gehalten. Die Windgeschwindigkeit wird von einem Schalenkreuzanemometer in unmittelbarer Nähe des Disdrometers gemessen.

Ein durch das Messvolumen fallender Tropfen erzeugt einen Spannungsabfall am Photoempfänger, der sich proportional zur Querschnittsfläche des Tropfens und des Messvolumens verhält. Bei der Berechnung der Regenrate muss die Windgeschwindigkeit berücksichtigt werden, weil sich bei zunehmendem Wind dementsprechend die Tropfenanzahl pro Zeiteinheit im Messvolumen erhöht. Ausführliche Beschreibungen des Disdrometers und der Datenauswertung finden sich in Großklaus et al. (1998) und Clemens (2002).

#### 4.3.5 Turbulenzmessung: Lufttemperatur und Luftfeuchte

An der rechten Bordwand der *Vavilov* war an einem Ausleger ein System zur Bestimmung der turbulenten Flüsse von Wärme und Feuchtigkeit angebracht. Hierzu waren 3 Temperatur- und Feuchtigkeitssensoren im vertikalen Abstand von 1,5 m installiert. Aus den vertikalen Gradienten der Temperatur und Luftfeuchtigkeit lassen sich die entsprechenden Flüsse berechnen.

Genauer soll an dieser Stelle nicht auf die Bestimmung der turbulenten Flüsse eingegangen werden, da in dieser Arbeit lediglich die gemittelten Messwerte für Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit verwendet werden (Kapitel 6.2).

#### 4.3.6 Wolkenkamera

Die Wolkenkamera ist die analoge Spiegelreflexkamera *Nikon F-801s* mit einem Fisheye - Objektiv, das eine Brennweite von 8 mm und einen Blickwinkel von 180 ° besitzt. Somit lässt sich der gesamte Halbraum des Himmels aufnehmen.

Die Wolkenfotos wurden halbstündlich auf dem oberen Arbeitsdeck der *Vavilov* auf-



**Abbildung 4.6:** Aufnahme eines Wolkenfotos am Rande der Antarktis während der zweiten MORE-Forschungsfahrt im November 2005.

genommen. Hierbei wurde auf die Verwendung eines Statives oder eine anderweitige Befestigung der Kamera an Deck verzichtet, da die Schiffsbewegung am besten bei Aufnahmen „per Hand“ ausgeglichen werden kann. Der Standort am Arbeitsdeck und die Ausrichtung der Kamera zur Fahrtrichtung wurden weitestgehend konstant gehalten.

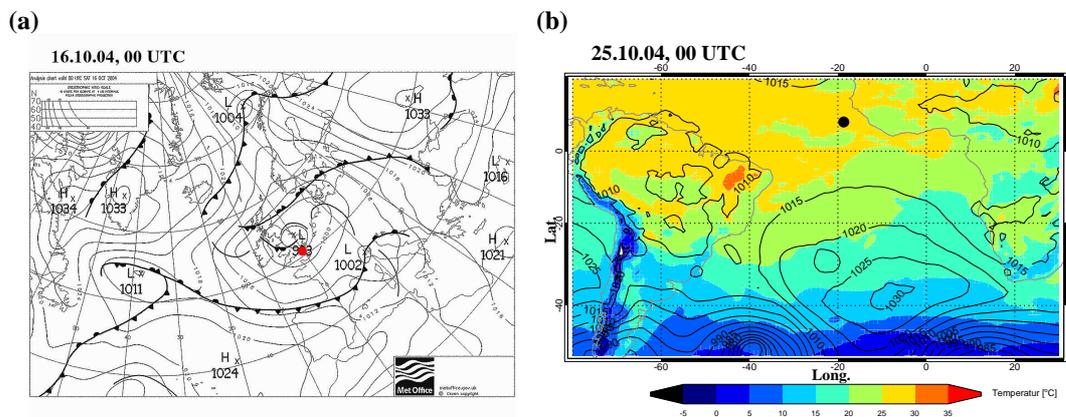
Bei Windgeschwindigkeiten von mehr als 10 Bft sowie bei Niederschlag wurden keine Aufnahmen des Wolkenhimmels gemacht.

Die auf dem Dach des IFM-GEOMAR beziehungsweise in Westerland auf Sylt benutzte digitale Wolkenkamera mit 4 Wolkenfotos pro Minute ist für den Einsatz auf Forschungsschiffen nicht geeignet, weil eine Abschattung des Objektivs per Schattenring zur Vermeidung von direktem Sonnenlicht hier durch die Schiffsbewegung nicht möglich ist. Direkter Lichteinfall würde zu großen Fehlern führen oder auch den CCD-Chip beschädigen. Schade (2005) hat in seiner Arbeit die digitale Wolkenkamera ausführlich beschrieben und deren Bilder weiterverarbeitet.

#### 4.4 Synoptik und Großwetterlage

Die Großwetterlage kann anhand von amtlichen Wetterkarten und synoptischen Standardbeobachtungen beschrieben werden. Für den Bereich des Atlantik nördlich von etwa 20°N sind qualitativ gute amtliche Wetterkarten verfügbar. Für die Südhemisphäre existieren nur regionale Wetterkarten (z.B. für Südafrika). Daher wurden für das Gebiet von 20°N bis 60°S und von 30°O bis 80°W Analysedaten des ECMWF herangezogen und graphisch dargestellt.

In Abbildung 4.7 sind die jeweiligen Karten gezeigt. Der rote Punkt in (a) bzw. der



**Abbildung 4.7:** (a) Wetterkarte der UK Met Office (Wetterzentrale, 2005) für den Nordatlantik, (b) Bodentemperaturfeld und Bodenluftdruck nach Analysedaten des ECMWF für den Südatlantik.

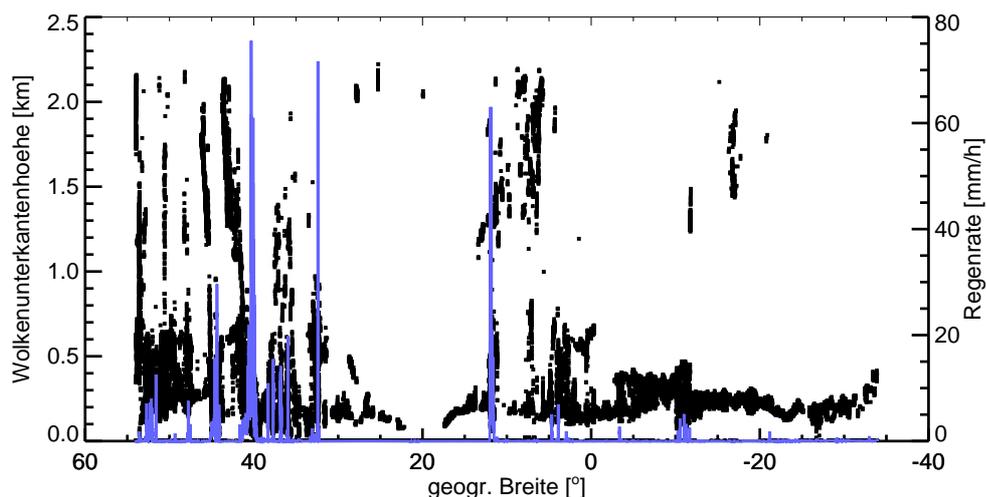
schwarze Punkt in (b) zeigen die Position des Forschungsschiffes zum entsprechenden Zeitpunkt.

Synoptische Standardbeobachtungen wurden während der gesamten Forschungsfahrt während der Tageszeit durchgeführt. Abhängig von Sonnenauf- und Sonnenuntergangszeiten wurden die Beobachtungen zu 6, 9, 12, 15 und 18 Uhr UTC gemacht. Besonderes Interesse galt den strahlungsbeeinflussenden Wettererscheinungen (Wolken). Die von mir durchgeführten Beobachtungen umfassten folgende Parameter:

- Wetterlage zum Zeitpunkt der Beobachtung bzw. während der letzten Stunde
- Wetterverlauf während der vorangegangenen 3 Stunden
- Sicht
- Wolkenunterkantenhöhe der tiefsten Wolken
- Gesamtbedeckung des Himmels
- Bedeckungsgrad der tiefen Wolken, oder falls keine vorhanden, aller mittelhohen Wolken
- Wolkengattung der tiefen, mittleren und hohen Wolken
- besondere Wettererscheinungen, wie z. B. Halos und Kondensstreifen.

Die Bilder der Wolkenkamera helfen bei der nachträglichen Analyse. Sie sind halbstündlich aufgenommen, dadurch lassen sich Änderungen der Wetterlage zeitlich genauer einordnen, als dies durch die synoptischen Beobachtungen möglich ist. Auf die Berechnung des Bedeckungsgrades anhand von Wolkenfotos wird noch ausführlich in Kapitel 5 eingegangen.

Aus den Daten der Messgeräte lassen sich die synoptischen Ereignisse noch genauer rekonstruieren und verifizieren. Die Abbildung 4.8 zeigt die Wolkenunterkantenhöhe (schwarz) der tiefsten Wolkenschicht und die Regenrate (blau) jeweils auf 5 Minuten gemittelt für die gesamte Fahrt vom 14.10.04 bis 05.11.04.



**Abbildung 4.8:** Wolkenunterkantenhöhe (schwarz) und Regenrate (blau) für die gesamte Fahrt von Bremerhaven nach Kapstadt.

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass das Ceilometer Rückstreusignale aus bis zu 7.5 km Höhe empfangen kann und Cirrusformationen meist erst in größeren Höhen vorzufinden sind. Im 5-Minuten-Mittel zeigt die Abbildung Wolkenunterkantenhöhen der tiefsten Wolken von maximal 2.3 km. Höhere Rückstreusignale wurden oft empfangen, gehörten aber entweder nicht zu der tiefsten Wolkenschicht, oder sie sind durch die Mittelung nicht ersichtlich.

Während eines Niederschlagsereignisses liefert die gemessene Wolkenunterkantenhöhe kein sinnvolles Ergebnis, da durch die Regentropfen Rückstreuungen bis zum Bodenniveau stattfinden.

Gischt durch schwere See verfälscht die Regenrate etwas. Dies war vor allem zwischen 50°N bis 40°N der Fall. Wie groß dieser Fehler ist, kann nicht bestimmt werden, denn bei schwerer See kann oft nicht einmal durch synoptische Beobachtungen geklärt werden, ob es sich um Niederschlag oder Gischt handelt.

Datum	Wetterlage
14.10.04	Durchzug einer schwachen Okklusion (nicht wetterwirksam), aufgelockerte Cumulusbewölkung, trocken
15.10.04	vormittags Einfluß okkludierender Luftmassen mit leichtem Regen, Stratocumulus, nachmittags Rückseitenwetterlage mit Cumulus; steifer Wind und Gischt
16.10.04	Rückseitenwetterlage mit Schauern und Cumulus, starker Wind
17.10.04	Durchzug einer Warmfront mit Regen und Schlechtwetter-Stratus
18.10.04	nahe dem Zentrum eines Tiefs, Stratus, leichter Regen, Sturm und Gischt
19.10.04	Kaltfront mit Schauern, später Rückseitenwetterlage, Cumulus, steife Brise und Gischt
20.10.04	abnehmende Cumulusbewölkung, abends wolkenlos
21.10.04	Subtropenhoch mit dünnen Stratuswolken in allen Schichten, 22°-Halo

**Tabelle 4.1:** Wetterlage während der Forschungsfahrt. Wetterkarten der UK Met Office (Wetterzentrale, 2005) im Anhang in Abbildungen B.1 und B.2.

In Tabelle 4.1 sind die Wetterlagen für den 14.10.04 bis 21.10.04 kurz aufgeführt; die zugehörigen Wetterkarten der UK Met Office finden sich im Anhang in den Abbildungen B.1 und B.2.

Tabelle 4.2 beschreibt die Wetterlage vom 22.10.04 bis 04.11.04; die zugehörigen Wetterkarten aus Analysedaten des ECMWF mit dem Bodendruck und dem Temperaturfeld

Datum	Wetterlage
22.10.04	Subtropenhoch, dunstig und hohe durchsichtige stratiforme Bewölkung
23.10.04	subtropisch, wenig Stratocumulus, klar
24.10.04	tropisch, morgens starkes Gewitter, Cumulonimbus, nachmittags wenig dünne Altostratus- und Cirrusbewölkung
25.10.04	tropisch mit Schauern am Nachmittag, Cumulus, Altocumulus, Cirrus
26.10.04	tropisch, teils klar, teils Altocumulus, Äquatorüberquerung
27.10.04	tropisch, vormittags klar, Schauer am Mittag, nachmittags Stratocumulus
28.10.04	tropisch, aber kühl und windig, ganztägig aufgelockerte Cumulusbewölkung
29.10.04	subtropisch, Schauer, Cumulus und Stratocumulus
30.10.04	subtropisch, diesig, Stratocumulus
31.10.04	subtropisch, diesig, Stratocumulus
01.11.04	Subtropenhoch, teils wolkenlos, teils dünne Stratocumulus
02.11.04	Subtropenhoch, vormittags dünne Stratocumulus, nachmittags fast wolkenlos
03.11.04	Subtropenhoch, vormittags dünne Stratocumulus, nachmittags fast wolkenlos
04.11.04	Subtropenhoch, viele dünne Cirren

**Tabelle 4.2:** Wetterlage während der Forschungsfahrt, Karten aus Analysedaten des ECMWF im Anhang, Abbildungen B.3, B.4 und B.5.

sind im Anhang in den Abbildungen B.3, B.4 und B.5.

## 4.5 Strahlungsbilanz

Die Erde nimmt Strahlung von der Sonne auf. Ein Teil dessen wird vor allem von Wolken reflektiert, der Rest wird in der Atmosphäre und auf der Erdoberfläche absorbiert. Der Strahlungsverlust erfolgt durch langwellige Ausstrahlung. Die Differenz aus beiden Energieflüssen ist die Strahlungsbilanz.

In diesem Kapitel soll auf die Bilanzierung der Strahlungsflüsse an der Meeresoberfläche eingegangen werden. Beeinflussende Faktoren sind hier die einfallende solare Globalstrahlung  $G$ , bestehend aus direkter und diffuser Strahlung, die reflektierte solare Strahlung  $R$ , die atmosphärische Gegenstrahlung  $A$  sowie die langwellige Ausstrahlung der

Erdoberfläche  $E$ .

Nach DWD (1987) ergibt sich mit der Albedo  $\rho_s$  für die kurzwellige Strahlungsbilanz  $G_a$ :

$$G_a = G - R = G(1 - \rho_s) . \quad (4.2)$$

Mit dem Stefan-Boltzmann-Gesetz  $E(T) = \epsilon\sigma T^4$  folgt für die langwellige Strahlungsbilanz (effektive Ausstrahlung):

$$-Q_{LW} = -(E - A) = -(\epsilon\sigma T^4 - A) . \quad (4.3)$$

Der Absorptionskoeffizient  $\epsilon$  der langwelligen Strahlung beträgt für die Meeresoberfläche  $\epsilon=1$ . Somit gilt für die Strahlungsbilanz der Meeresoberfläche:

$$Q = G(1 - \rho_s) - (\sigma T^4 - A) . \quad (4.4)$$

Wenn die Strahlungsbilanz positiv ist, nimmt die Meeresoberfläche Strahlungsenergie auf, wenn sie negativ ist, gibt sie Energie ab. Ohne die Berücksichtigung von latenter Wärme und Advektion von Wärme käme es demnach zu einer Erwärmung bzw. Abkühlung bis wieder ein Gleichgewicht zwischen Strahlungsgewinn und Ausstrahlungsverlust besteht. Auf der *Vavilov* wurden die Globalstrahlung  $G$  durch das Pyranometer, die atmosphärische Gegenstrahlung  $A$  durch das Pyrgeometer und die Skin-Temperatur  $T$  der Meeresoberfläche durch das Strahlungsthermometer *KT 4* gemessen.

Die Albedo der Meeresoberfläche ist das Verhältnis aus aufwärtsgerichteter Irradianz und Globalstrahlung. Die aufwärtsgerichtete Strahlung ist die Summe aus der direkt an der Wasseroberfläche reflektierten und der durch Rückstreuung im Wasser aus der Oberfläche wieder austretenden Strahlung.

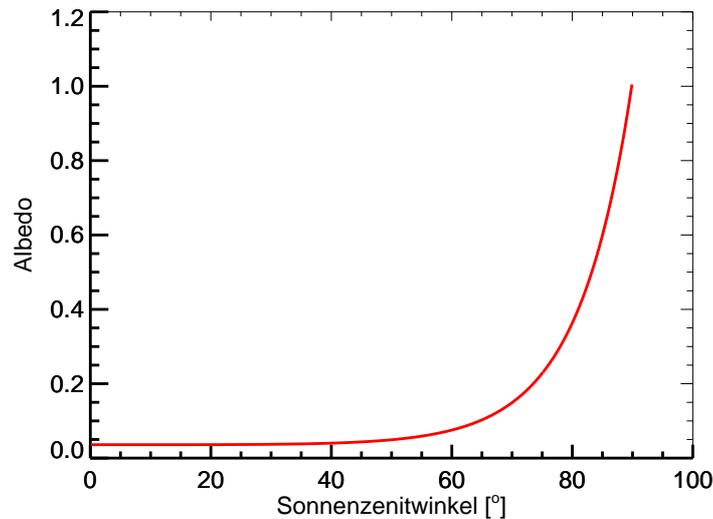
Die direkte Reflexion  $R$  unpolarisierten Lichtes einer glatten Wasseroberfläche folgt dem Fresnelschen Gesetz (Dera, 1992):

$$R = \frac{1}{2} \left( \frac{\sin^2(\theta - \xi)}{\sin^2(\theta + \xi)} + \frac{\tan^2(\theta - \xi)}{\tan^2(\theta + \xi)} \right) . \quad (4.5)$$

Hierbei sind  $\theta$  der Sonnenzenitwinkel und  $\xi$  der nach dem Snelliusschen Brechungsgesetz berechnete Brechungswinkel. Der Anteil der Albedo, der durch Rückstreuung im Wasser verursacht wird, hängt nach Eucken (1952) von der Wassertrübung und dem Spektralbereich ab und beträgt 1 bis etwa 5%, wobei 1.56% einen gebräuchlichen Mittelwert darstellt. Somit folgt für die Albedo  $\rho$  der direkten kurzwelligen Strahlung bei glatter Meeresoberfläche:

$$\rho = \frac{1}{2} \left( \frac{\sin^2(\theta - \xi)}{\sin^2(\theta + \xi)} + \frac{\tan^2(\theta - \xi)}{\tan^2(\theta + \xi)} \right) + 0.0156 . \quad (4.6)$$

In Abbildung 4.9 ist die Albedo in Abhängigkeit des Sonnenzenitwinkels dargestellt. Bis etwa  $\theta = 50^\circ$  ist die Albedo fast konstant und liegt unterhalb von  $\rho = 0.05$ . Erst bei



**Abbildung 4.9:** Albedo der glatten Meeresoberfläche für direkte kurzwellige Strahlung.

größeren Einfallswinkeln des Lichts nimmt die Albedo zu und konvergiert gegen  $\rho = 1$ . Dies entspricht auch der täglichen Beobachtung: Während man mittags vom Steg aus gut in das Wasser schauen kann, spiegelt sich die Sonne bei ihrem Untergang auf der ruhigen Meeresoberfläche und blendet den Beobachter.

In der folgenden Strahlungsbilanzberechnung der MORE-Fahrt wird diese Berechnungsgrundlage nicht verwendet, denn durch Wind und Wellen wird die Meeresoberfläche aufgeraut und die Albedo der kurzwelligen Strahlung durch die damit zunehmenden Mehrfachreflexionen vergrößert. Außerdem gilt obige Gleichung nicht für die Albedo diffuser Strahlung. Das Verhältnis aus direkter und diffuser Strahlung hängt vor allem vom Bedeckungsgrad, der Wolkengattung und der optischen Dicke der Wolken ab. Quantitativ bestimmen lassen sich die Anteile nur durch die zusätzliche Messung von mindestens einem der beiden Terme.

Aus diesen Gründen wird hier die konstante Albedo  $\rho_s = 0.06$  für die Globalstrahlung benutzt. Dieser Wert stellt eine gute Näherung für die Reflexion und die Rückstreuung durch die reale Meeresoberfläche dar. Bei Sonnenzenitwinkeln von über  $65^\circ$  ist zwar der relative Fehler von Näherung und realer Albedo hoch, jedoch ist dann durch die geringe absolute solare Einstrahlung der Einfluss auf die Tagessumme gering. Die Fehler durch die Ungenauigkeit des Meßgerätes (Kapitel 4.3.1) sowie durch die Schiffsbewegung (Kapitel 4.3.2) haben einen weitaus größeren Einfluss auf die Messung.

In Abbildung 4.10 ist die gesamte Strahlungsbilanz  $Q$  mit ihren Komponenten für die atmosphärische Gegenstrahlung  $A$ , die kurzwellige Strahlungsbilanz  $G_a$  und die langwellige Ausstrahlung  $E$  dargestellt. Gezeigt werden die jeweiligen Tagessummen für den Zeitraum vom 17.10.04 bis zum 04.11.04. Zuvor ist der Datensatz für die Strahlungsmes-

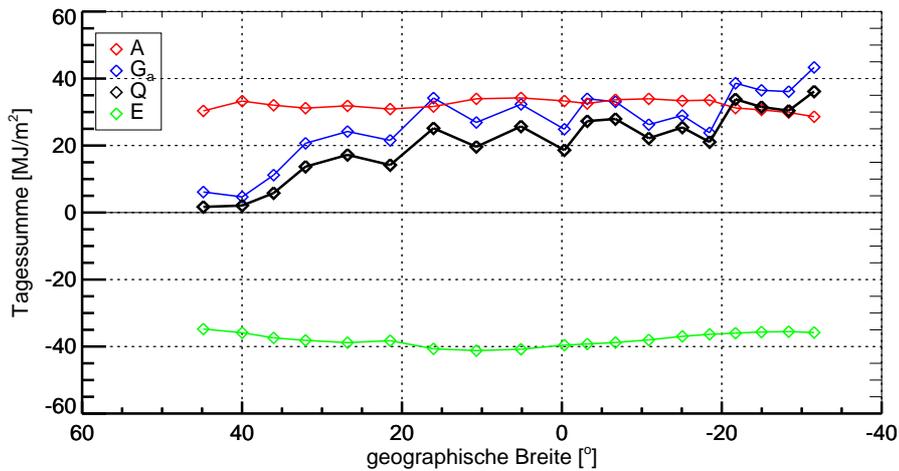


Abbildung 4.10: Bilanz (schwarz) der kurzwelligen und langwelligen Strahlung.

sungen fehlerhaft und wurde nicht benutzt.

Es ist erkennbar, dass die atmosphärische Gegenstrahlung an Tagen mit starker Bewölkung, wie etwa am 18.10.04 bei 40°N oder in Äquatornähe, größer ist als an wolkenfreien Tagen des subtropischen Hochdruckgürtels. Die kurzwellige Nettoeinstrahlung erreicht ihr Maximum in den Subtropen der Südhemisphäre. Dort waren nur geringfügig dünne Wolken vertreten. Die Kurve der Tagessummen der langwelligen Ausstrahlung gibt den Verlauf der Skin-Temperatur der Meeresoberfläche wieder. In den nördlichen mittleren Breiten ist der kalte Kanarenstrom dominant und es erfolgte durch Herbststürme eine Durchmischung der im Sommer erwärmten Deckschicht des Atlantik. Die Wassertemperatur und damit die Ausstrahlung erreichen bei 10°N ihr Maximum und fallen nach Süden deutlich ab, weil der Südsommer hier erst beginnt und der kalte Zirkumpolarstrom den Südatlantik beeinflusst.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Strahlungsbilanz während der gesamten Fahrt positiv ist, wobei die Tagessummen der Strahlung in den ersten Tagen noch sehr nah bei Null liegen. In den Subtropen und Tropen liegen die Tagessummen bei über 15 MJ/m<sup>2</sup>. Das Maximum findet sich bedingt durch relativ klare Wetterlagen und lange Tage in den Subtropen der Südhemisphäre.

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass turbulenter Wärmefluss und Advektion von Wärme in Ozean (Meeresströmungen) und Atmosphäre (allgemeine Zirkulation) nicht in der Bilanzierung eingehen. Ohne die Berücksichtigung dieser Faktoren lassen sich keine Aussagen über die Änderung der Meeresoberflächentemperatur treffen.

## Kapitel 5

# Wolkenfotos und Bedeckungsgradberechnung

Natürlich ist es nicht zwingend notwendig per Hand fotografierte Aufnahmen vom bewölkten Himmel mittels Computer auszuwerten, um den Bedeckungsgrad zu berechnen. Ebenso gut hätte der Wolkenfotograf anstelle des Fotos eine synoptische Beobachtung durchführen können. Das wäre sogar ein geringerer Aufwand gewesen, zeitlich wie finanziell. Wieso ist dieses Kapitel dann Teil der Arbeit?

Die elektronische Verarbeitung von Wolkenfotos bzw. Videos des Himmels befindet sich noch in ihrer Entwicklung und besitzt noch viele Schwachstellen. Spezielle Wolkenkameras sind (noch) teuer und längst nicht ausgereift. So ist beispielsweise die digitale Wolkenkamera des IfM-GEOMAR, die in der Arbeit von Schade (2005) verwendet wurde, nicht dafür konstruiert in die direkte Sonne zu schauen. Aus diesem Grund kann sie nicht auf Schiffen eingesetzt werden. Trotzdem aber soll diese Arbeit den Gedanken der automatisierten digitalen Bildanalyse weiterverfolgen und eine Grundlage für spätere Studien mit weitaus größeren Datenmengen bilden.

Des Weiteren dokumentieren die Bilder der Wolkenkamera den tatsächlichen visuellen Zustand des Wolkenhimmels und ermöglichen eine Wetteranalyse zu einem späteren Zeitpunkt.

### 5.1 Bildverarbeitung

Die 475 von mir aufgenommenen Wolkenfotos lagen nach der MORE-Forschungsfahrt als Kleinbild-Positive vor. Um sie elektronisch auswerten zu können, mussten sie digitalisiert werden. Dazu wurden sie gescannt und ergaben im unkomprimierten TIFF-Format jeweils 11.0 MB. Die Abbildung 5.1 zeigt ein Wolkenfoto einer besonders klaren Wetterlage. Im Anhang A sind alle Wolkenfotos gezeigt.

Jedes Foto besteht aus  $2402 \times 1598$  Pixeln. Damit liegt im Vergleich zur digitalen Wolkenkamera des IfM-GEOMAR eine fast 5-mal höhere Auflösung vor. Ein Pixel ist ein Farbtuplet mit den Farben rot, grün und blau, die im folgenden als *RGB* bezeichnet werden. Die Farben haben eine Farbtiefe von 8 Bit, also  $2^8 = 256$  Abstufungen (von 0 bis



**Abbildung 5.1:** *Wolkenfoto bei sehr klarer Wetterlage und Cumulusbewölkung vom 16.10.04, 10.30 UTC.*

255).

Die Verarbeitung der Wolkenfotos und die Berechnung des Bedeckungsgrades wurde mit Hilfe eines Programmes in IDL durchgeführt, das zusätzlich zu jedem Foto ein analysiertes Bild erzeugte, in dem die als solche erkannten Wolkenpixel weiss und die Pixel des unbewölkten Himmels blau definiert wurden.

Für die Analyse des Bedeckungsgrades sind lediglich die Pixel der kreisrunden Himmelsaufnahmen von Bedeutung, der Rand soll nicht verarbeitet werden. Wie man sehen kann, ist der Himmel nicht bildmittig angeordnet, und die Position kann von Bild zu Bild sehr stark variieren; mitunter sind Ränder „abgeschnitten“. Obwohl die Bilder von einem professionellen Fotofachgeschäft gescannt wurden, ließ sich dieses Problem nicht vermeiden. Von daher konnten zur Analyse der Fotos keinerlei Masken über die Bilder gelegt werden, wie es bei Schade (2005) der Fall war.

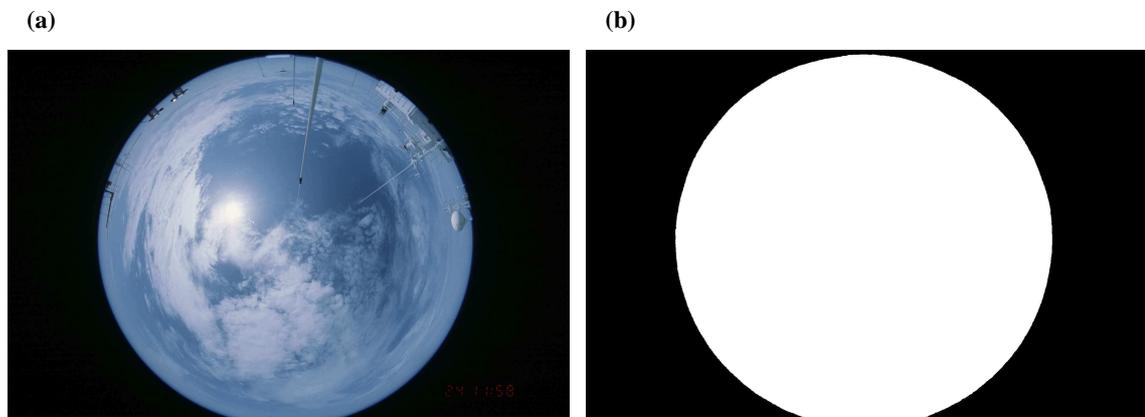
Statt dessen wurden die einzelnen Pixel auf ihre Helligkeit untersucht: Ist die Summe der RGB-Werte geringer als eine festgelegte Helligkeitsschwelle, werden sie als Rand eingestuft, liegen sie darüber, so gehören sie zum Himmelsbild. Das einbelichtete Datum rechts unten im Bild muss ebenso als rotes Datum erkannt und von der Bildanalyse ausgeschlossen werden. Dies geschieht über die Farbzusammensetzung des Datums: Der Rotanteil der Datumpixel ist hoch, während die Grün- und Blauwerte sehr niedrig sind. Die Untersuchung der Datumpixel hat gezeigt, dass für ihre Farbzusammensetzung

$$R > 80, \quad G \leq 20, \quad B \leq 7 \quad (5.1)$$

gilt. Um nun eine exakte Helligkeitsschwelle für die Pixel, die weder zum schwarzen Rand noch zum Datum gehören, zu finden, musste zuerst an einem Testbild die Pixelanzahl des Himmelsbildes bestimmt werden. Es wurde ein repräsentatives Wolkenfoto

ausgewählt und in einem Bildbearbeitungsprogramm das kreisrunde Himmelsbild per Hand pixelgenau weiß nachgezeichnet.

Abbildung 5.2 zeigt in (a) das unbearbeitete Originalfoto vom 24.10.04, 12.00 UTC und



**Abbildung 5.2:** (a) zeigt das Originalfoto, (b) das nachbearbeitete schwarz-weiße Bild zur exakten Bestimmung der Pixelanzahl von Rand und rundem Himmelsbild.

in (b) das nachbearbeitete. Die Anzahl der weißen Himmelspixel in (b) beträgt 2.023.302 und die der schwarzen Randpixel (einschliesslich Datum) 1.815.094. Anhand dessen konnte die Helligkeitsschwelle an das Originalfoto angepasst werden, sodass die geringsten Abweichungen auftreten. Die optimale Pixelanzahl für das Himmelsbild liefert die Bedingung:

$$R + G + B > 80 \quad . \quad (5.2)$$

Somit erhält man für das Foto aus Abbildung 5.2 (a) für das Himmelsbild 2.023.868 und für Rand und Datum 1.814.528 Pixel. Bedingung 5.2 gilt nur für das verwendete Nikon - Objektiv; Objektive anderer Hersteller haben unterschiedliche Abbildungs- und Streulichteigenschaften.

## 5.2 Bedeckungsgrad

Auch in Zukunft wird es nie eine absolut genaue Bedeckungsgradberechnung geben. Das hat weniger technische Ursachen, als vielmehr mit der Definition einer Wolke und deren subjektive Beobachtung und Bewertung durch den Menschen zu tun. Wann ist zum Beispiel Dunst kein Dunst mehr, sondern ein Stratus nebulosus? Selbst erfahrene Synoptiker divergieren in ihrer Einschätzung des Bedeckungsgrades oft um 1/8; dünne Wolken, besonders Cirren führen gewöhnlich zu den größten Unstimmigkeiten unter den Beobachtern. Daher soll es nicht das Ziel sein die Bedeckungsgradberechnung in unsinnige Genauigkeiten zu treiben, sondern Situationen „schwieriger“ Wolkenbedeckungen oder direkter Sonneneinstrahlung richtig zu erkennen.

Wie im vorhergehenden Kapitel dargestellt, kann das kreisrunde Himmelsbild mit hoher Genauigkeit als solches erkannt werden. Die Erkennung von Wolken wurde nach Long und DeLuisi (1998) und Long et al. (2001) durchgeführt. Hier werden die RGB-Werte jedes Pixels  $i$ , das nicht zum Rand oder Datum gehört, bezüglich R und B analysiert. Das Verhältnis  $V_i$  der beiden Farben gibt darüber Auskunft, ob  $i$  Teil einer Wolke oder des klaren Himmels ist. Es gilt:

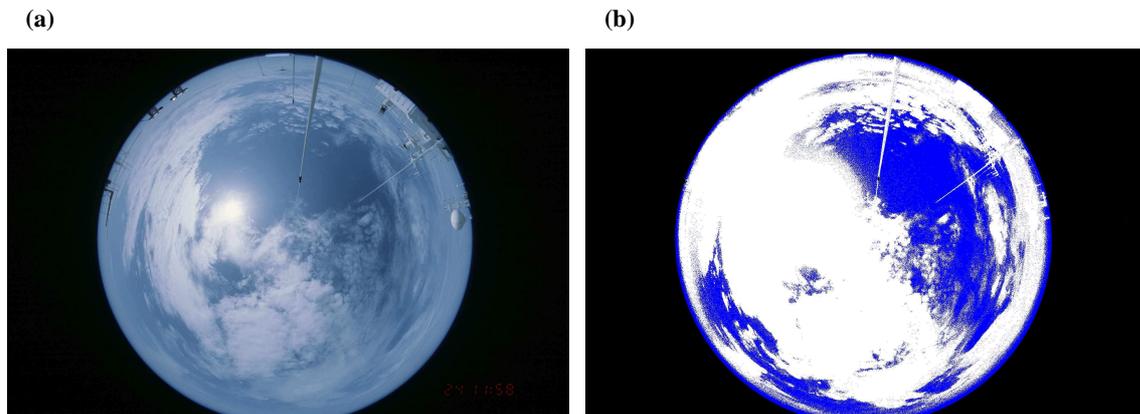
$$V_i = \frac{R_i}{B_i} . \quad (5.3)$$

Der Farbschwellenwert  $S$  definiert die Grenze zwischen „bewölkt“ und „unbewölkt“. Ist  $V_i > S$ , so ist das Pixel  $i$  Teil einer Wolke, ist  $V_i \leq S$ , so liegt ein Pixel des unbewölkten Himmels vor. Der optimale Farbschwellenwert wurde in dieser Arbeit durch die Analyse von 10 Wolkenfotos mit unterschiedlicher Bewölkung bestimmt und beträgt  $S = 0.55$ . Der Bedeckungsgrad  $N$  ergibt sich dann aus der Anzahl der Wolkenpixel  $n_W$  und der gesamten Anzahl der Himmelsbildpixel  $n_H$  zu:

$$N = \frac{n_W}{n_H} , \text{ mit } N = [0, 1] . \quad (5.4)$$

Auf die im Prinzip notwendige Kosinus-Wichtung wird verzichtet, da hiermit Wolkenseiten zu einer stärkeren Überschätzung des Bedeckungsgrades führen (Schade, 2005).

Im Folgenden wurden nach der Berechnung des Bedeckungsgrades die als solche er-



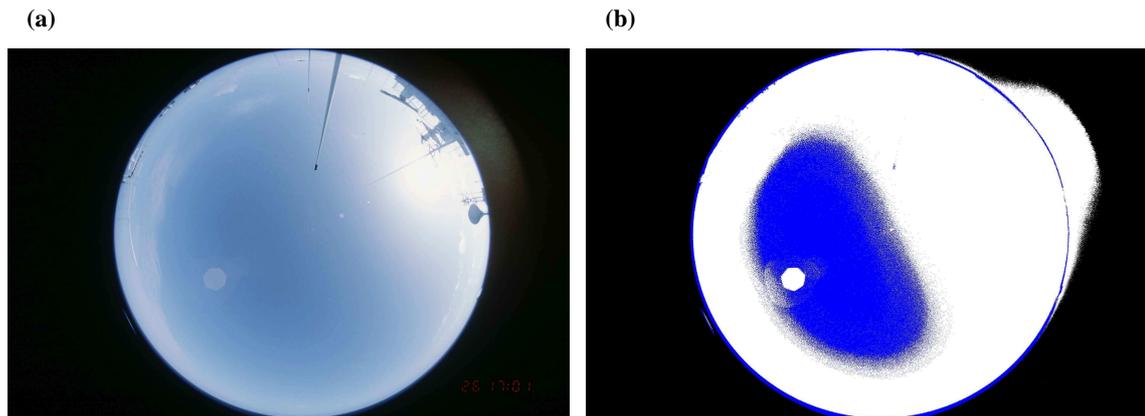
**Abbildung 5.3:** (a) zeigt ein Originalfoto, (b) zeigt die Wolkenverteilung nach der Bedeckungsgradberechnung.

kannten Rand- und Datumspixel schwarz, die Wolkenpixel weiß und die „unbewölkten“ Pixel blau eingefärbt. Das Ergebnis zeigt Abbildung 5.3. Die Berechnung ergibt einen Bedeckungsgrad von  $N = 0.71$ , der auch der synoptischen Beobachtung entspricht.

### 5.3 Fehlerquellen und Grenzen

Das in Kapitel 5.1 vorgestellte Verfahren, den schwarzen Rand anhand der Summe der RGB-Werte zu erkennen, liefert im Allgemeinen sehr gute Ergebnisse. Bei allen Fotos ist es nur einmal vorgekommen, dass eine besonders dunkle Wolke (Cumulonimbus eines heranziehenden Gewitters) zum Teil als Rand eingestuft wurde.

Ein typisches Problem bei Weitwinkelaufnahmen ist direktes Licht, das im Objektiv zu



**Abbildung 5.4:** Fehlinterpertation durch Reflexe im Objektiv (Achteck und Rand) sowie durch direkte Sonne. (a) Originalfoto mit  $N = 2/8$ , (b) Bedeckungsgradbestimmung ergibt  $N = 0.76$ .

unerwünschten Reflexen und Streulicht führt. Durch den extremen Blickwinkel von  $180^\circ$  lässt sich keine Sonnenblende anbringen. Reflexe im Himmelsbild erscheinen meist als helle Achtecke, die dann als Wolke erkannt werden, wie in Abbildung 5.4. Hier erzeugt das Streulicht im Objektiv den hellen Schein am Rand rechts oben. Die entsprechenden Randpixel sind dabei heller als die Helligkeitsschwelle aus Gleichung 5.2. Da dieser Bereich außerhalb des Himmelsbildes liegt, könnte er mit Hilfe einer Maske ausgeblendet werden. Wie schon in Kapitel 5.1 beschrieben, ist das in dieser Arbeit nicht möglich. Bei Verwendung einer festmontierten Digitalkamera wäre das problemlos möglich.

Durch Abbildung 5.4 wird ebenfalls der Einfluss des direkten Sonnenlichts sichtbar. Im Originalbild sind lediglich einige dünne Cirren auf der linken Bildseite sowie vereinzelte Cumulus fractus am rechten Bildrand sichtbar. Der synoptisch bestimmte Bedeckungsgrad liegt bei  $2/8$ . Errechnet wurde ein Bedeckungsgrad von  $N = 0.76$ ; das ergibt eine Überschätzung von 200%. Dieser Fehler tritt immer dann auf, wenn die direkte Sonne sichtbar und nicht durch Wolken verdeckt ist. Dann ist das direkte Licht so hell, dass die RGB-Werte nahe ihres Maximums mit  $(RGB) = (255, 255, 255)$  sind. Ist die Atmosphäre zwar wolkenfrei aber dunstig wie auf dem Beispielbild, so ist die Lichtstreuung um die Sonne stärker und der Fehler wird größer. Bei sehr klarer Luft ist die Streuung entsprechend kleiner und der Fehler reduziert sich.

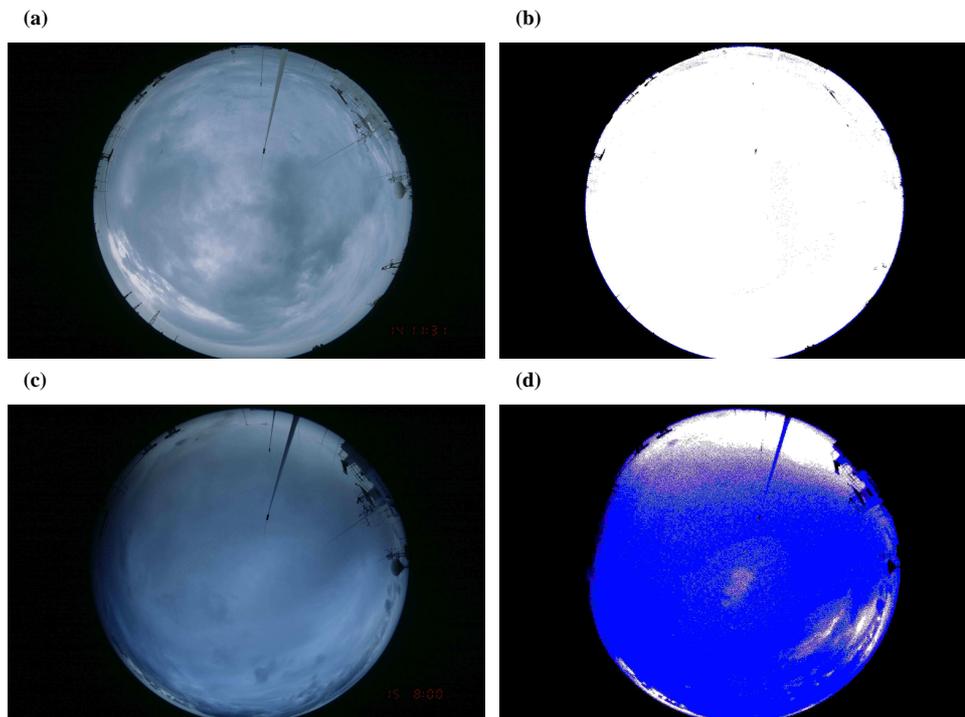
Der direkte Lichteinfall birgt mit Abstand den größten Fehler in der Bedeckungsgradberechnung. Leider würde eine genauere Untersuchung dessen den Umfang dieser Arbeit

sprengen. Der Fehler durch direktes Licht lässt sich für wolkenfreie Bilder nur verringern, wenn der Farbschwellenwert von  $S = 0,55$  vergrößert werden würde. Da aber für alle Wolkenfotos der gleiche Farbschwellenwert gilt, würde eine Vergrößerung die Erkennung von dünnen Wolkenschichten in anderen Wolkenfotos verhindern. Denkbar ist auch die Einbeziehung des Gradienten der Farbe und Helligkeit in die Analyse, da bei wolkenfreiem Himmel der Übergang vom Zentrum der Sonne zum blauen Himmel sehr gleichmäßig verläuft. Anders verhält es sich, wenn die Sonne hinter dünnen Wolkenschichten liegt.

Hier besteht noch großer Forschungsbedarf.

Die Wolkenfotos wurden vom Labor leider nicht farbtreu gescannt. Sie sind blaustichig, deshalb erscheint sogar der komplett bewölkte Himmel bläulich. Das Problem liegt aber in dem unterschiedlichen Grad des Blaustiches. Wären alle Wolkenfotos gleichermaßen bläulich, könnte der Farbschwellenwert entsprechend angepasst werden.

Abbildung 5.5 zeigt jeweils stark bewölkten Himmel mit einem Bedeckungsgrad von



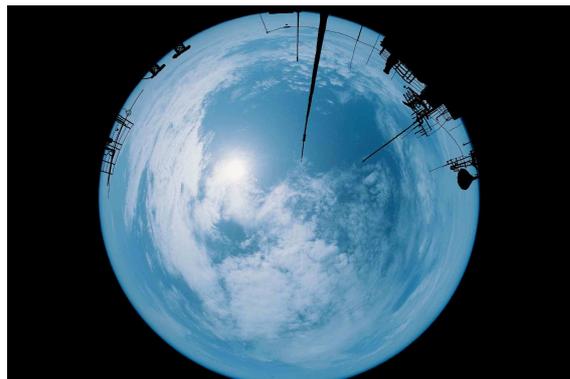
**Abbildung 5.5:** Unterschiedlicher Blaustich bei bedecktem Himmel. Original (a) und Analyse (b) mit  $N = 0.99$ , Original (c) und Analyse (d) mit  $N = 0.18$ .

8/8. Die berechnete Bedeckung für Wolkenfoto (a) wird in (b) gezeigt und beträgt  $N = 0.99$ . Im blaustichigen Wolkenfoto (c) ist der berechnete Bedeckungsgrad (d) lediglich  $N = 0.18$ . Hier müsste - im Gegensatz zur Behebung des Fehlers für direktes Licht - der Farbschwellenwert verkleinert werden, um den Anteil der erkannten Wolken zu erhöhen.

Eine Untersuchung von Farb- und Helligkeitsgradienten auf unterschiedlich blautichigen Fotos könnte die Erkennung von vollständig bedecktem Himmel ebenfalls verbessern, da hier deutliche Strukturen von Wolken vorhanden sind und somit die Gradienten groß sind.

Zur Untersuchung des Einflusses der Schiffsaufbauten wurden diese, wie in Abbildung 5.6 sichtbar, per Hand in einem Bildbearbeitungsprogramm schwarz eingefärbt.

Nun wurde aus der Differenz der Pixel des weißen Bildes aus Abbildung 5.2 (b) und



**Abbildung 5.6:** Schwarz nachgezeichnete Schiffsaufbauten zur Abschätzung des maximalen Fehlers.

der von schwarz verschiedenen Pixel aus 5.6 die exakte Anzahl der Pixel der Schiffsaufbauten berechnet. Mit 84135 Pixels ergibt sich ein maximaler Fehler im Bedeckungsgrad von 4%, der aber in den Berechnungen kaum erreicht wird, da die Aufbauten teils blau, teils weiß gewertet werden (siehe Abbildungen 5.3 bis 5.5). Der Einfluss von dunklen Teilen der Aufbauten, die als schwarzer Rand eingestuft werden, ist so gering, dass er vernachlässigt werden kann - Abbildung 5.5 (d) ist eines der wenigen Bilder, bei denen dieser Fehler auftritt.

Bei einer geringen Anzahl von Aufnahmen konnte die Kamera nicht genau senkrecht ausgerichtet werden, und es ist ein Teil des Ozeans sichtbar. In Abbildung 5.1 kam es am oberen Bildrand dazu. Je nach Sonnenzenitwinkel und Wolkenbedeckung kann es entweder auf der Wasseroberfläche zu Lichtreflexen kommen, die weiß erscheinen, oder aber der dunkelblaue Ozean wurde mit zum wolkenfreien blauen Himmel gezählt. Dieser Einfluss ist ebenfalls zu vernachlässigen. Eine Befestigung der Kamera an der Reeling des Forschungsschiffes hätte keine Vorteile gegenüber der Freihandfotografie gebracht.

Trotz aller Fehlerquellen ist etwa die Hälfte aller Wolkenfotos mit einer Abweichung von weniger als  $1/8$  zum synoptisch beobachteten Bedeckungsgrad berechnet worden. Der Bedeckungsgrad von Fotos mit größeren Fehlern wurde per Hand für die Berechnungen von Strahlungsparametrisierungen in der weiteren Arbeit korrigiert.



# Kapitel 6

## Auswertung

Die Auswertung verfolgt zwei Ziele: Zum einen sollen allgemein gebräuchliche Parametrisierungen solarer Einstrahlung untereinander verglichen und deren Vor- und Nachteile herausgearbeitet werden; andererseits soll der Versuch unternommen werden, bestehende Parametrisierungen zu verbessern.

Der bei der Arbeit verwendete Datensatz stellt dabei eine Besonderheit dar: die Daten wurden innerhalb von 22 Tagen entlang einer weitestgehend meridionalen Forschungsfahrt aufgenommen, beginnend in der maritim gemäßigten Zone Westeuropas, die nördlichen Subtropen und die äquatorialen Tropen durchquerend bis in den subtropischen Hochdruckgürtel der Südhemisphäre. Es existiert keine Parametrisierung, der Daten mit einer vergleichbaren meridionalen Ausdehnung zu Grunde liegt.

### 6.1 Lineare Parametrisierungen

In diesem Kapitel sollen für die Parametrisierungen der solaren Einstrahlung nach Lumb (1964), Lind et al. (1984) und Dobson und Smith (1988) nur jeweils zwei ausgewählte Tage parametrisiert und verglichen werden, da die erwartete Genauigkeit der Strahlungspametrisierungen aufgrund der groben Einteilung in 9 bzw. 10 Wolkenkategorien nicht sehr hoch sein kann. Des Weiteren gehen in die Wolkenkategorien nach Lumb (1964) und Lind et al. (1984) die Wolkengattungen ein. Das heißt, dass hier synoptische Beobachtungen notwendig sind und die alleinige Verwendung der Wolkenkamera zur Bestimmung des Bedeckungsgrades nicht ausreicht.

An dieser Stelle sei auf die Forschungsarbeit von Alexei Sinitsyn verwiesen (siehe Kapitel 3.3), der sich ausführlicher mit auf Synoptik basierenden Parametrisierungen solarer Einstrahlung beschäftigt.

Die Parametrisierung nach Bennett (1982) wird auf alle Tage der Forschungsfahrt angewendet, da hier nur der Bedeckungsgrad der Wolkenkamera eingeht.

Die zwei ausgewählten Tage zur Parametrisierung sind Tage mit sehr wechselhafter Wol-

kenbedeckung. Es wurden der 20.10.04 (12 UTC: 32.1°N, 14.6°W) sowie der 29.10.04 (12 UTC: 9.0°S, 11.4°W) gewählt, Tage mit vielen verschiedenen Wolkengattungen. Der 20.10. begann mit einer Rückseitenwetterlage. Eine kräftige geschlossene Cumulusbewölkung und zwei kurze Regenschauer bestimmten den Vormittag. Ab Mittags war eine immer wieder durchbrochene Altopaculus - opacus - Schicht, und ab etwa 15 Uhr UTC fast wolkenfreier Himmel vorherrschend.

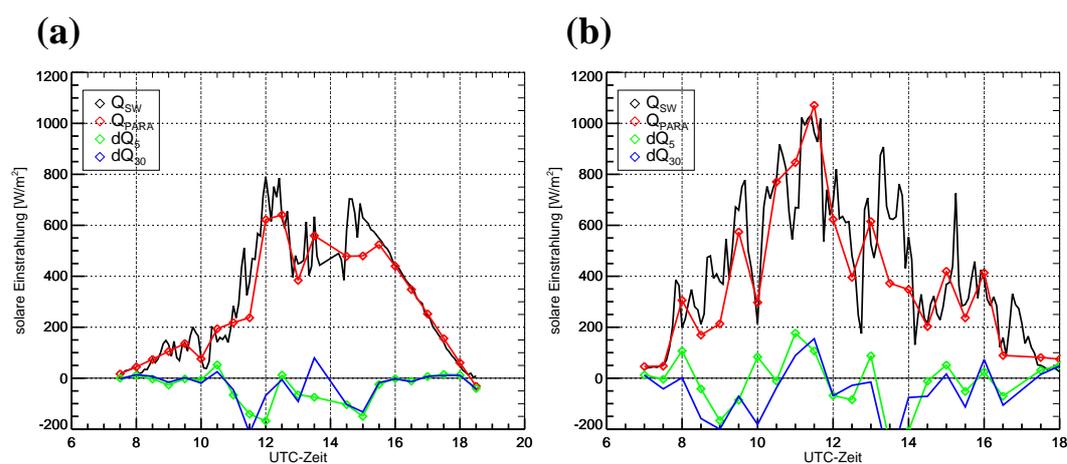
Am 29.10.04 wechselten sich vormittags dünne durchscheinende Altostratus - opacus - und Cumuluswolken ab. Am Nachmittag verdichteten sie sich, und eine kräftige konvektive Cumulusbewölkung mit kurzen Schauern trat auf. Der Abendhimmel war wieder relativ klar.

In Abbildung 6.1 wurde die Strahlungsparametrisierung nach Lumb (1964) angewendet, wie sie in Kapitel 3.1.1 vorgestellt wurde. Dargestellt ist der Tagesgang der solaren Einstrahlung für den 20.10.04 in (a) und für den 29.10.04 in (b), der parametrisierte Tagesgang sowie Differenzen der beiden.

Die schwarze Kurve zeigt die gemessene Einstrahlung als Referenzkurve auf 5 - Minuten - Intervalle gemittelt. Die rote Kurve ist die parametrisierte Einstrahlung. Jedes Wolkenfoto wurde nachträglich auf den Bedeckungsgrad und die Wolkengattung untersucht, dann in die entsprechende Lumb - Wolkengattung eingeordnet, parametrisiert und der Wert durch ein rotes Quadrat in der Kurve gekennzeichnet. Die Abweichung der Parametrisierung zum entsprechenden 5 - Minuten - Messwert ist als grüner Graph veranschaulicht, die Abweichung zum jeweiligen 30 - Minuten - Mittel der gemessenen Einstrahlung ist blau dargestellt.

In allen folgenden Graphen von Strahlungsparametrisierungen wird diese Systematik beibehalten.

Die berechneten Abweichungen in Bezug auf unterschiedliche zeitliche Mittelungen



**Abbildung 6.1:** Parametrisierungen solarer Einstrahlung nach Lumb (1964) für (a) den 20.10.04 und (b) den 29.10.04.

sind wichtig, um zu klären, ob die Parametrisierung die Einstrahlung bei einer bestimmten Bewölkung generell ungenau wiedergibt, oder ob im zeitlichen Mittel die Summe der Einstrahlung richtig berechnet wird. Solch ein Fall kann beispielsweise bei einer durchbrochenen Cumulusbewölkung der Fall sein. Hier variieren die Messwerte innerhalb von Minuten, wenn kleine Wolken die direkte Strahlung nur kurz abschirmen, obwohl der beobachtete Bedeckungsgrad, die Wolkengattung und die Luftfeuchtigkeit unverändert bleiben.

In Abbildung 6.1 (a) wurde der Vormittag des 20.10.04, an dem eine geschlossene Wolkendecke vorherrschte, weitestgehend genau parametrisiert. Große Differenzen zwischen Parametrisierung und 5 - bzw. 30 - Minuten - Mittel treten um 11.30 Uhr auf. Hier herrschte eine leicht durchscheinende Altostratusschicht vor. Die Unterschätzung der Messungen liegen bei  $-150 \text{ W/m}^2$  bis  $-200 \text{ W/m}^2$ . Die große Unterschätzung des 5 - Minuten - Mittels bei 12.00 Uhr von  $180 \text{ W/m}^2$  liegt an durchbrochener Cirrusbewölkung und einem wolkenfreien Abschnitt zur Zeit der Messung und ist im 30 - Minuten - Mittel mit etwa  $-70 \text{ W/m}^2$  deutlich verringert. Bis 15.00 Uhr sind die Differenzen der Parametrisierung auf teils durchbrochene, teils geschlossene durchscheinende Bewölkung zurückzuführen. Um 15.00 Uhr erfolgt schon direkte Sonneneinstrahlung, doch durch  $3/8$  Stratocumulus am Horizont kann noch nicht nach der „Virtually Clear Sky“ - Wolkengategorie 1 parametrisiert werden. Die wolkenfreie Einstrahlung des restlichen Tages wird gut wiedergegeben.

In Abbildung 6.1 (b) fallen vor allem die großen Unterschätzungen der parametrisierten solaren Einstrahlung gegenüber beider Mittel um 9.00 und um 13.30 Uhr auf. Um 9.00 Uhr herrschte eine annähernd geschlossene, aber dünne Cumulusbewölkung und um 13.30 eine durchscheinende Stratocumuluschicht. Das Maximum der Überschätzung der Einstrahlung ist um 11.00 und 11.30 Uhr. Zu dieser Zeit war der Himmel mit durchbrochenen dünnen Cumulus fractus bedeckt.

Die Tabelle 6.1 gibt für die beiden parametrisierten Tage die durchschnittliche Differenz

Datum	$\overline{\Delta Q}$ [ $\text{W/m}^2$ ]	$\sigma_5$ [ $\text{W/m}^2$ ]	$\overline{\Delta Q}$ [ $\text{W/m}^2$ ]	$\sigma_{30}$ [ $\text{W/m}^2$ ]
	5-min-Mittel		30-min-Mittel	
20.10.04	-35.0955	59.704	-28.1473	62.736
29.10.04	-14.6703	105.65	-49.6011	107.60

**Tabelle 6.1:** Statistik der Parametrisierung nach Lumb (1964): Mittelwert  $\overline{\Delta Q}$  der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 5 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung sowie Standardabweichung  $\sigma$  der Differenzen.

von Parametrisierung und entsprechendem 5 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung sowie die Standardabweichungen  $\sigma$  der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 5 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung an.

Es wird deutlich, dass an beiden Tagen eine Unterschätzung der solaren Einstrahlung durch die Parametrisierung erfolgt. Während am 20.10.04 der Mittelwert der Differenzen

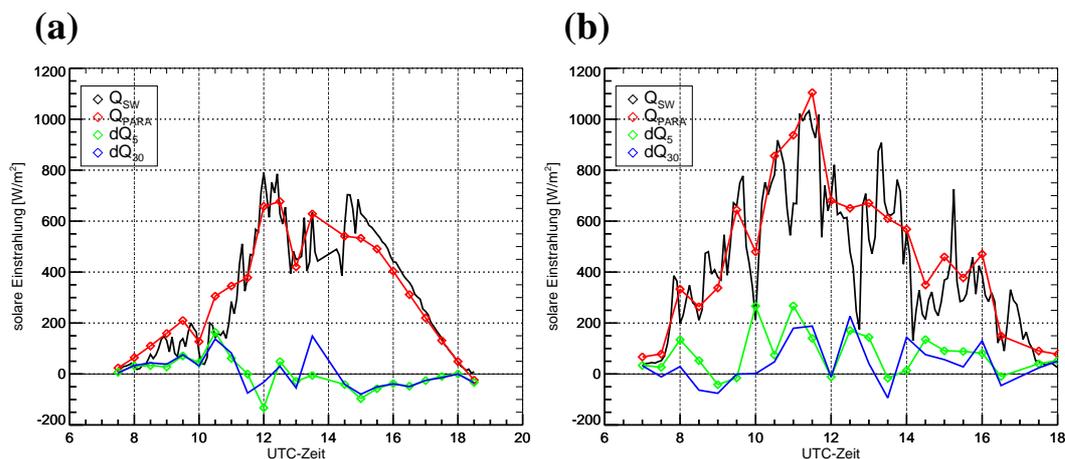
durch die 30 - minütige Mittelung der Messwerte von  $-35 \text{ W/m}^2$  auf  $-28 \text{ W/m}^2$  sinkt, verdreifacht er sich am 29.10.04 von  $15 \text{ W/m}^2$  auf  $50 \text{ W/m}^2$ . Die Standardabweichungen der Differenzen sind am 29.10.04 erheblich größer aufgrund der vermehrten durchbrochenen Bewölkung und damit verbundenen erhöhten Fluktuationen der Einstrahlung. Die Mittelung der Einstrahlung auf 30 Minuten verändert die Standardabweichung der Differenzen nur geringfügig.

Bei der Strahlungsparametrisierung nach Lumb fällt auf, dass bereits kleine Ungenauigkeiten in der beobachteten Bewölkung und die natürliche Variabilität der Wolken während des zu parametrisierenden Zeitraums zu großen Fehlern in der berechneten Einstrahlung führen können.

Wird zum Beispiel der Fall angenommen, dass zum Zeitpunkt der Beobachtung 5/8 relativ hohe Stratocumulusbewölkung vorherrscht, so entspricht dies der Wolkenkategorie 2. Berichtet der Beobachter zur gleichen Zeit allerdings 6/8 dünne Altostratusbewölkung, würde das der Kategorie 4 entsprechen. Bei einem Sonnenzenitwinkel von  $45^\circ$  liegt die Differenz beider parametrisierter Einstrahlungen bei  $122 \text{ W/m}^2$ . Das Fehlerpotential bei Lumb (1964) ist also groß und durch den menschlichen Faktor (Beobachter) schwer einzuschätzen, wenn keine Vergleichsmessungen vorliegen.

Die Strahlungsparametrisierung nach Lind et al. (1984) (siehe Kapitel 3.1.2) wurde in Abbildung 6.2 ebenfalls auf den 20.10.04 und den 29.10.04 angewandt.

Im Vergleich zu der Parametrisierung nach Lumb (1964) treten hier in Abbildung (a) die



**Abbildung 6.2:** Parametrisierungen solarer Einstrahlung nach Lind et al. (1984) für (a) den 20.10.04 und (b) den 29.10.04.

maximalen Abweichungen von berechneter und gemessener Einstrahlung zu anderen Zeitpunkten auf. Eine deutliche Überschätzung der gemessenen Einstrahlung bezüglich

des 5 - und 30 - Minuten - Mittels erfolgt um 10.30 Uhr, als eine geschlossene Cumulusbewölkung herrschte. Eine große Überschätzung des 30 - minütigen Mittels ist um 13.30 Uhr bei durchscheinender Stratocumulusbewölkung festzustellen.

Der wolkenfreie Abschnitt am Nachmittag weist eine allgemeine Unterschätzung der Messungen auf; hier scheint ein systematischer Fehler der Parametrisierung vorzuliegen.

In Abbildung 6.2 (b) ist eine generelle Überschätzung der parametrisierten Einstrahlung zu verzeichnen. Von 10.00 bis 13.00 Uhr erfolgt diese Überschätzung mit Ausnahme von 12 Uhr. In diesem Zeitraum herrschte eine meist geschlossene durchscheinende stratiforme Wolkendecke, die immer wieder von dichten Cumuli unterbrochen wurde.

Der Mittelwert der Differenzen von Parametrisierung und Messwerten (Tabelle 6.2) ist

Datum	$\overline{\Delta Q}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_5$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\overline{\Delta Q}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_{30}$ [W/m <sup>2</sup> ]
	5-min-Mittel		30-min-Mittel	
20.10.04	-1.04864	62.200	5.89952	63.695
29.10.04	78.2271	85.608	43.2963	85.929

**Tabelle 6.2:** Statistik der Parametrisierung nach Lind et al. (1984): Mittelwert  $\overline{\Delta Q}$  der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 5 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung sowie Standardabweichung  $\sigma$  der Differenzen.

für den 20.10.04 mit etwa  $-1 \text{ W/m}^2$  bzw.  $6 \text{ W/m}^2$  gering und erheblich besser als bei Lumb (1964). Die Standardabweichungen haben für diesen Tag etwa dieselbe Größenordnung.

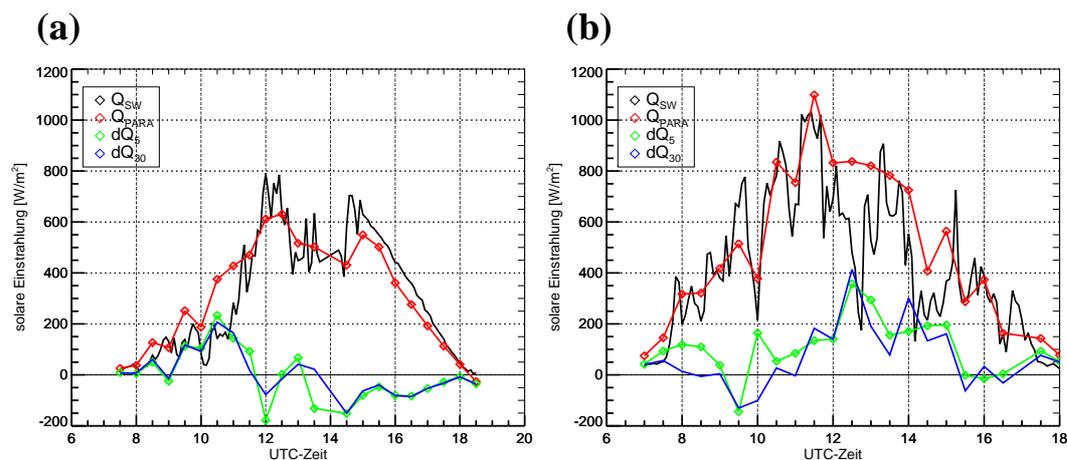
Für den 29.10.04 sind die Differenzen von Parametrisierung und Messwerten bei Lind bezogen auf das 5 - Minuten - Mittel mit  $78 \text{ W/m}^2$  größer als bei Lumb, jedoch ergibt sich für das 30 - Minuten - Mittel eine geringere durchschnittliche Abweichung mit  $43 \text{ W/m}^2$ . Die Standardabweichungen sind hier erheblich geringer und liegen bei etwa  $86 \text{ W/m}^2$ .

Die Strahlungsflussdichten nach dem *Okta-Modell*, der Strahlungsparametrisierung nach Dobson und Smith (1988) (Kapitel 3.1.3), sind in Abbildung 6.3 dargestellt.

In den ersten Stunden des 20.10.04 wird die Einstrahlung durch die Parametrisierung bei dichter Cumulusbewölkung überschätzt. Die Stunden bei wolkenfreiem Himmel beginnend um 14.30 Uhr werden unterschätzt. Diese Unterschätzung ist vergleichsweise groß und scheinbar ein systematischer Fehler der Parametrisierung nach Dobson und Smith (1988).

Am 29.10.04 werden die Messwerte um 9.30 Uhr mit  $-150 \text{ W/m}^2$  stark unterschätzt; der Grund dafür liegt bei 7/8 sehr dünner durchscheinender stratiformer Bewölkung. Als sich danach die Wolken verdichten, kommt es zwischen 11.30 Uhr und 15.00 Uhr zu einer Überschätzung der Einstrahlung mit Werten von bis zu  $400 \text{ W/m}^2$ .

Tabelle 6.3 zeigt die Statistik der beiden Tage. Für den 20.10.04 liegen die Mittelwerte der Differenzen bezüglich 5 - und 30 - Minuten - Mittelung nahe bei Null. Die Standard-



**Abbildung 6.3:** Okta-Modell. Parametrisierungen solarer Einstrahlung nach Dobson und Smith (1988) für (a) den 20.10.04 und (b) den 29.10.04.

Datum	$\overline{\Delta Q}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_5$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\overline{\Delta Q}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_{30}$ [W/m <sup>2</sup> ]
	5-min-Mittel		30-min-Mittel	
20.10.04	-3.41370	100.94	3.53446	85.069
29.10.04	106.272	107.15	71.3416	126.60

**Tabelle 6.3:** Statistik der Parametrisierung nach Dobson und Smith (1988): Mittelwert  $\overline{\Delta Q}$  der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 5 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solarer Einstrahlung sowie Standardabweichung  $\sigma$  der Differenzen.

abweichung der Differenzen ist jedoch erheblich größer als bei Lumb und Lind et al. Am 29.10.04 liegen sowohl die Mittelwerte als auch die Standardabweichungen der Differenzen der Parametrisierung nach Dobson und Smith (1988) über denen der anderen Parametrisierungen.

Dadurch wird deutlich, dass die vereinfachten Wolkenkategorien nach Dobson und Smith (1988) ohne Berücksichtigung der Wolkengattung und damit der optischen Dichte der Wolken eine große Fehlerquelle darstellen. Die Einstrahlung bei dünnen Wolken wird unterschätzt, die bei starker konvektiver Bewölkung überschätzt. Es kann möglich sein, die Parametrisierungskoeffizienten an einen bestimmten Datensatz so anzupassen, dass die Summe der Einstrahlung über einen längeren Zeitraum exakt ist. Soll aber dieselbe Parametrisierung auf Daten mit unterschiedlichen dominanten Wolkengattungen angewendet werden, so werden sehr große Fehler auftreten.

Nach dieser Untersuchung von drei Strahlungsparametrisierungen, die alle auf der gleichen Berechnungsgrundlage und auf der Einteilung der bewölkten Atmosphäre in Wolkenkategorien basieren, scheint diejenige nach Lind et al. (1984) die solare Einstrahlung

für die zwei ausgewählten Tage am besten wiederzugeben. Die Parametrisierung nach Dobson und Smith (1988) weist die größten Fehler auf. Der in Kapitel 3.2.1 angesprochene Test von Strahlungsparametrisierungen nach Dobson und Smith (1988), bei dem das *Ohta-Modell* die geringsten Standardabweichungen hatte, erscheint zweifelhaft. Diese Ergebnisse basieren auf einem relativ kleinen Datensatz. Die Untersuchung dieser Parametrisierungen anhand von weiteren Daten soll aber nicht Gegenstand dieser Arbeit sein. Im Folgenden sollen hier vor allem Parametrisierungen verwendet werden, die eine Unabhängigkeit von synoptischen Wolkenbeobachtungen zulassen, da synoptische Wetterbeobachtungen durch Meteorologen vielfach eingespart und durch unbemannte Wetterstationen ersetzt werden. Die höhere zeitliche Auflösung automatischer Systeme ist dabei von Vorteil.

Die Strahlungsparametrisierung nach Bennett (1982) aus Kapitel 3.1.4 beinhaltet lediglich die Solarkonstante, den Sonnenzenitwinkel und den Bedeckungsgrad. Somit ist sie gut für Daten der Wolkenkamera geeignet, missachtet aber viele strahlungsbeeinflussende Faktoren.

Die Parametrisierung wurde vom 16.10.04 bis 04.11.04 für alle Tage mit fehlerfreien Strahlungsmessungen durchgeführt. Die Grafiken sind im Anhang in den Abbildungen C.1 und C.2 dargestellt. Die Farben der einzelnen Graphen sind nach wie vor schwarz für die Messwerte, rot für die Parametrisierungen und grün und blau für die Differenzen aus Parametrisierungen und zugehörigen 5 - bzw. 30 - Minuten - Mittel der gemessenen Einstrahlungen.

Es fällt sofort eine allgemeine Unterschätzung der gemessenen Einstrahlung durch die Parametrisierung auf. Der 17.10.04 wird überschätzt; hier war ganztägig eine stratiforme Schlechtwetterbewölkung mit anhaltendem Regen vorherrschend. Parametrisierung und Messwerte stimmen relativ gut am 23.10.04 überein, ein Tag mit geringen Bedeckungsgraden und durchscheinenden Cumulusfetzen. Die größten Differenzen ergeben sich für Tage, an denen eine fast geschlossene, aber stark durchscheinende Wolkendecke vorherrscht wie am 21.10.04 mit überwiegend Cirrus fibratus oder am 30.10.04 mit Alto-cumulus translucidus.

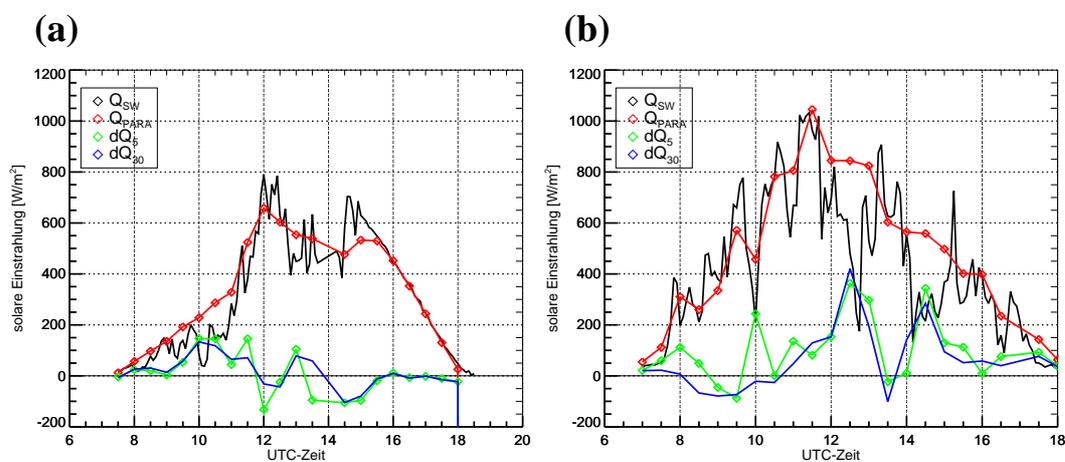
Die systematischen Fehler der Strahlungsparametrisierung nach Bennett (1982) treten schon im ersten Schritt, in der Berechnung der Einstrahlung bei unbewölktem Himmel auf: Bei hohem Sonnenstand (mittags) tritt im absolut wolkenfreien Abschnitt des 03.11.04 zwischen 10.30 Uhr und 12.10 Uhr eine Unterschätzung der Einstrahlung von etwa  $100 \text{ W/m}^2$  auf. Hier wurde der Faktor der Transmissivität der wolkenfreien Atmosphäre zu gering angesetzt.

Die Statistik in Tabelle C.1 im Anhang bestätigt die allgemeine Unterschätzung der Einstrahlung. Die mittlere Differenz von Parametrisierung und gemessener Einstrahlung beträgt für den gesamten Zeitraum  $-47 \text{ W/m}^2$  und  $-45 \text{ W/m}^2$  für die 5 - und 30 - minütigen Mittel der Messwerte. Die Standardabweichungen der Differenzen liegen bei  $131 \text{ W/m}^2$  und  $115 \text{ W/m}^2$ . Somit ist die Parametrisierung nach Bennett (1982) für praktische Anwendungen ungeeignet.

## 6.2 Nichtlineare Parametrisierungen

Die nichtlineare Strahlungsparametrisierung nach Dobson und Smith (1988) aus Kapitel 3.2.1 ist auf synoptische Standardbeobachtungen angewiesen und verwendet 10 Wolkenkategorien. Deshalb wird sie hier nur auf die beiden Beispieltage, den 20.10.04 und 29.10.04 angewendet. Für die Auswertung größerer Datensätze der Wolkenkamera kommt sie nicht in Frage, da eine Wolkenklassifizierung anhand der einzelnen Fotos nötig ist.

Abbildung 6.4 (a) zeigt die parametrisierte Einstrahlung für den 20.10.04. Die größte



**Abbildung 6.4:** Nichtlineare Parametrisierungen solarer Einstrahlung nach Dobson und Smith (1988) für (a) den 20.10.04 und (b) den 29.10.04.

Abweichung von Parametrisierung und Messwert findet sich um 18.30 Uhr. Hier liegt die berechnete Einstrahlung bei  $-3.2 \cdot 10^{18} \text{W/m}^2$ ! Als Grund für diesen gewaltigen Parametrisierungsfehler ist die bereits untergegangene Sonne zu sehen; der Sonnenzenitwinkel beträgt um 18.30 Uhr  $92.2^\circ$ . Dadurch wird in Gleichung 3.14 der Kosinus des Sonnenzenitwinkels negativ und somit ergibt sich für:

$$T_F = F e^{-2.8 \cdot (N[e^{56} + E_i] + (1 - N))} . \quad (6.1)$$

Dobson und Smith (1988) weisen auf diese Eigenschaft der Transmissionsgleichung nicht hin und gehen davon aus, dass Sonnenzenitwinkel von  $\theta > 90^\circ$  nicht benutzt werden.

Ähnlich dem *Okta-Modell* wird die gemessene Einstrahlung von 9.00 bis 11.30 Uhr bei dichter Cumulusbewölkung unterschätzt, der wolkenfreie Abschnitt zwischen 15.30 und 18.00 Uhr wird relativ genau von der Parametrisierung wiedergegeben.

In Abbildung 6.4 (b) gleicht der Kuvenverlauf sehr der Kurve des *Okta-Modells*. Die Extrema der Einstrahlungsüberschätzung liegen wieder bei 12.30 und 14.30 mit bis zu  $400 \text{W/m}^2$ .

Die Statistik zur nichtlinearen Parametrisierung nach Dobson und Smith ist in Tabelle

Datum	$\overline{\Delta Q}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_5$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\overline{\Delta Q}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_{30}$ [W/m <sup>2</sup> ]
	5-min-Mittel		30-min-Mittel	
20.10.04	8.63870	79.891	16.0113	59.883
29.10.04	99.0225	120.92	64.0917	123.38

**Tabelle 6.4:** Statistik der nichtlinearen Parametrisierung nach Dobson und Smith (1988): Mittelwert  $\overline{\Delta Q}$  der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 5 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung sowie Standardabweichung  $\sigma$  der Differenzen. Am 20.10.04 wurde der Wert für 18.30 Uhr nicht berücksichtigt.

6.4 und zeigt etwas bessere Resultate als das *Okta-Modell*, jedoch reicht die Qualität nicht an Lind et al. (1984) oder Lumb (1964) heran. Die zuvor angesprochene Parametrisierung bei  $\theta = 92.2^\circ$  wurde nicht berücksichtigt. Wie schon in der Arbeit von Dobson und Smith (1988) angemerkt wurde, konnten die großen Erwartungen an ihre nichtlineare Strahlungsparametrisierung nicht erfüllt werden. Die hohe mittlere Überschätzung der Einstrahlung und die hohen Standardabweichungen des 29.10.04 bestätigen dies.

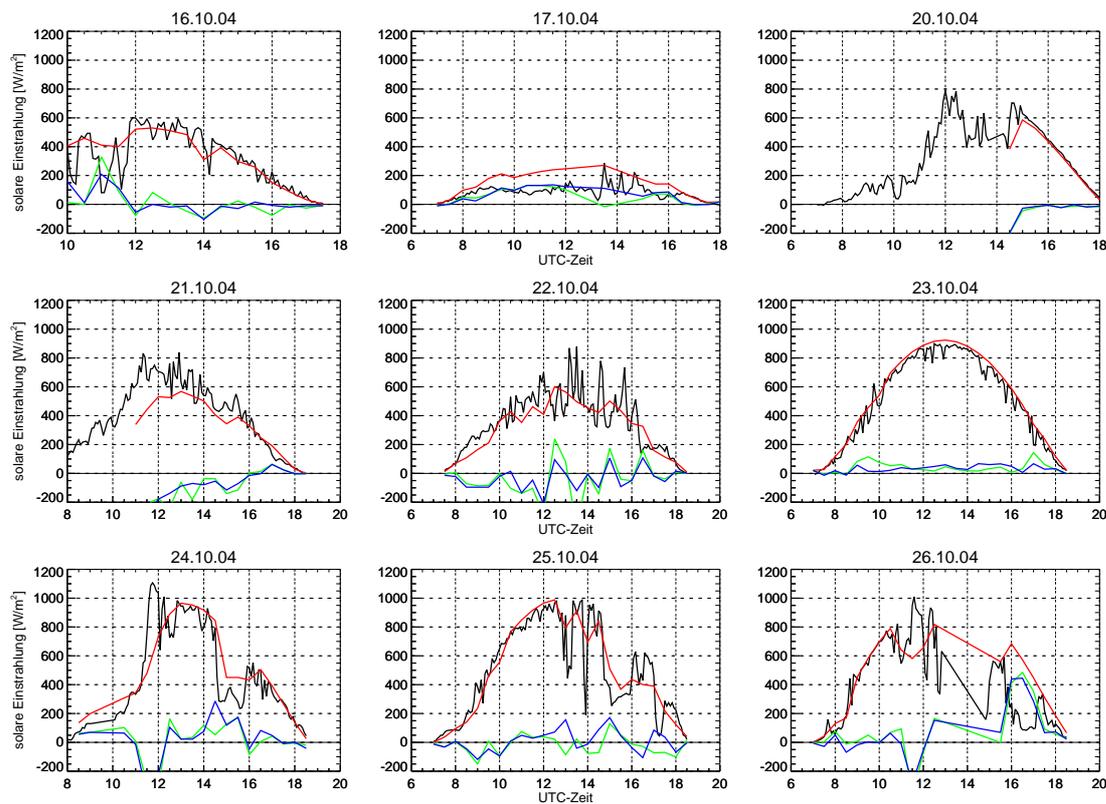
Die Strahlungsparametrisierung nach Zillman (1972) wird in Abbildung 6.5 und 6.6 für die gesamte MORE-Forschungsfahrt gezeigt.

In diese Parametrisierung gehen neben Solarkonstante und Sonnenzenitwinkel noch der Wasserdampfdruck in Bodennähe sowie der Bedeckungsgrad ein (siehe Kapitel 3.2.2).

Besonders gute Übereinstimmungen von Parametrisierung und Messwerten finden sich für wolkenfreie Abschnitte wie sie beispielsweise am 20.10.04, am 27.10.04 oder am 03.11.04 auftraten. Wird ein überwiegend wolkenfreier Himmel gelegentlich von dünnen, durchscheinenden Wolken unterbrochen, so wird dies durch die Strahlungsparametrisierung im Mittel verhältnismäßig genau wiedergegeben, wenn sich die Bewölkung im tiefen oder mittleren Höhengniveau befindet; Beispiele hierfür sind der 16.10.04, der 23.10.04 und der 01.11.04. Handelt es sich fast ausschließlich um Cirren, wie es am 21.10.04 der Fall war, so wird die Einstrahlung unterschätzt. Anscheinend ist hier die Korrelation von Cirrusbewölkung und Luftfeuchtigkeit in Bodennähe gering.

Bei kräftigerer durchbrochenen Cumulusbewölkung treten die größten Differenzen zwischen Parametrisierung und gemessener Einstrahlung auf, da die Fluktuationen der Einstrahlung auf kurzen Zeitskalen sehr groß sein können. Der Wasserdampfdruck als verbleibende veränderliche Variable in der Berechnung kann sich in diesem Fall aber nur geringfügig und langsam ändern. Somit kommt es bei abrupten Änderungen der Einstrahlung zu entsprechend großen Fehlern der Parametrisierung. Der 28. und 29.10.04 zeigen diese Eigenschaften.

Die Einstrahlung bei stratiformer Bewölkung wird relativ genau parametrisiert, wenn die Wolkenschichten von geringer oder mäßiger Dicke sind (31.10.04). Kommt es zu Schlechtwetter-Stratus mit starker Höhenentwicklung und damit verbundener hohen



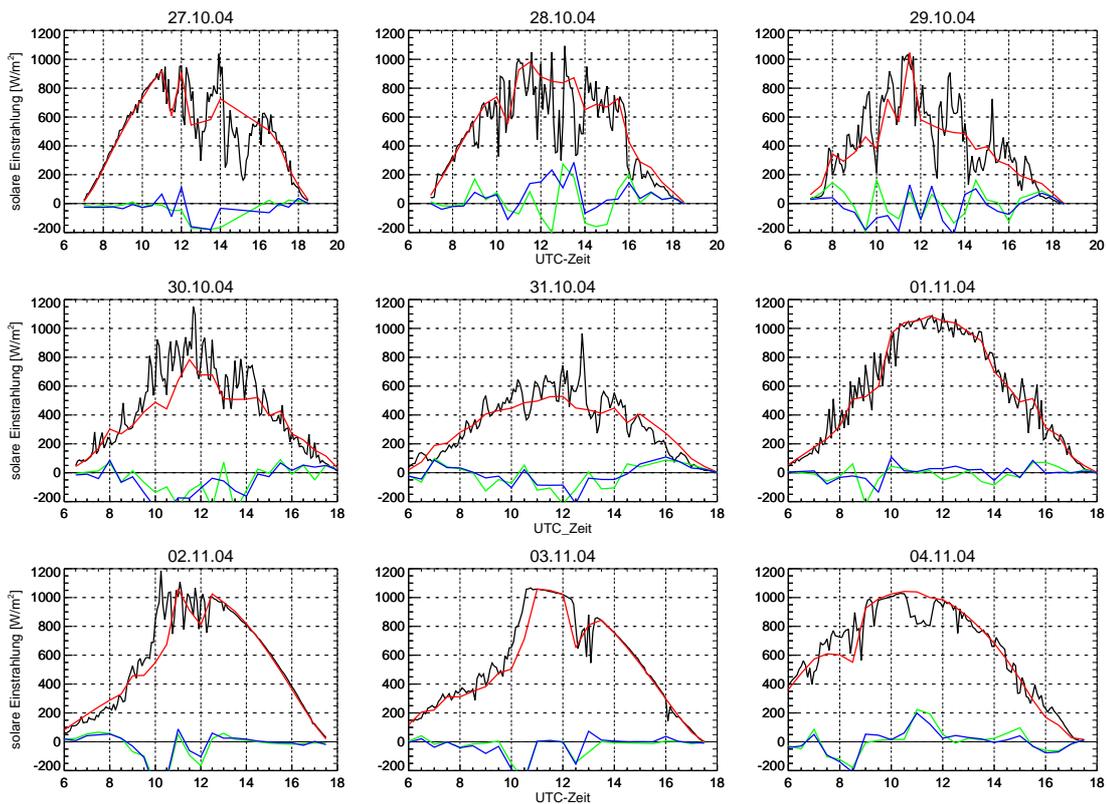
**Abbildung 6.5:** Parametrisierungen solarer Einstrahlung nach Zillman (1972) für den 16.10.04 bis 26.10.04. 18. und 19.10.04 fehlen aufgrund fehlerhafter Daten.

optischen Dicke, kann die Parametrisierung die Messwerte um das Doppelte überschätzen wie beispielsweise am 17.10.04. Allerdings kam es hier durch Regentropfen auf der Glaskuppel des Pyranometers auch zu erhöhten Messfehlern.

Im Anhang sind in Tabelle D.1 die Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenzen von Parametrisierungen und entsprechenden 5 - oder 30 - Minuten - Mitteln der gemessenen solaren Einstrahlung für jeden einzelnen Tag und für die gesamte Dauer der Forschungsfahrt aufgeführt.

Die Tage mit den geringsten Beträgen der mittleren Differenzen von Parametrisierungen und Messwerten sind die mit dünner durchbrochener Bewölkung wie der 01.11.04 und 04.11.04. Die geringste Standardabweichung hat der 23.10.04 durch sehr geringe Bedeckungsgrade mit dünnen Cumulus fractus.

Die größten Beträge der Mittelwerte der Differenzen von Parametrisierungen und Messwerten ergeben sich für den 21.10.04, einem Tag mit kompletter Cirrostratus - Bedeckung und einem  $22^\circ$ -Halo. Offensichtlich bereiten gleichmäßig dünne Cirruswolken, die vorwiegend aus hexagonalen Eiskristallen bestehen, der Parametrisierung Schwierigkeiten. Die größten Standardabweichungen der Differenzen finden sich am 24.10.04, vor allem verursacht durch eine deutliche Strahlungserhöhung (Broken Cloud Effect), die durch



**Abbildung 6.6:** Parametrisierungen solarer Einstrahlung nach Zillman (1972) für den 27.10.04 bis 04.11.04.

einen wolkenfreien Teil des Himmels mit direkter Sonneneinstrahlung und umgebenden durchscheinenden Altostratus- und Cirrusschichten (erhöhte diffuse Einstrahlung) hervorgerufen wurde.

Für den gesamten Zeitraum der Forschungsfahrt ergibt sich eine Unterschätzung der Einstrahlung von  $-6.1 \text{ W/m}^2$  bzw.  $-3.2 \text{ W/m}^2$  bezogen auf die 5 - und 30 - minütigen Mittelwerte der gemessenen Einstrahlung. Die Standardabweichungen liegen bei  $102 \text{ W/m}^2$  bzw.  $95 \text{ W/m}^2$ .

Obwohl der Zustand der Atmosphäre meridional stark variabel ist (Temperatur, Wasserdampfgehalt, Höhe der Tropopause, Sonnenzenitwinkel), lassen sich für diese Forschungsfahrt keine Parametrisierungsfehler auf die geographische Lage zurückführen. Die Fluktuationen der Bewölkung sind für solch einen kurzen Zeitraum so groß, dass eventuelle Zusammenhänge von Parametrisierungsungenauigkeiten und geographischer Breite unerkant bleiben. Deshalb sind weitere meridionale Forschungsfahrten notwendig.

### 6.2.1 Modifikation der Parametrisierung nach Zillman

Die Strahlungsparametrisierung nach Zillman (1972) bringt qualitativ gute Ergebnisse hervor; auf längeren Zeitskalen liegt die durchschnittliche Unterschätzung der solaren Einstrahlung bei wenigen Watt pro Quadratmeter.

In diesem Kapitel wird versucht, die Qualität der Strahlungsparametrisierung weiter zu erhöhen, indem die Gleichungen zur Einstrahlungsberechnung auf den vorliegenden Datensatz optimal angepasst werden, sodass die Unterschätzung der Einstrahlung gegen Null geht bei gleichzeitiger Verringerung der Standardabweichungen.

Die Gleichung 3.18 zur Berechnung der solaren Einstrahlung  $Q_{SW}(0)$  bei wolkenfreiem Himmel und der Wolkenfaktor  $T_W$  nach Laevastu (1960) (Gleichung 3.19) sollten in ihrer Struktur erhalten werden, aber die darin empirisch ermittelten Koeffizienten auf die Strahlungsdaten der MORE-Forschungsfahrt optimiert werden. Dazu wurden die Parametrisierungskoeffizienten in einem sinnvollen Größenbereich variiert. Folgende Tabelle zeigt die Koeffizienten aus den Gleichungen 3.18 und 3.19 und die untersuchten Größenbereiche:

Zillman	Modifikation
2.7	2.2, 2.3, ..., 3.2
1.085	1.050, 1.055, ..., 1.120
0.1	0.0, 0.1, ..., 0.5
0.6	0.54, 0.56, ..., 0.64

Zu jeder der 10890 Kombinationen neuer Koeffizienten wurden die Mittelwerte und die Standardabweichungen der Differenzen von Parametrisierung und zeitlich gemitteltem Messwert des MORE-Datensatzes berechnet.

Als bestmöglicher Kompromiss zwischen Reduzierung von Unterschätzung und Standardabweichung der parametrisierten Einstrahlung haben sich folgende modifizierte Gleichungen für  $Q_{SW}(0)$  und  $T_W$  ergeben:

$$Q_{SW}(0) = \frac{S_0 \cdot \cos^2 \theta}{(\cos \theta + 2.5)p_w 10^{-3} + 1.120 \cos \theta + 0.1} \quad , \quad (6.2)$$

$$T_W = 1.0 - 0.55 \cdot N^3 \quad , \quad \text{mit } N \in [0, 1] \quad . \quad (6.3)$$

Mit diesen Gleichungen wurden alle Tage der Forschungsfahrt parametrisiert und die Graphen im Anhang in den Abbildungen D.1 und D.2 dargestellt. Die Unterschiede im Kurvenverlauf zur originalen Parametrisierung nach Zillman (1972) erscheinen zwar

gering, jedoch zeigt die Statistik in Tabelle D.2 sowohl eine Verringerung der Unterschätzungen der Einstrahlung als auch eine Reduzierung der Standardabweichungen der Differenzen von modifizierter Parametrisierung und Messwerten. Eine Untersuchung der Unterschiede von originaler und modifizierter Strahlungsparametrisierung mit Rücksicht auf die vorherrschende Wolkengattung wird in Kapitel 6.2.2 durchgeführt.

In Tabelle 6.5 sind die statistischen Ergebnisse der originalen und der modifizierten

	$\overline{\Delta Q}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_5$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\overline{\Delta Q}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_{30}$ [W/m <sup>2</sup> ]
	5-min-Mittel		30-min-Mittel	
Zillman	-6.12624	101.62	-3.27431	94.971
Modifikation	-2.72448	98.255	0.127448	89.916

**Tabelle 6.5:** Vergleich der Parametrisierungen nach Zillman (1972) und der Modifikation für die gesamte Forschungsfahrt: Mittelwert  $\overline{\Delta Q}$  der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 5 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung sowie Standardabweichung  $\sigma$  der Differenzen.

Strahlungsparametrisierung für den gesamten Datensatz zum Vergleich zusammengefasst. Hier ist ersichtlich, dass die durchschnittlichen Differenzen von Parametrisierung und den gemittelten Messwerten der Einstrahlung deutlich näher an Null sind und gleichzeitig die Standardabweichungen gesunken sind.

Im Folgenden wird geprüft, ob sich auch bei von MORE unabhängigen Datensätzen eine erhöhte Genauigkeit der modifizierten Strahlungsparametrisierung zeigt.

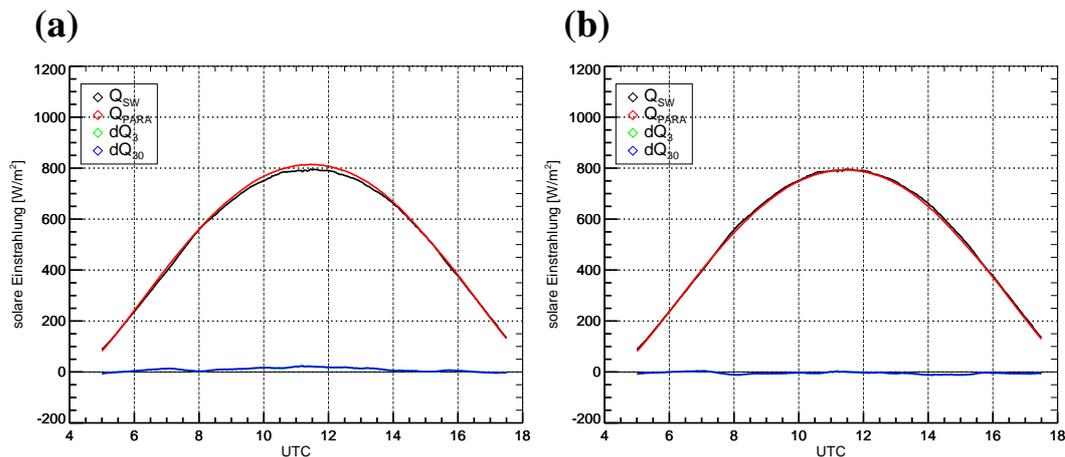
### 6.2.2 Anwendung auf Syltdaten

In Westerland auf Sylt werden seit 2004 von Frühjahr bis Herbst meteorologische Standardmessungen durch das Institut für Medizinische Klimatologie der Universität Kiel durchgeführt. Dazu gehören u.a. die solare Einstrahlung, Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit. Die Messgeräte haben eine weitaus höhere Präzision und eine feinere zeitliche Auflösung als die auf der *Vavilov* verwendeten. Es existieren keine Strahlungsmessfehler durch die Bewegungen des Schiffes. Messfehler durch Gischttröpfchen und Salzablagerungen auf der Kuppel des Pyranometers sind erheblich reduziert. In Kombination mit der digitalen Wolkenkamera vor Ort eignen sich diese Daten optimal, um die Parametrisierungen nach Zillman (1972) und die Modifikation zu überprüfen.

Diese Überprüfung mit anderen Messdaten ist notwendig, um eventuelle systematische Messfehler auf der Forschungsfahrt und eine Anpassung der Strahlungsparametrisierung an diese auszuschließen. Die Bedeckungsgrade der Sylter Daten wurden von Nils Schade mit Hilfe seines Fortran-Programmes berechnet. Dieses basiert zwar auf denselben theoretischen Grundlagen (Kapitel 5) wie das von mir entwickelte Programm in IDL, es wurde von mir aber nicht als Quelle benutzt. Eine Anpassung der Parametrisierung

an eventuelle gemeinsame Programmierfehler kann somit auch ausgeschlossen werden. Zur Berechnung des Bedeckungsgrades von Sylt wurde ein größerer Farbschwellenwert benutzt, und es existieren aufgrund des verwendeten Plexiglasdomes andere systematische Fehler (Streulicht).

Zuerst soll überprüft werden, wie gut die unbewölkte Atmosphäre parametrisiert wer-



**Abbildung 6.7:** Parametrisierungen solarer Einstrahlung für einen komplett wolkenfreien Tag nach (a) Zillman (1972) und (b) nach der Modifikation.

den kann. In Abbildung 6.7 wurden die Strahlungsflussdichten des 25.04.2005, einem Tag ohne jegliche Bewölkung, in (a) nach der originalen Strahlungsparametrisierung nach Zillman (1972) und in (b) nach der modifizierten Parametrisierung aus Kapitel 6.2.1 berechnet.

In (a) zeigen sich vor allem zwischen 9.00 und 14.00 Uhr Abweichungen der Parametrisierung von den Messwerten. In diesem Bereich ist eine deutliche Verringerung der Abweichungen in (b) zu erkennen. Davor und danach scheint es kaum Unterschiede in den Graphen zu geben. Die Abweichung der Parametrisierung bezüglich des auf 3 Minuten gemittelten Messwertes ist nicht zu sehen (grün), denn sie verbirgt sich genau hinter der blauen Kurve für die 30 - Minuten - Mittel.

In Tabelle 6.6 wird gezeigt, dass die Einstrahlung unter wolkenfreien Bedingungen durch die Gleichungen nach Zillman (1972) im Mittel um  $8.6 \text{ W/m}^2$  bis  $8.9 \text{ W/m}^2$  überschätzt und durch die modifizierten Gleichungen um  $-4.9 \text{ W/m}^2$  bis  $-4.6 \text{ W/m}^2$  unterschätzt wird. Somit konnte die mittlere Abweichung der Strahlungsparametrisierung vom gemittelten Messwert etwa halbiert werden.

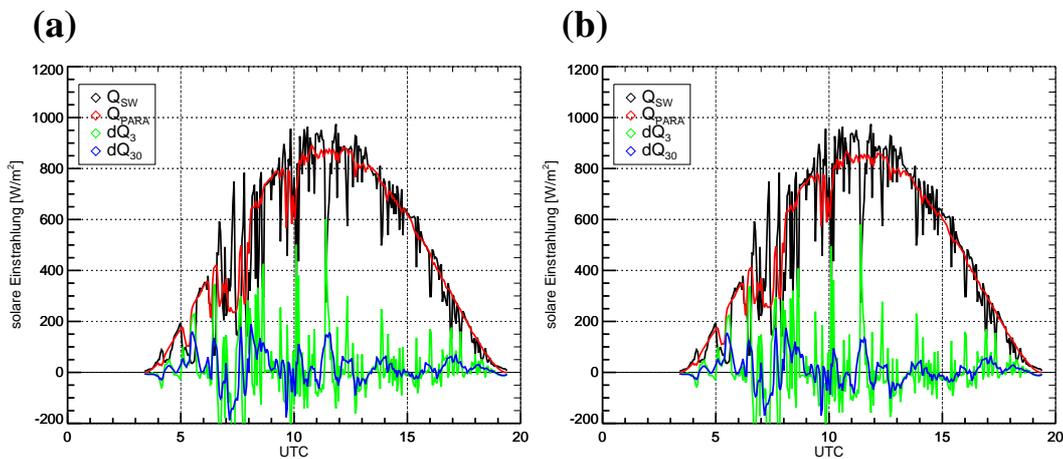
Die Standardabweichungen von den Differenzen der Parametrisierung und der gemessenen 3 - bzw. 30 - Minuten - Mittel der Einstrahlung wurden ebenfalls fast halbiert und sanken auf  $4.2 \text{ W/m}^2$  und  $3.9 \text{ W/m}^2$ .

	$\overline{\Delta Q}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_3$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\overline{\Delta Q}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_{30}$ [W/m <sup>2</sup> ]
	3-min-Mittel		30-min-Mittel	
Zillman	8.65771	7.2022	8.89214	7.2495
Modifikation	-4.85744	4.1711	-4.62295	3.8799

**Tabelle 6.6:** Vergleich der Parametrisierungen nach Zillman (1972) und der Modifikation für die wolkenfreie Atmosphäre: Mittelwert  $\overline{\Delta Q}$  der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 3- oder 30-Minuten-Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung sowie Standardabweichung  $\sigma$  der Differenzen.

Abbildung 6.8 zeigt die Strahlungsparametrisierung nach Zillman (1972) in (a) und nach der Modifikation in (b) für den 18.05.2005.

Die Bewölkung war ganztägig stark durchbrochen mit leichten, kurzen Schauern am



**Abbildung 6.8:** Parametrisierungen solarer Einstrahlung für einen Tag mit stark durchbrochener Bewölkung nach (a) Zillman (1972) und (b) nach der Modifikation.

Vormittag. Zwischen 6.00 und 8.30 Uhr kam es durch den *Broken Cloud Effect* zu kurzzeitigen Strahlungserhöhungen. Diese Strahlungserhöhungen bleiben bei beiden Parametrisierungen unberücksichtigt.

Die Verwendung der auf 3 Minuten gemittelten Messwerte führt zu großen Differenzen zwischen Parametrisierungen und Messwerten; hier können beide Parametrisierungen die bei durchbrochener Cumulusbewölkung auftretenden schnellen Fluktuationen der Einstrahlung nicht wiedergeben.

Aussagen über die Qualität der Parametrisierungen können nur durch die statistische Auswertung in Tabelle 6.7 getroffen werden. Die Mittelwerte der Differenzen von Parametrisierung und zeitlich gemittelten Messwerten konnten - ähnlich wie bei wolkenfreien Bedingungen - durch die Modifikation halbiert werden; sie liegen mit  $7.6 \text{ W/m}^2$  sehr nah an Null, obwohl einzelne Messwerte um bis zu  $400 \text{ W/m}^2$  überschätzt oder unterschätzt wurden. Die Standardabweichungen wurden geringfügig gesenkt.

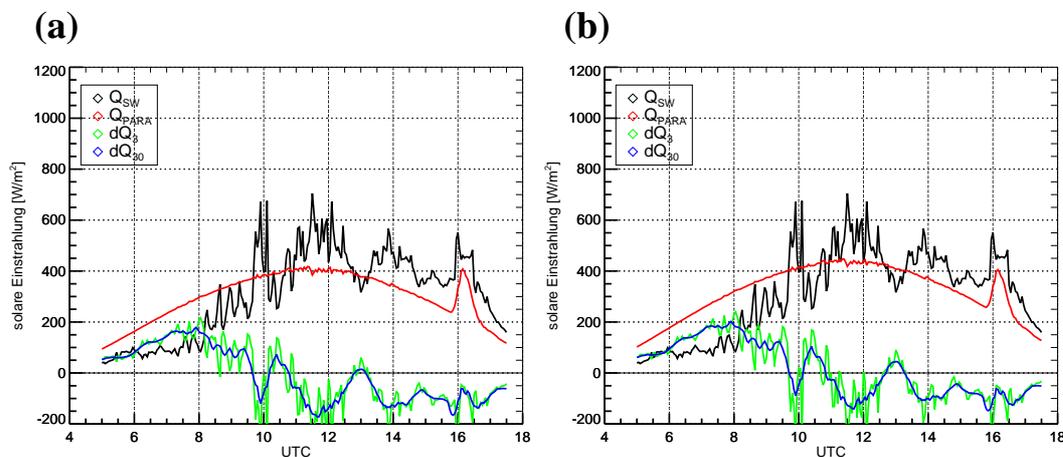
	$\overline{\Delta Q}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_3$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\overline{\Delta Q}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_{30}$ [W/m <sup>2</sup> ]
	3-min-Mittel		30-min-Mittel	
Zillman	15.8176	123.92	15.8677	57.083
Modifikation	7.56734	122.10	7.61746	53.608

**Tabelle 6.7:** Vergleich der Parametrisierungen nach Zillman (1972) und der Modifikation für stark durchbrochene Bewölkung: Mittelwert  $\overline{\Delta Q}$  der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 3 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung sowie Standardabweichung  $\sigma$  der Differenzen.

Hier wird der Einfluss der zeitlichen Mittelung der Einstrahlungsdaten auf die Genauigkeit der Parametrisierung deutlich: Je länger das Zeitintervall, desto geringer werden die Standardabweichungen der Parametrisierungen.

In Abbildung 6.9 wird das Verhalten der Parametrisierungen nach Zillman (1972) und deren Modifikation bei stratiformer Bewölkung ohne Regen vom 09.06.2005 untersucht. Vormittags war die Wolkenschicht sehr dick mit entsprechend hoher optischer Dicke, nachmittags war sie dünner, teils durchscheinend und gegen 18.00 Uhr waren die Wolken kurz durchbrochen.

Mit Ausnahme des durchbrochenen Abschnittes ist der Himmel komplett bedeckt und



**Abbildung 6.9:** Parametrisierungen solarer Einstrahlung eines stratiform bewölkten Tages nach (a) Zillman (1972) und (b) nach der Modifikation.

die Luftfeuchtigkeit schwankt während des Tages nur minimal - somit ist die Parametrisierung nur noch vom Sonnenzenitwinkel abhängig. Daher zeigt sich in beiden Fällen auch, dass die Strahlungsparametrisierungen unsensitiv auf die unterschiedlich dicken geschlossenen Stratusschichten von Vor- und Nachmittag reagieren. Bei dicker stratiformer Bewölkung werden die Messwerte überschätzt, bei dünner unterschätzt.

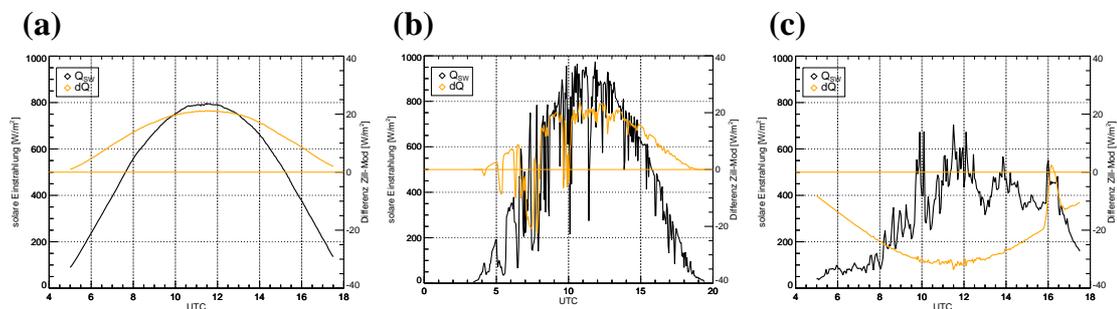
In Tabelle 6.8 werden die Mittelwerte der Differenzen von Parametrisierung und ent-

	$\overline{\Delta Q}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_3$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\overline{\Delta Q}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_{30}$ [W/m <sup>2</sup> ]
	3-min-Mittel		30-min-Mittel	
Zillman	-10.0408	115.58	-10.4924	103.48
Modifikation	12.4828	115.18	12.0312	102.93

**Tabelle 6.8:** Vergleich der Parametrisierungen nach Zillman (1972) und der Modifikation für stratiforme Bewölkung: Mittelwert  $\overline{\Delta Q}$  der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 3 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung sowie Standardabweichung  $\sigma$  der Differenzen.

sprechendem 3 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung sowie die Standardabweichung der Differenzen verglichen. Bedingt durch das Verhältnis von optisch dicker zu optisch dünner Stratusbewölkung ergibt sich eine leichte Erhöhung der Mittelwerte der Differenzen bei der Modifikation. Die Standardabweichungen haben sich unwesentlich verringert.

Stratiforme Bewölkung ist die größte potentielle Fehlerquelle der Strahlungsparametrisierung nach Zillman (1972) und deren Modifikation. Eine deutliche Verbesserung ist nicht zu erwarten, da im Falle von Stratusschichten die reale Einstrahlung stark variieren kann, ohne dass sich die berücksichtigten Eingangsgrößen verändern.

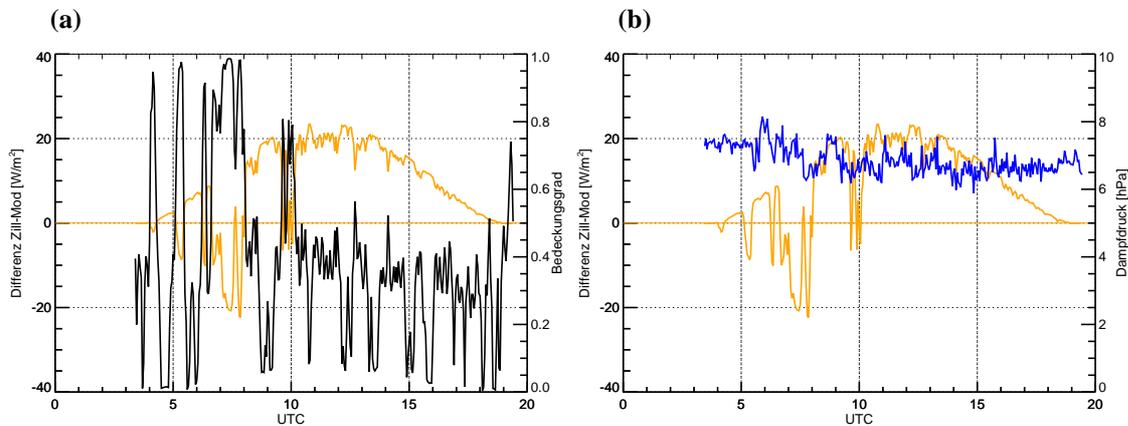


**Abbildung 6.10:** Gemessene Einstrahlung (schwarz) und Differenzen (orange) von originaler und modifizierter Strahlungsparametrisierung nach Zillman (1972) für (a) wolkenfreien Himmel, (b) durchbrochene und (c) stratiforme Bewölkung.

In Abbildung 6.10 sind für die drei parametrisierten Tage mit wolkenfreier Atmosphäre, durchbrochener und stratiformer Bewölkung die Differenzen (orange) von originaler und modifizierter Strahlungsparametrisierung nach Zillman dargestellt. Bei wolkenfreiem Himmel (Abbildung 6.10 a) sind die nach Zillman berechneten Strahlungsflussdichten bis zu  $20 \text{ W/m}^2$  größer als die der modifizierten Parametrisierung. In Abbildung (b) zeigen sich bei durchbrochener Bewölkung starke Fluktuationen der Differenzen. Die Differenzen reichen von etwa  $-20 \text{ W/m}^2$  bis  $20 \text{ W/m}^2$ . In Abbildung (c) sind die nach

Zillman berechneten Strahlungsflussdichten bis zu  $30 \text{ W/m}^2$  geringer; positiv werden die Differenzen während der kurzen Aufheiterung gegen 18 Uhr.

Um zu klären wie sensitiv die Differenzen der Parametrisierungen von dem Bedeckungsgrad-



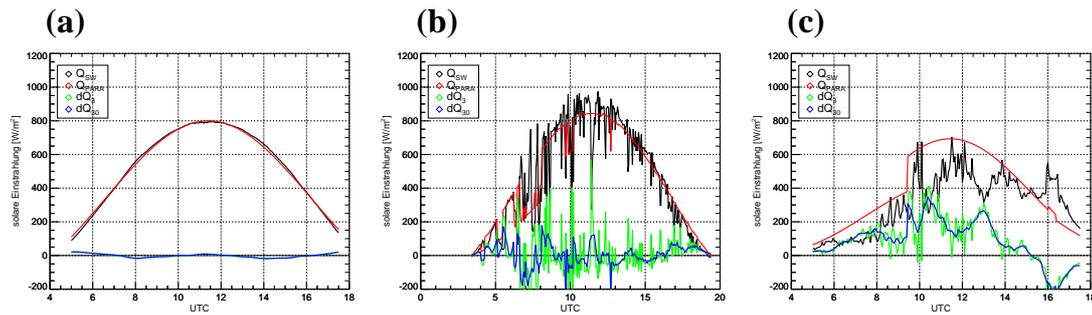
**Abbildung 6.11:** Durchbrochene Bewölkung: Differenzen (orange) von originaler und modifizierter Strahlungsparametrisierung nach Zillman (1972) und (a) Bedeckungsgrad sowie (b) Wasserdampfdruck.

grad beziehungsweise der relativen Luftfeuchte abhängen, sind in Abbildung 6.11 diese Parameter für den Tag mit durchbrochener Bewölkung dargestellt. Die Differenzen weisen in (a) eine starke Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad auf. Ist der Bedeckungsgrad gering, so sind die Differenzen positiv, ist er hoch, so sind sie negativ. Bei einer Bedeckung von etwa 75 % liegen die Differenzen bei Null. Ein Zusammenhang mit den Fluktuationen des Wasserdampfdrucks ist in Abbildung (b) nicht ersichtlich. Allerdings variiert dieser auch nur gering.

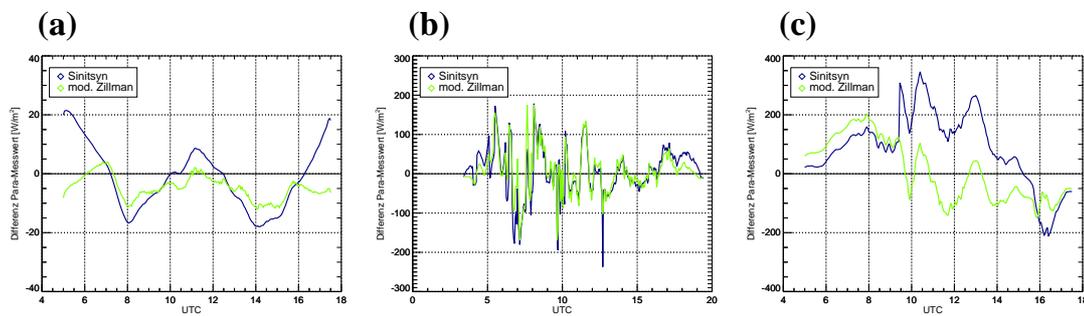
Insgesamt konnte anhand der Strahlungsdaten von Sylt eine qualitative Verbesserung der Strahlungsparametrisierung nach Zillman (1972) mit den modifizierten Parametrisierungskoeffizienten gezeigt werden.

### 6.2.3 Vergleich mit der Parametrisierung nach Sinitsyn

In diesem Kapitel soll die Modifikation der Strahlungsparametrisierung nach Zillman (1972) mit der Parametrisierung nach Sinitsyn aus Kapitel 3.3 direkt verglichen werden. In Abbildung 6.12 wurden die Strahlungsflussdichten der drei bereits in Kapitel 6.2.2 untersuchten Tage (Sylt) mit der Strahlungsparametrisierung nach Sinitsyn berechnet. Eine Einordnung in die entsprechenden Wolkenkategorien war nach der Analyse der Aufzeichnungen der digitalen Wolkenkamera möglich, ist jedoch bei größeren Datenmengen nicht zu realisieren.



**Abbildung 6.12:** Berechnung der solaren Einstrahlung von Sylt mit der Parametrisierung nach Sinitsyn für (a) wolkenfreien Himmel, (b) durchbrochene und (c) stratiforme Bewölkung.



**Abbildung 6.13:** Differenzen von Parametrisierung und Messwerten für die Parametrisierung nach Sinitsyn (dunkelblau) und die modifizierte Parametrisierung nach Zillman (1972) (hellgrün) für (a) wolkenfreien Himmel, (b) durchbrochene und (c) stratiforme Bewölkung.

Die Berechnungen der Mittelwerte sowie der Standardabweichungen der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 3 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung sind in Tabelle 6.9 gezeigt und können mit den Werten aus den Tabellen 6.6, 6.7 und 6.8 bei der Verwendung der Parametrisierungen nach Zillman (1972) und deren Modifikation verglichen werden.

Der direkte Vergleich der Differenzen von Parametrisierung und Messwerten für die Parametrisierung nach Sinitsyn (dunkelblau) und die modifizierte Parametrisierung nach Zillman (1972) (hellgrün) ist in Abbildung 6.13 für die 30 - Minuten - Mittel veranschaulicht.

Im Fall des wolkenfreien Himmels (Abbildung 6.12 a) zeigt sich ein sehr geringer Mittelwert der Differenzen, jedoch liegen die Standardabweichungen deutlich höher als bei der modifizierten Zillman-Parametrisierung. Dies zeigt sich auch in Abbildung 6.13 (a); die Differenzen der Parametrisierung nach Sinitsyn sind bedeutend stärkeren Schwankungen unterworfen, liegen aber im Tagesmittel näher an Null.

In der Kurve der Einstrahlung für die durchbrochene Bewölkung (Abbildung 6.12 b) fallen die sprunghaften Änderungen der parametrisierten Einstrahlung bei einem Wechsel der Wolkenkategorie auf. Da nur 9 Wolkenkategorien vorhanden sind, kann die Ein-

	$\overline{\Delta Q}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_3$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\overline{\Delta Q}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_{30}$ [W/m <sup>2</sup> ]
	3-min-Mittel		30-min-Mittel	
wolkenfrei	-1.57395	10.985	-1.33951	10.720
durchbrochen	5.98432	122.50	6.03444	61.894
stratiform	87.3678	133.34	86.9163	122.00

**Tabelle 6.9:** Statistik der Parametrisierung nach Sinitsyn für Sylt bei wolkenfreiem Himmel, durchbrochener und stratiformer Bewölkung: Mittelwert  $\overline{\Delta Q}$  der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 3 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung sowie Standardabweichung  $\sigma$  der Differenzen.

strahlung bei konstantem Sonnenzenitwinkel nur 9 diskrete Werte annehmen. Dies spiegelt sich in einer höheren Standardabweichung im Vergleich zur modifizierten Zillman-Parametrisierung und stärkeren Schwankungen der Differenzen in Abbildung 6.13 (b) wider. Der Mittelwert der Differenzen ist trotzdem etwas geringer.

Die mittlere Überschätzung der Einstrahlung bei stratiformer Bewölkung (Abbildung 6.12 c) übersteigt mit über 80 W/m<sup>2</sup> die der modifizierten Zillman-Parametrisierung um ein Vielfaches. Die Standardabweichung ist ebenfalls größer. In Abbildung 6.13 (c) befindet sich die Kurve der Differenzen bei Sinitsyn fast ausschließlich weit im positiven Bereich. Somit bleibt das Fehlerpotential der Parametrisierung von solarer Einstrahlung bei stratiformer Bewölkung bestehen.

Aufgrund geringerer Beträge der Differenzen von berechneter und gemessener Einstrahlung bei unterschiedlichen Wolkengattungen über dem Ozean ergibt die Modifikation der Strahlungsparametrisierung nach Zillman (1972) eine genauere Strahlungsbilanzierung als die nach Sinitsyn. Die Berechnung von instantanen Strahlungsflussdichten erfolgt durch eine geringere Standardabweichung der Modifikation von Zillman (1972) im Mittel ebenfalls genauer.

## Kapitel 7

# Schlussbetrachtung

In dieser Arbeit wurde die Untersuchung verschiedenster Parametrisierungen solarer Einstrahlung unter maritimen Bedingungen thematisiert. Die Grundlage bildeten die Messdaten der ersten Forschungsfahrt des Meridional Ocean Radiation Experiments MORE, das eine Zusammenarbeit des IfM-GEOMAR und des Shirshov Institute of Oceanology ist.

Solare Strahlungsparametrisierungen, die den atmosphärischen Transmissionsfaktor durch die Verwendung relativ grober Wolkenkategorien bestimmen, können trotz einfacher Gleichungen die Einstrahlung im Mittel durchaus genau wiedergeben wie im Beispiel der Parametrisierung nach Lind et al. (1984). Jedoch ist hier das Fehlerpotential durch die unterschiedliche Bewertung der Bewölkung durch die Beobachter groß.

Wird die Reduktion der Einstrahlung durch Wolken lediglich durch den Bedeckungsgrad bestimmt wie bei Dobson und Smith (1988) oder Bennett (1982), sind die Strahlungsparametrisierungen in Verbindung mit einer Wolkenkamera unabhängig von synoptischen Beobachtungen. Allerdings wird hier die optische Dicke von Wolken vernachlässigt, sodass die berechneten Einstrahlungen für dünne durchscheinende Cirrusschichten und dickste Schlechtwetterbewölkungen gleich sind. Die Untersuchungen bestätigen große Differenzen zwischen gemessenen und parametrisierten Einstrahlungen.

Die Strahlungsparametrisierung nach Zillman (1972) ergibt vergleichsweise genaue solare Einstrahlungen unter Verwendung berechneter Bedeckungsgrade aus Wolkenkamedaten. Die Transmissivität wird aus dem Wasserdampfdruck in Bodennähe berechnet, der Abschattungseffekt von Wolken wird durch den nichtlinearen Wolkenfaktor nach Laevastu (1960) berücksichtigt. Eine systematische Unterschätzung der Einstrahlung erfolgte hier bei Cirrostratusbewölkung. Die durchschnittliche Differenz von Parametrisierungen und 30 - Minuten - Mitteln der solaren Einstrahlung beträgt  $-3.3 \text{ W/m}^2$  für den Zeitraum der Forschungsfahrt.

Die in den Gleichungen nach Zillman (1972) und Laevastu (1960) verwendeten Parametrisierungskoeffizienten wurden modifiziert, sodass der Mittelwert der Differenzen von Parametrisierungen und 30 - Minuten - Mitteln der Einstrahlung auf  $0.13 \text{ W/m}^2$  sinkt. Gleichzeitig verringert sich die Standardabweichung der Differenzen von berechneter und gemessener Einstrahlung. Diese qualitative Verbesserung der Gleichungen kann

te mit von MORE unabhängigen Messdaten von der Insel Sylt bestätigt werden. Hier halbierte sich der systematische Fehler für wolkenfreien und durchbrochen bedeckten Himmel, während die Standardabweichung ebenfalls sank.

Im direkten Vergleich mit der Parametrisierung nach Alexei Sinitsyn zeigt die modifizierte Strahlungsparametrisierung bei wolkenfreiem Himmel sowie bei durchbrochener Bewölkung etwas größere Mittelwerte und geringere Standardabweichungen der Differenzen von berechneter und gemessener Einstrahlung. Die Fehler bei stratiformer Bewölkung sind wesentlich geringer als bei Sinitsyn.

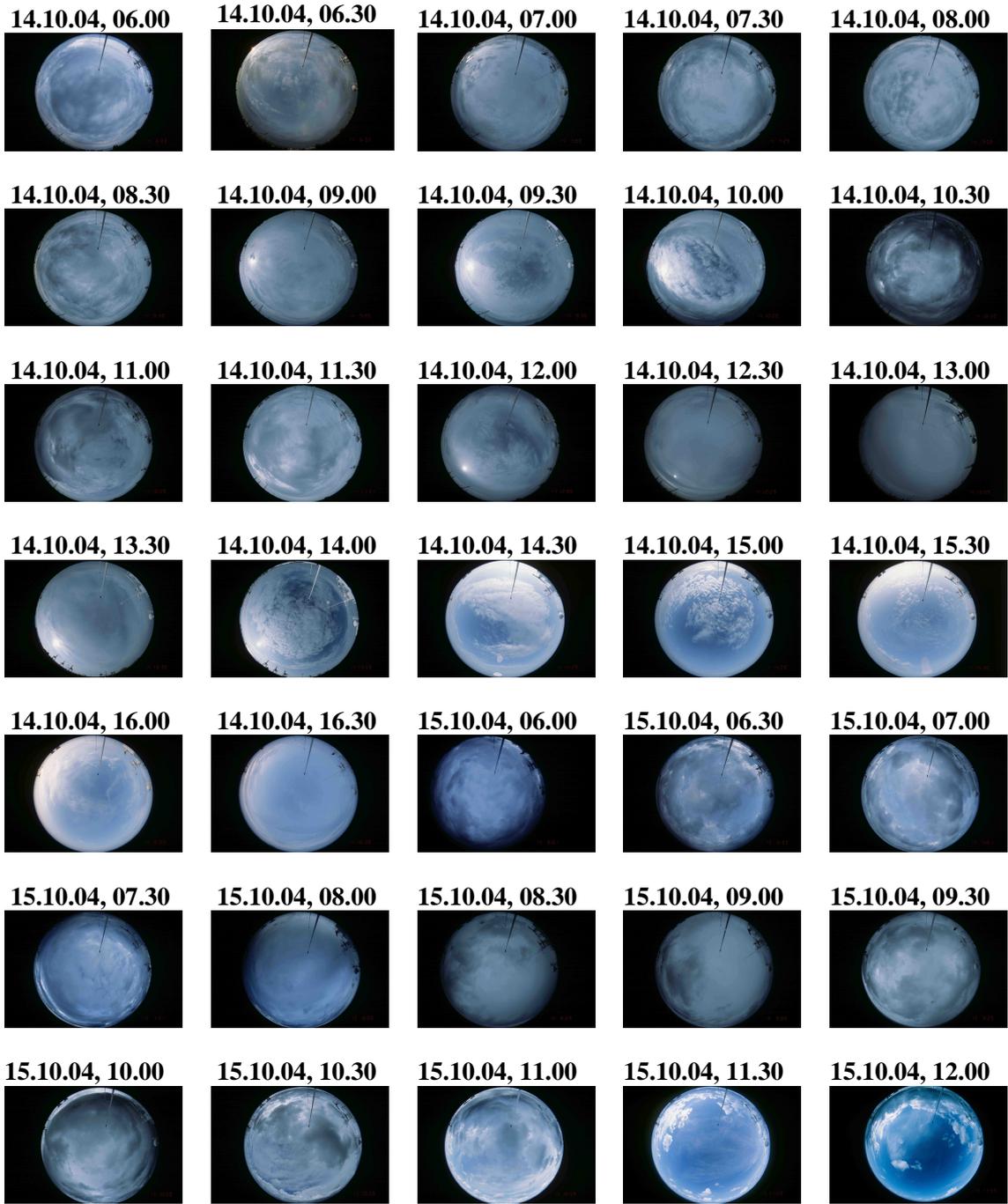
Unabhängig davon welche Berechnungsgrundlage benutzt wird, kann wolkenfreier Himmel am genauesten parametrisiert werden. Im Falle von durchbrochener Cumulusbewölkung wechselt die reale Einstrahlung sehr schnell, ohne dass sich die berücksichtigten Faktoren bei den Parametrisierungen ändern können; demzufolge sind Parametrisierungen unsensitiv gegenüber kurzzeitigen Fluktuationen und werden erst durch eine Mittelung auf mindestens 30 Minuten genauer. Stratusbewölkung, die den gesamten Himmel bedeckt, führt allgemein zu den größten Fehlern bei der Berechnung von solarer Einstrahlung; bei dünnen Stratusschichten werden die Strahlungsflussdichten meist unterschätzt, bei dicken überschätzt.

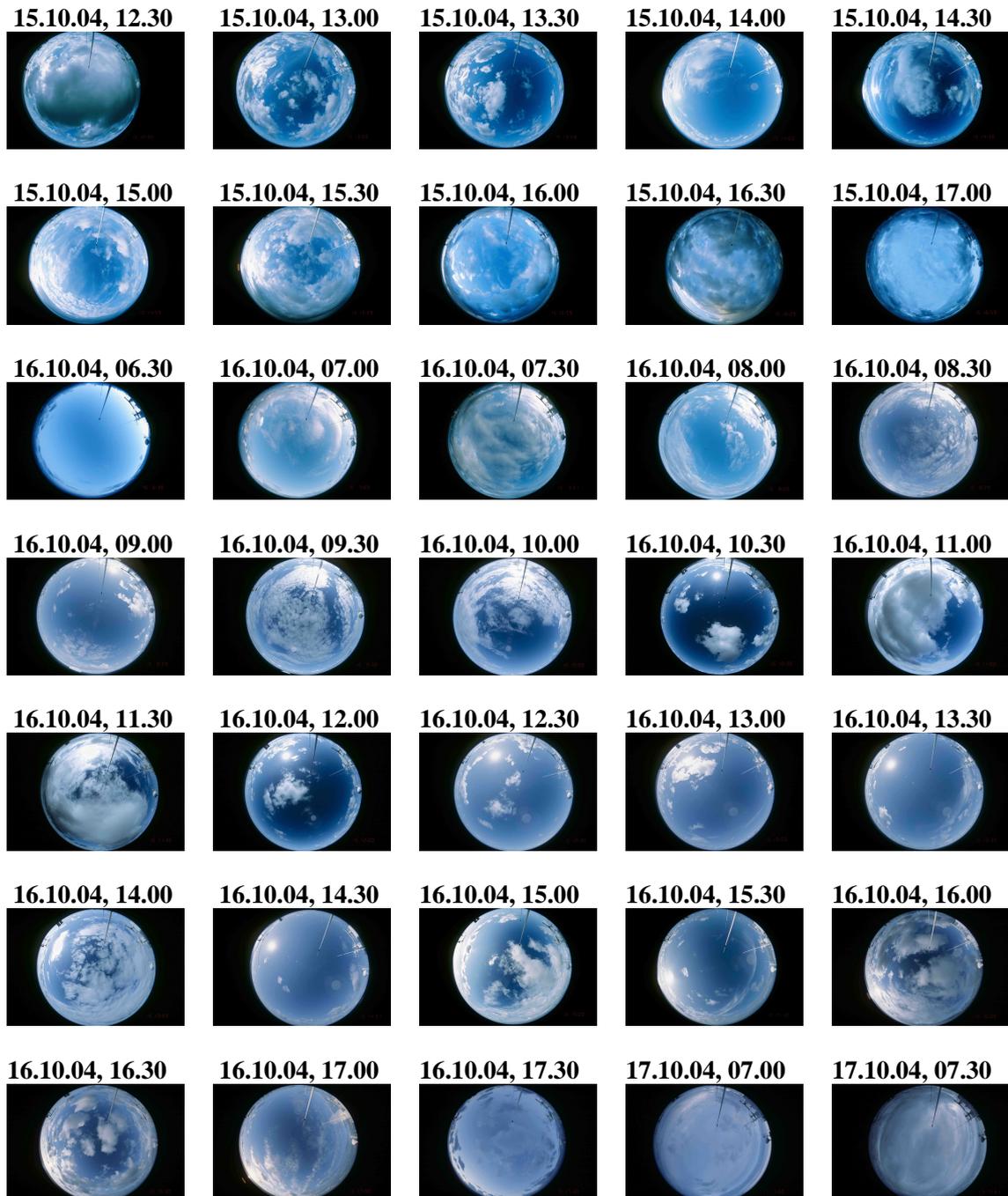
Die Berechnung des Bedeckungsgrades anhand einer Aufnahme des Wolkenhimmels ist zufriedenstellend, wenn die direkte Sonne durch Wolken verdeckt wird. Ist die direkte Sonne am unbewölkten Himmel sichtbar, erscheinen sie und die Umgebung so hell, dass sie vom Berechnungsprogramm als weiße Wolke gewertet werden. Die Farbveränderung der Wolkenfotos, die durch das Scannen der Kleinbildfilme entstanden ist, lassen sich in Zukunft durch die Benutzung einer Digitalkamera verhindern; dann ist auch die Verwendung von Masken möglich. Wünschenswert ist eine automatische seefeste Wolkenkamera.

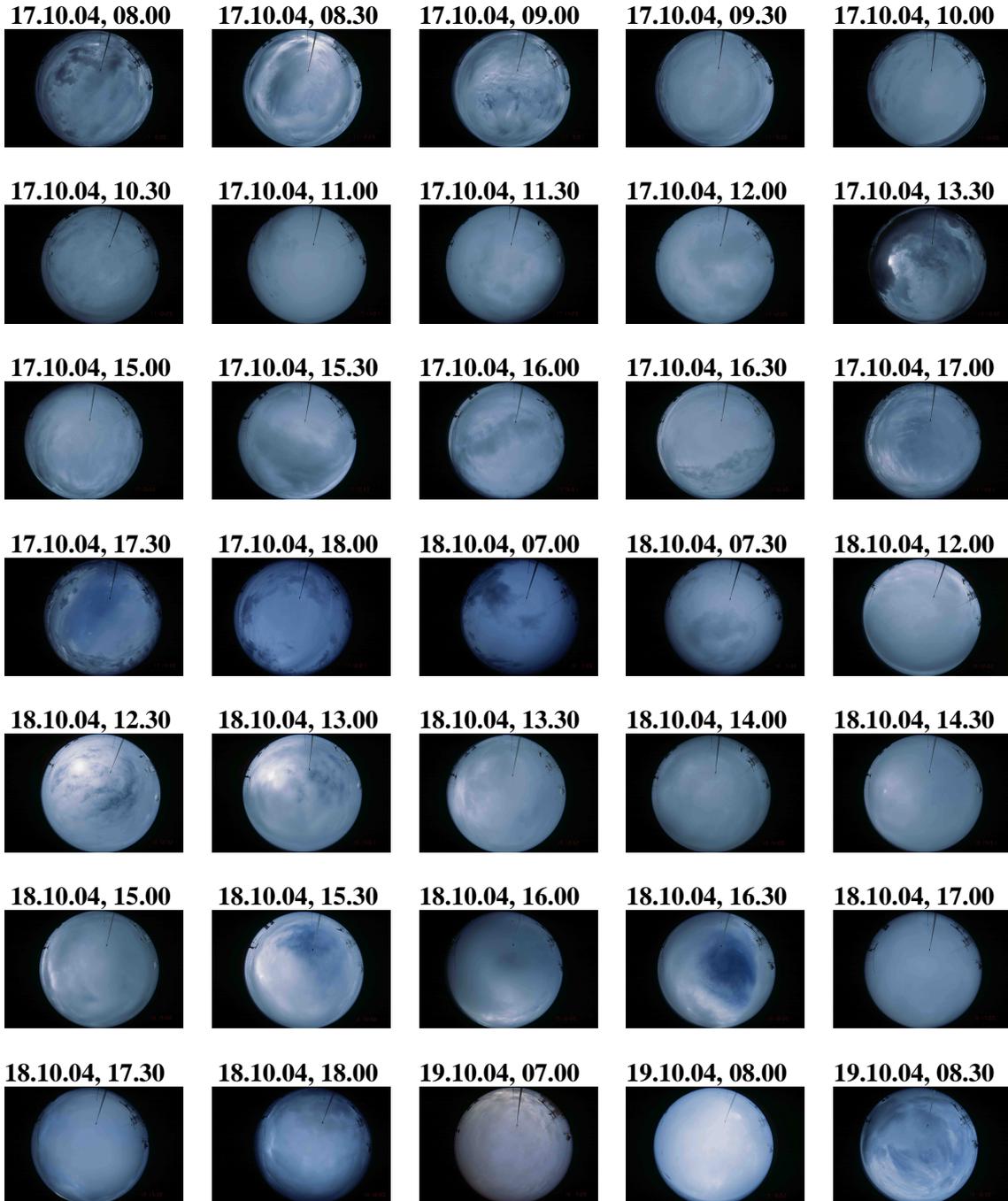
Diese Arbeit stellt den Beginn des MORE-Projektes dar. Im Oktober und November 2005 fanden Forschungsfahrten zur weiteren Aufnahme von Messdaten und Wolkenfotos von Deutschland nach Argentinien sowie nach Südafrika statt. Bis 2007 sollen Messfahrten durchgeführt werden. Die zukünftige Forschungsarbeit soll verstärkt Daten der Fernerkundung (MSG) einbeziehen. Eine Berücksichtigung der vom Ceilometer gemessenen Wolkenunterkantenhöhen in den Strahlungsparametrisierungen ist möglich. Geplant ist auch die Messung der Vertikalstruktur des Wassergehaltes der Atmosphäre durch ein Mikrowellenradiometer. Eine Ausweitung der Analysen auf die langwellige Strahlung ist noch ungewiss. Natürlich soll die Zusammenarbeit und der Erfahrungsaustausch mit den russischen Wissenschaftlern des Shirshov Institute of Oceanology aufrecht erhalten und intensiviert werden.

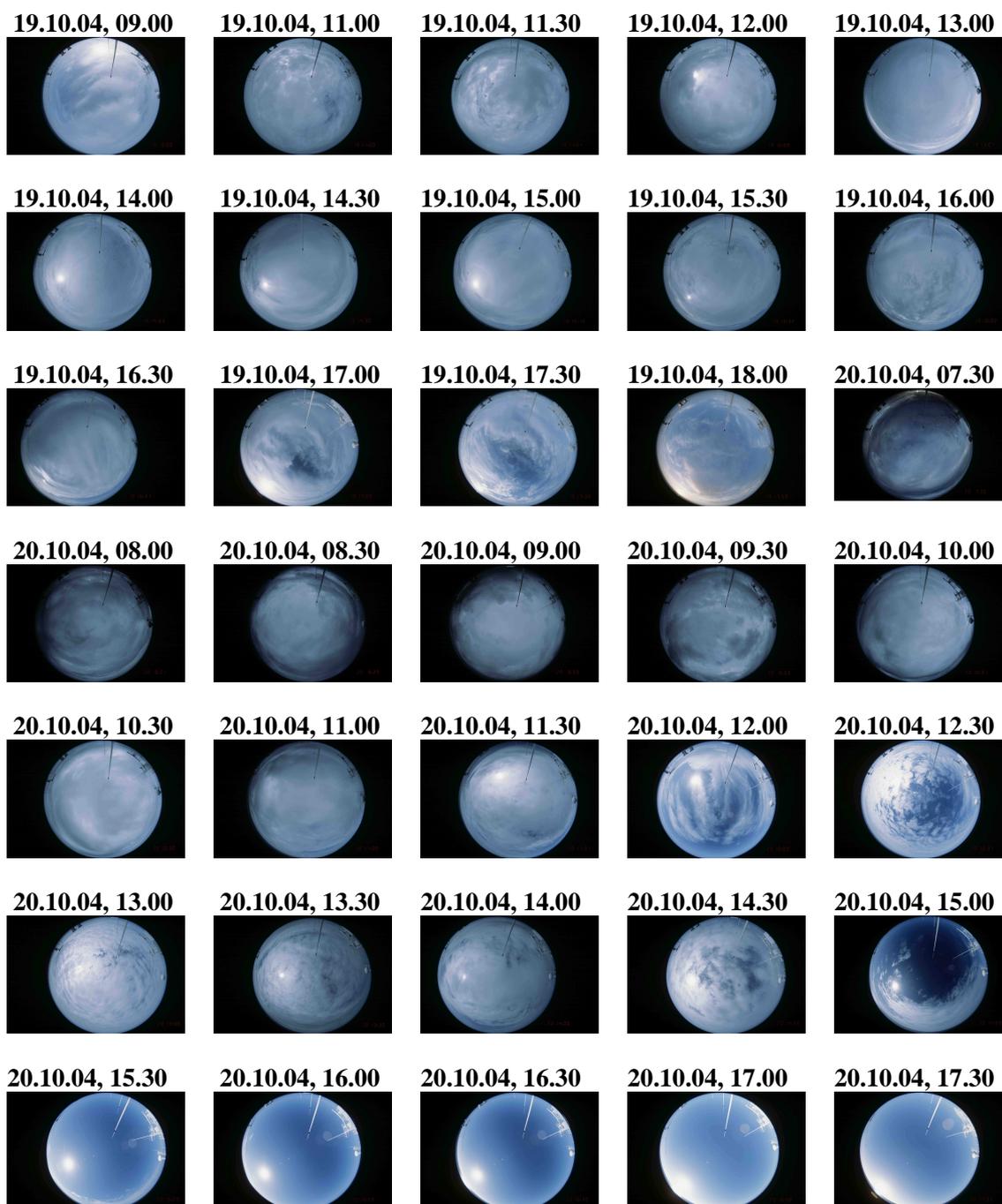
**Anhang A**

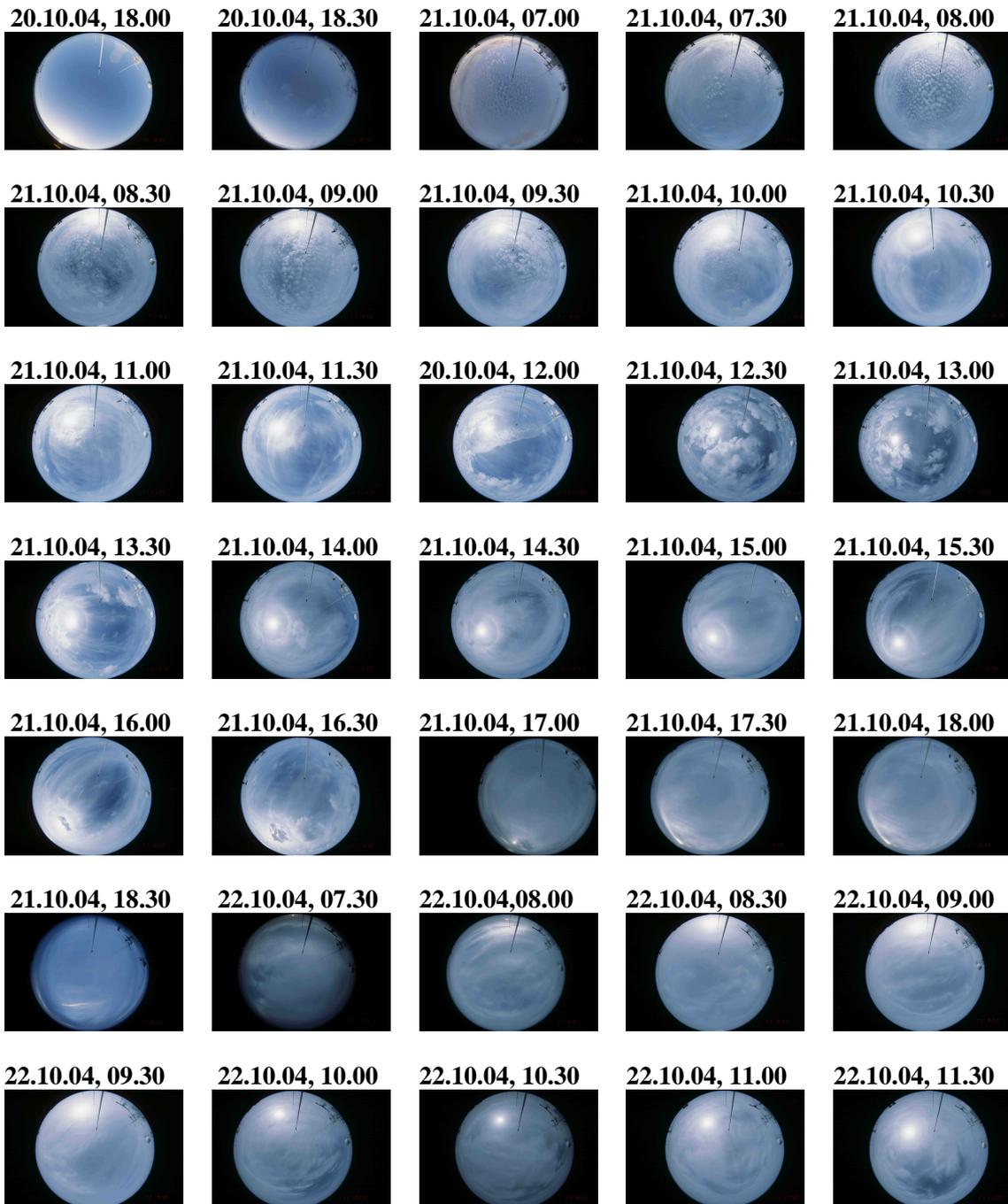
**Wolkenfotos**

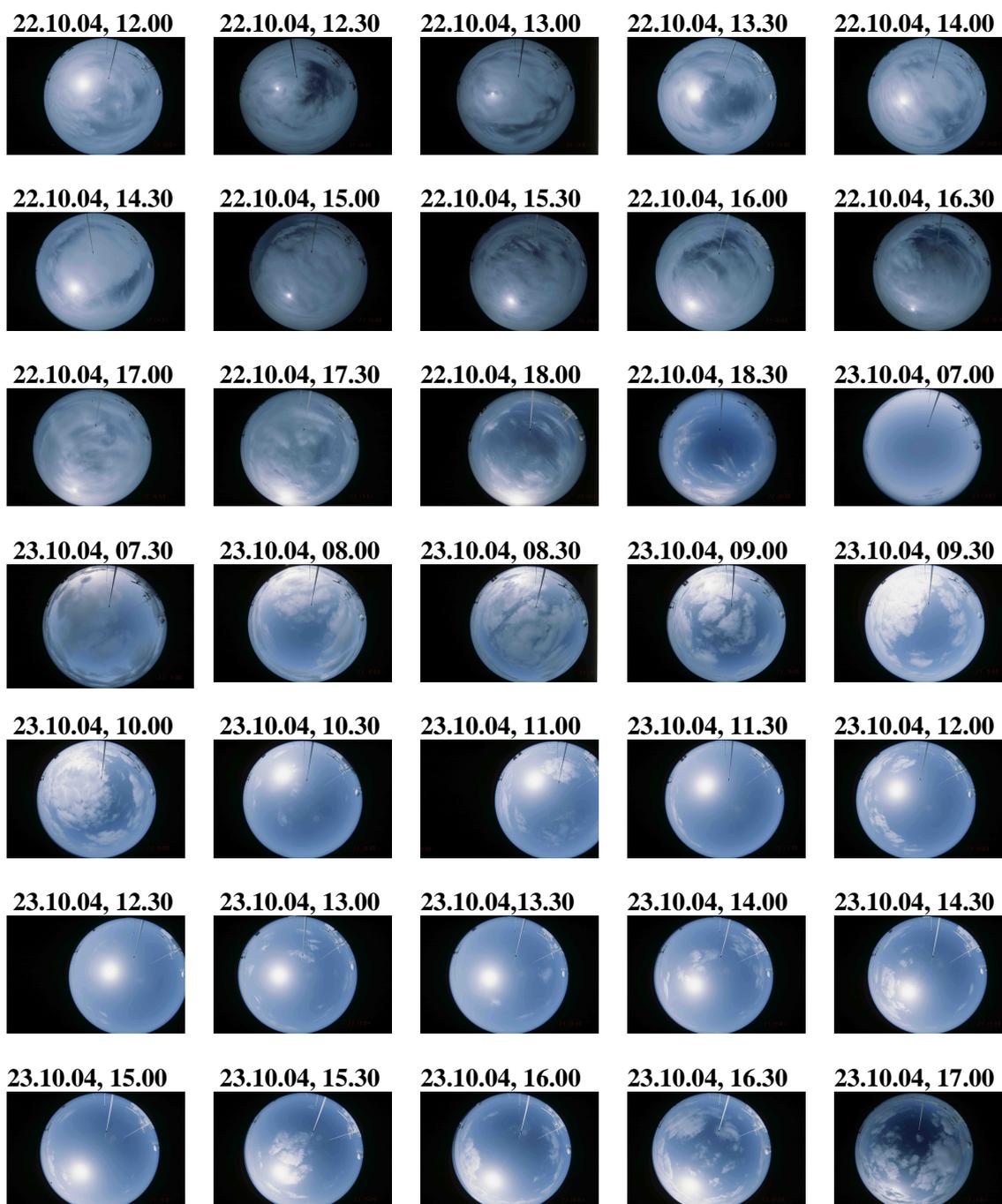


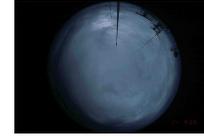
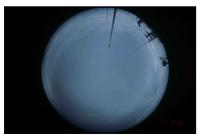
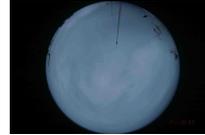
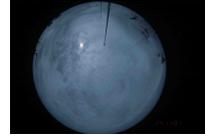
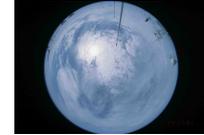
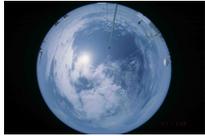
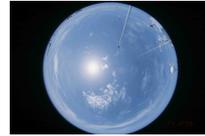
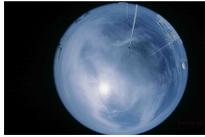
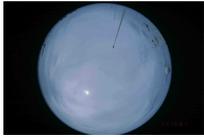
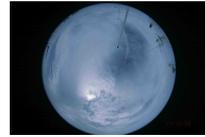
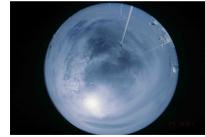
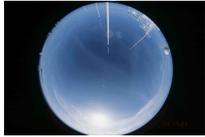
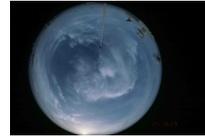
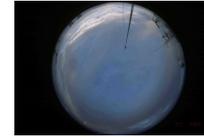
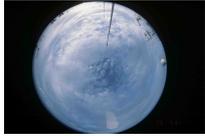
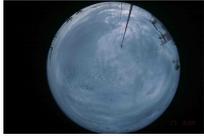
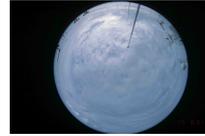
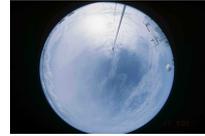


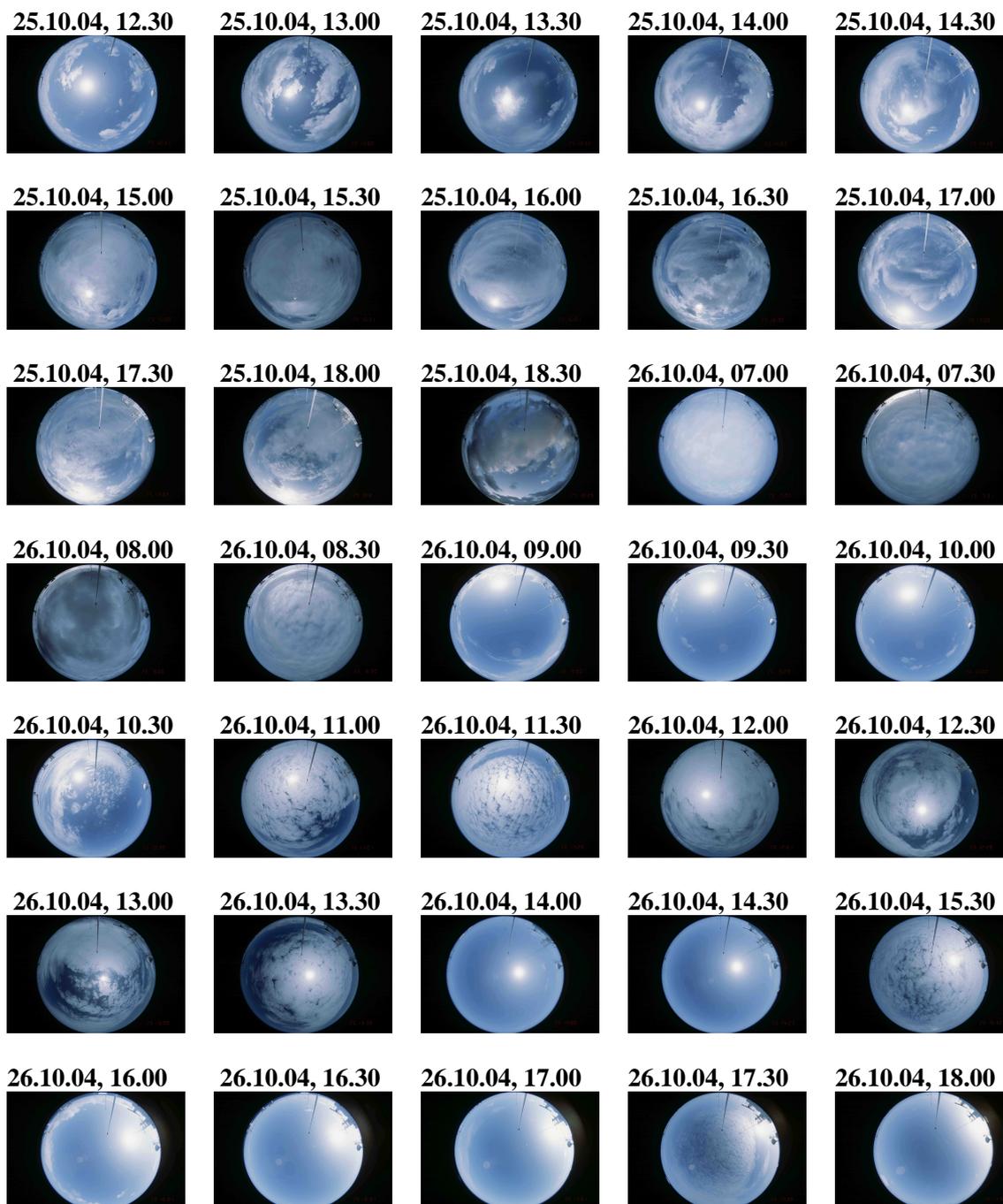


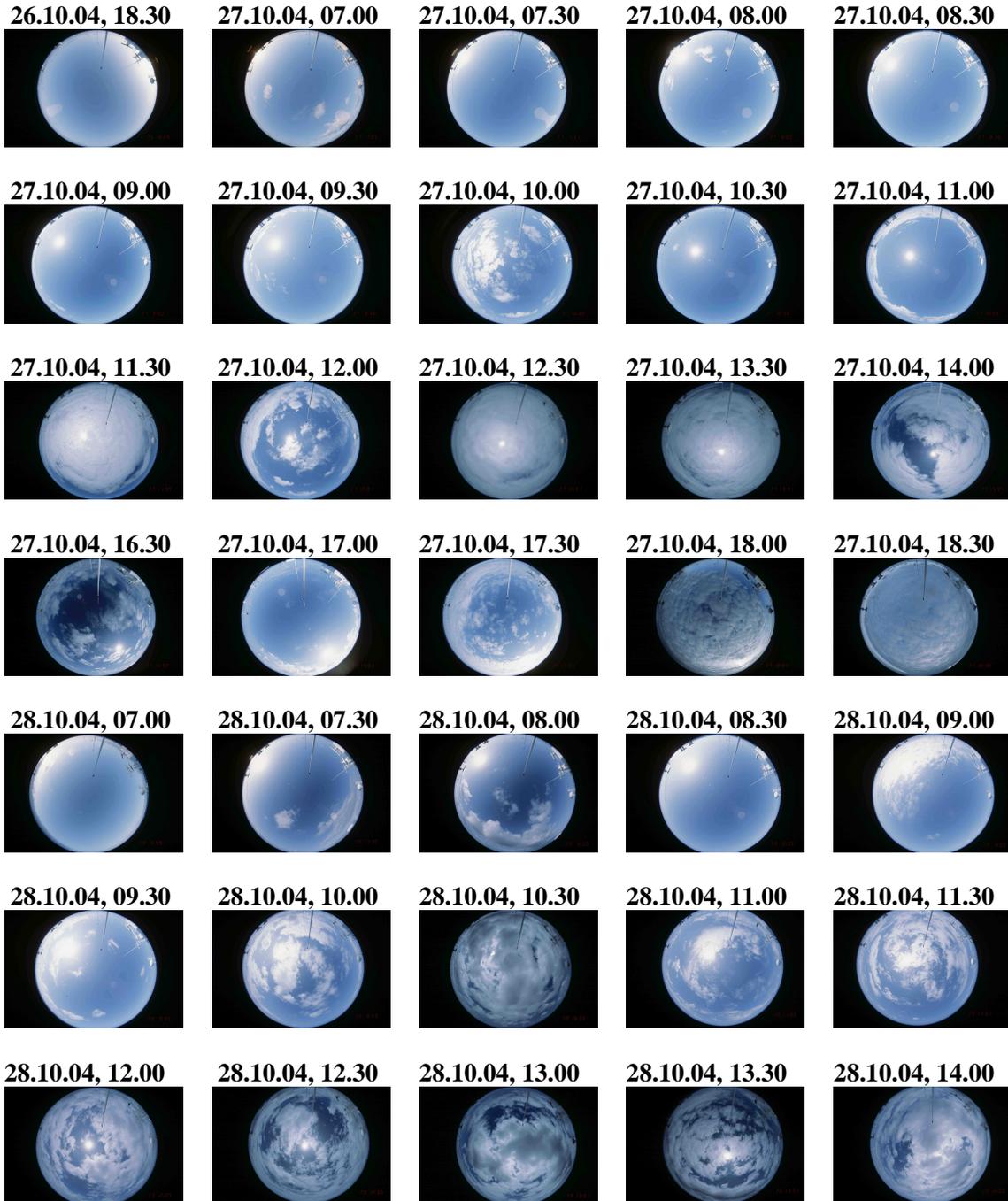


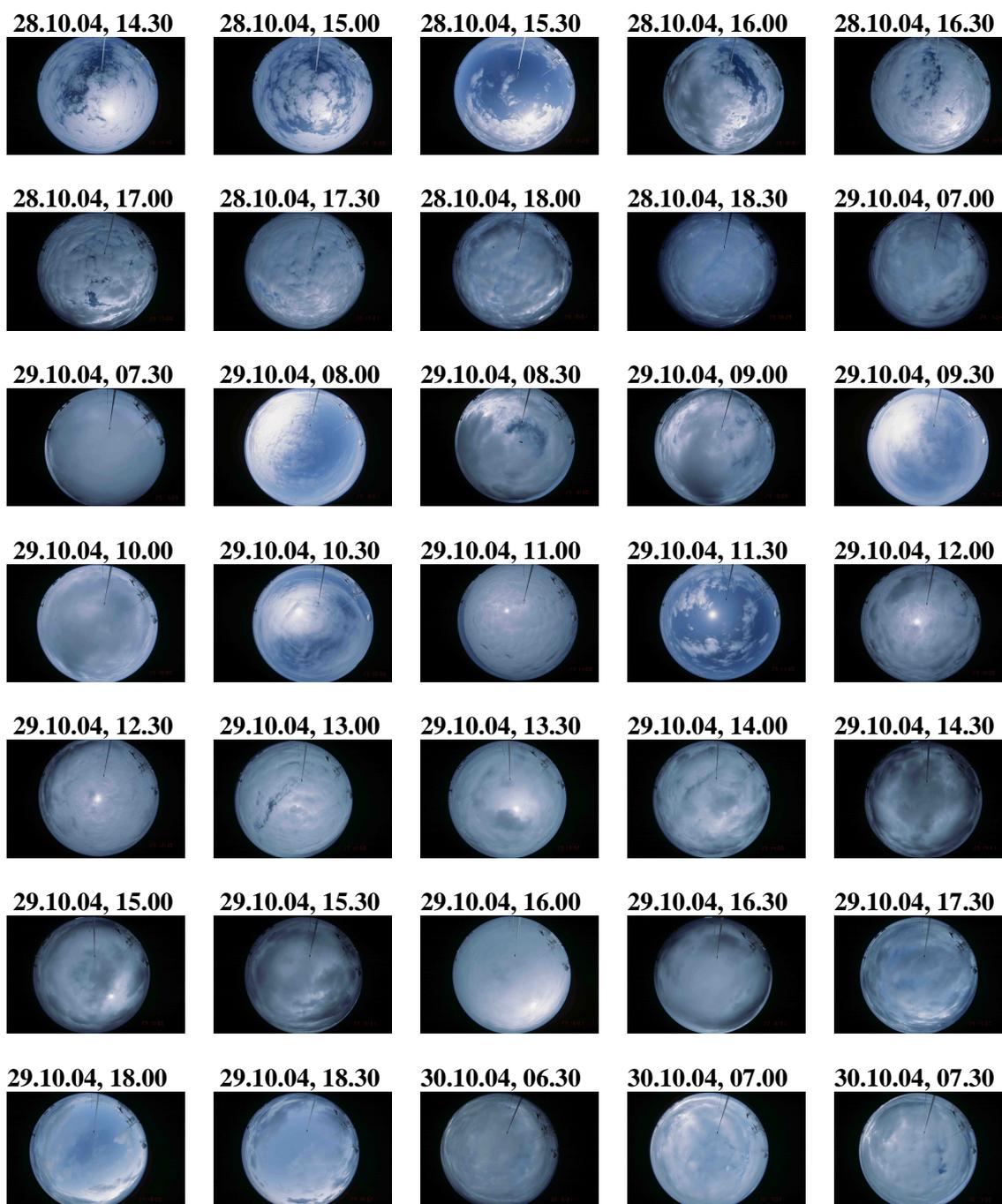


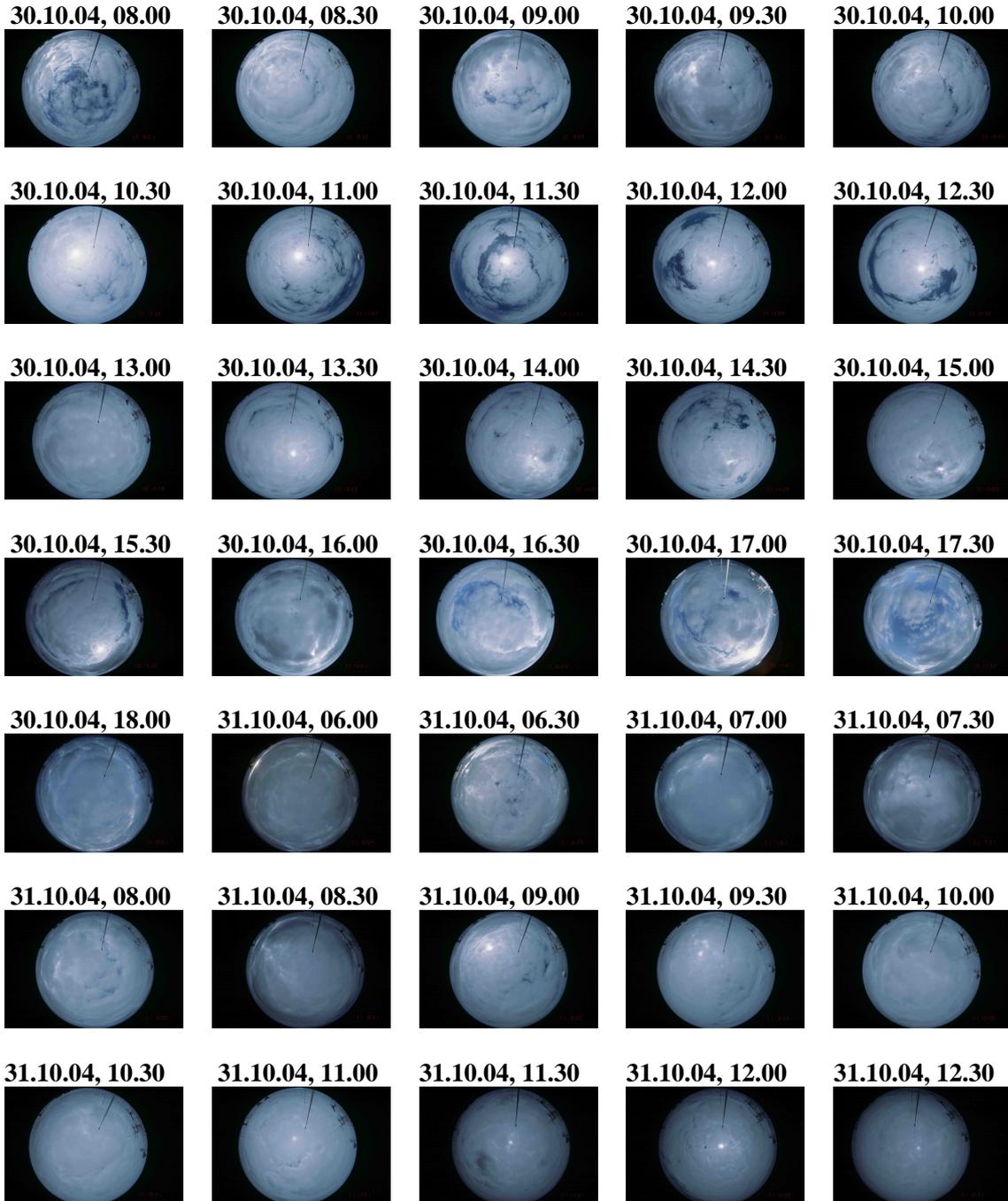


**23.10.04, 17.30****23.10.04, 18.00****23.10.04, 18.30****24.10.04, 08.30****24.10.04, 09.00****24.10.04, 09.30****24.10.04, 10.00****24.10.04, 10.30****24.10.04, 11.00****24.10.04, 11.30****24.10.04, 12.00****24.10.04, 12.30****24.10.04, 13.00****24.10.04, 13.30****24.10.04, 14.00****24.10.04, 14.30****24.10.04, 15.00****24.10.04, 15.30****24.10.04, 16.00****24.10.04, 16.30****24.10.04, 17.00****24.10.04, 17.30****24.10.04, 18.00****24.10.04, 18.30****25.10.04, 07.00****25.10.04, 07.30****25.10.04, 08.00****25.10.04, 08.30****25.10.04, 09.00****25.10.04, 09.30****25.10.04, 10.00****25.10.04, 10.30****25.10.04, 11.00****25.10.04, 11.30****25.10.04, 12.00**



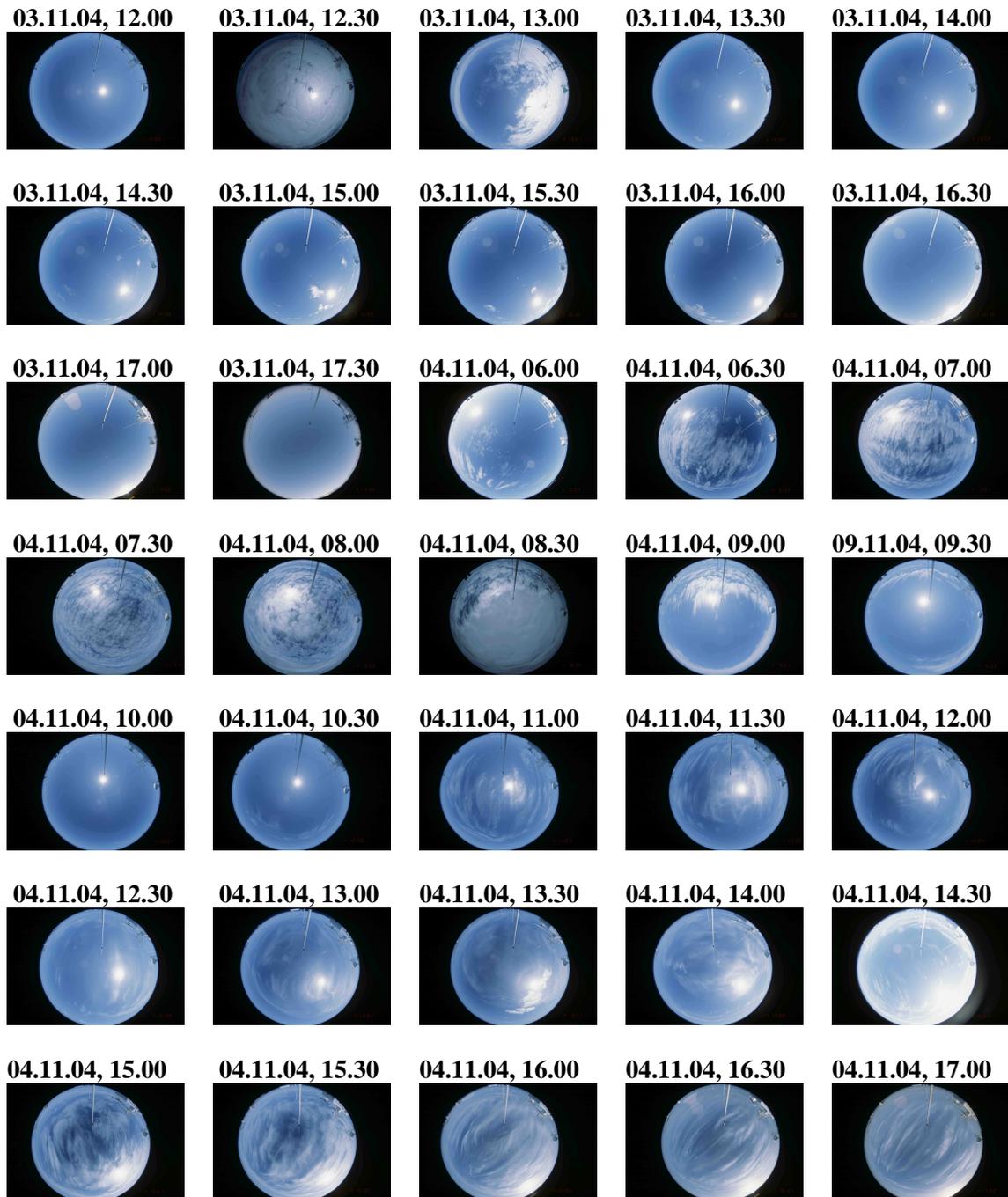








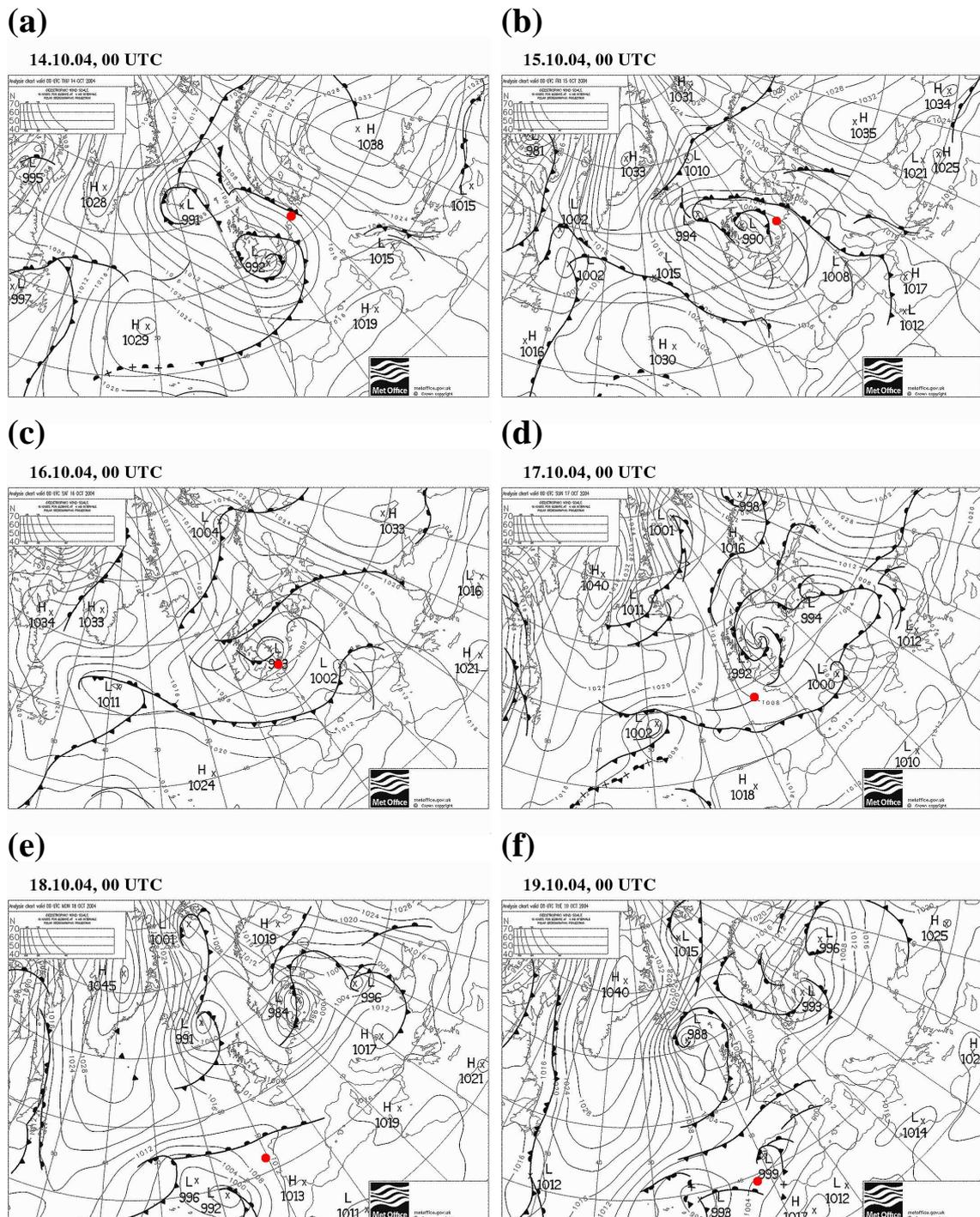




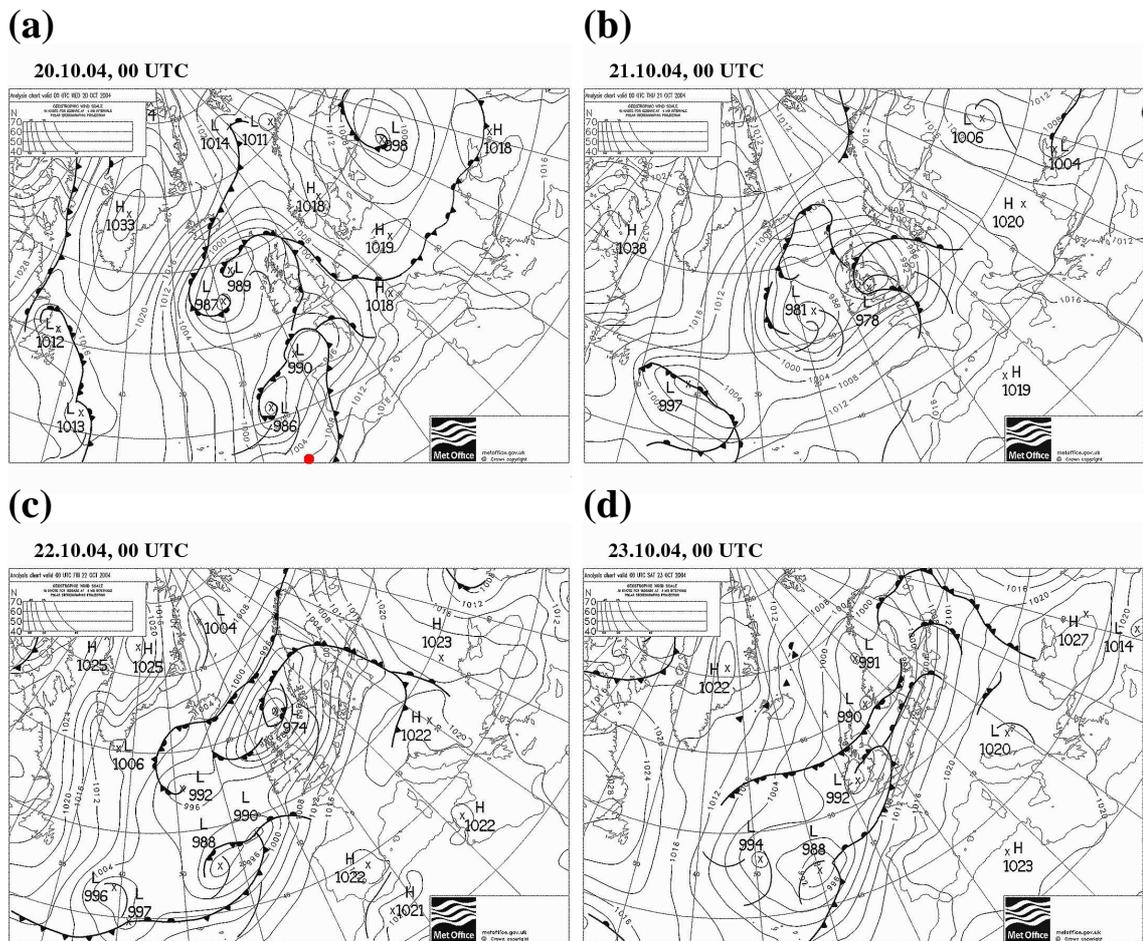


## **Anhang B**

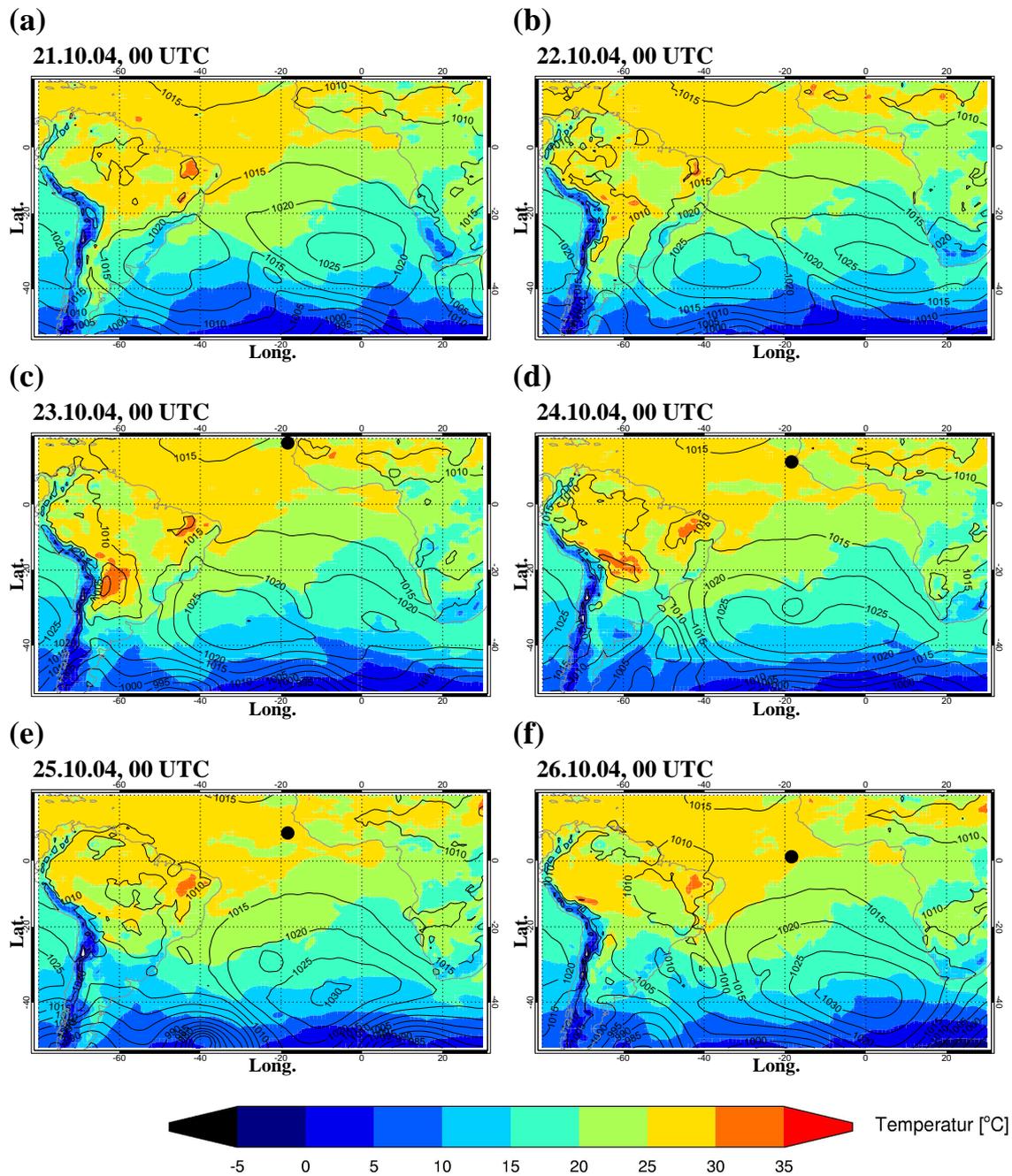
# **Ergänzungen zu Kapitel 4.5**



**Abbildung B.1:** (a) bis (f) Wetterkarten der UK Met Office (Wetterzentrale, 2005) für Europa und den Nordatlantik vom 14.10.04 bis 19.10.04. Der rote Punkt zeigt die Schiffposition.



**Abbildung B.2:** (a) bis (d) Wetterkarten der UK Met Office (Wetterzentrale, 2005) für Europa und den Nordatlantik vom 20.10.04 bis 23.10.04. Der rote Punkt zeigt in (a) die Schiffsposition, in (b) bis (d) befindet sich das Forschungsschiff südlich des Kartenausschnittes.



**Abbildung B.3:** (a) bis (f) Oberflächentemperaturfeld und Bodenluftdruck aus Analysedaten des ECMWF für den Südatlantik vom 21.10.04 bis 26.10.04. Der schwarze Punkt in (c) bis (f) zeigt die Schiffspostion.

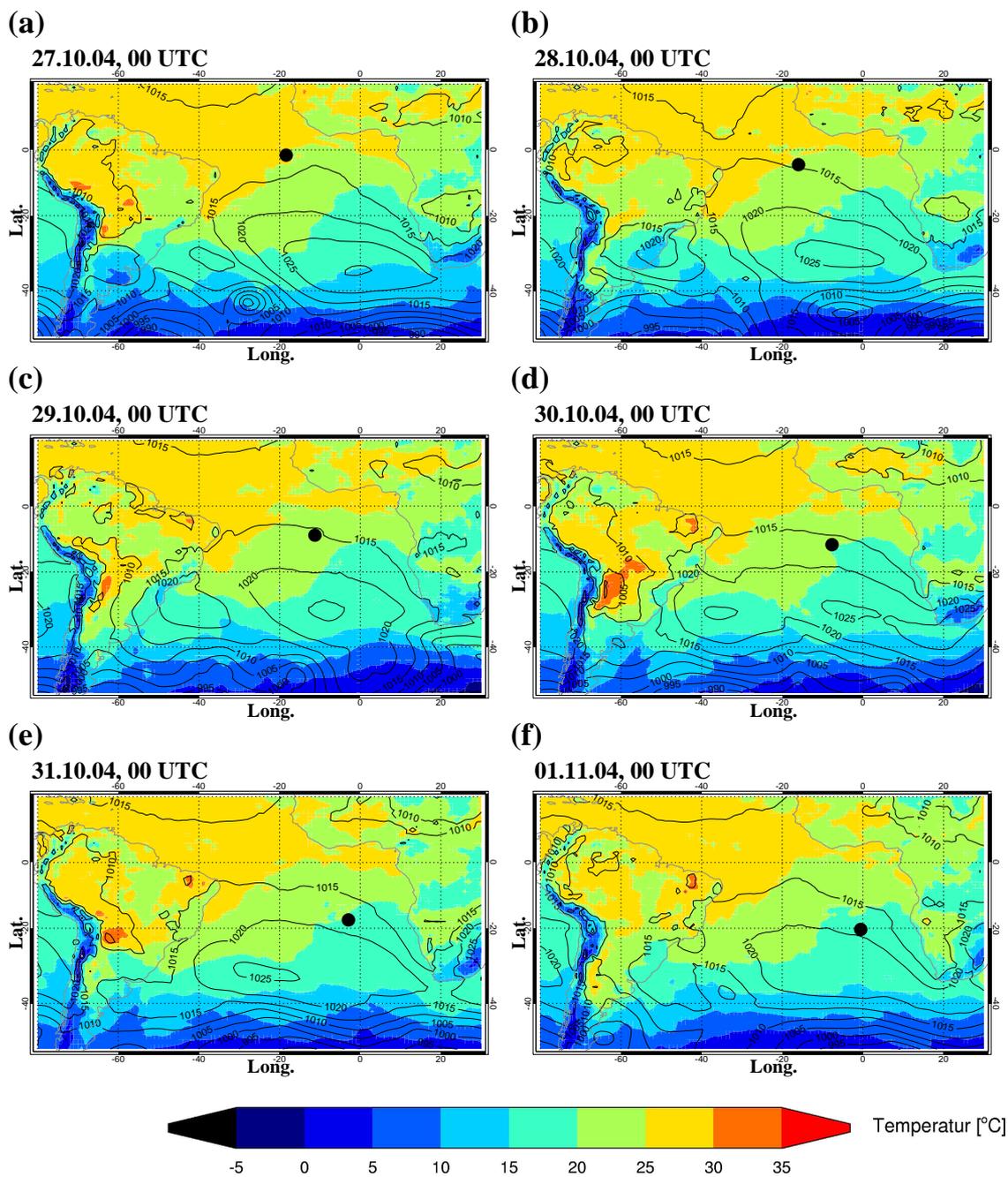
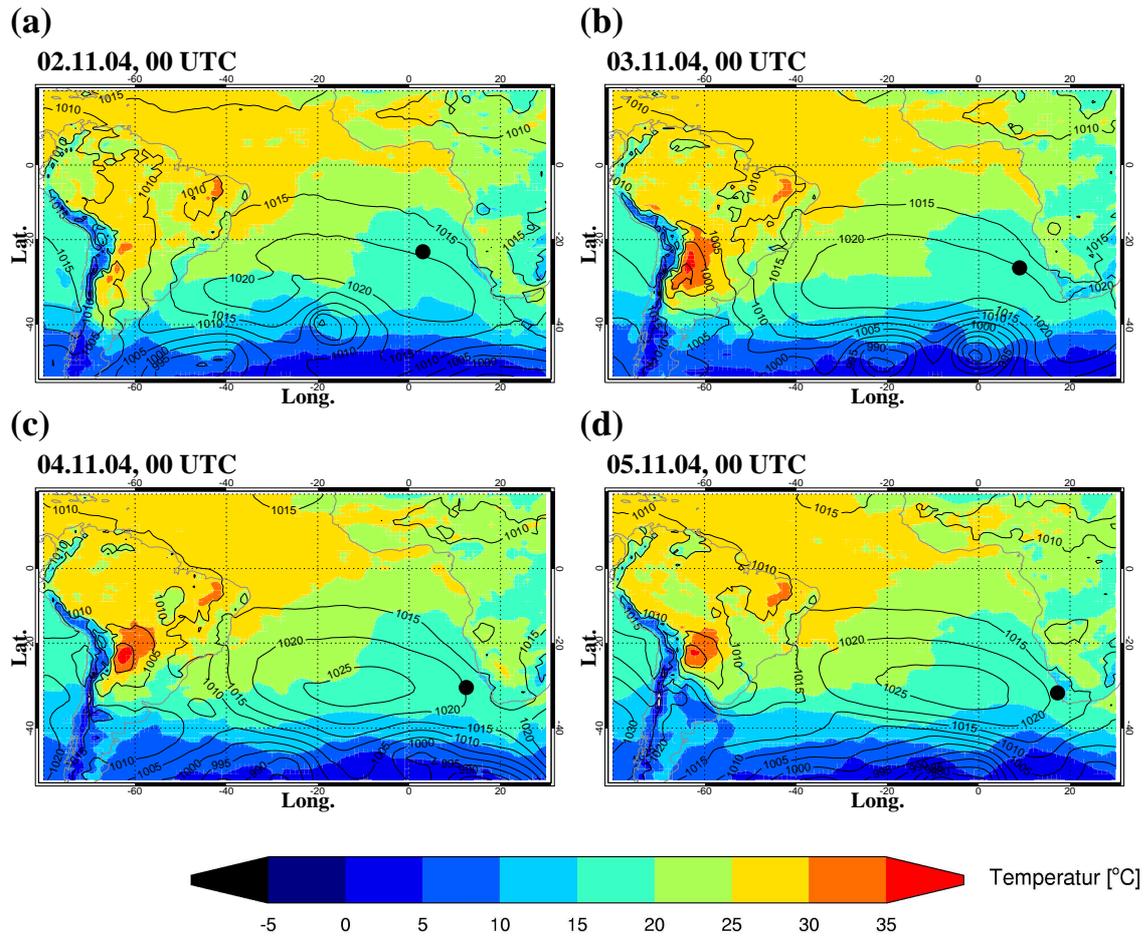


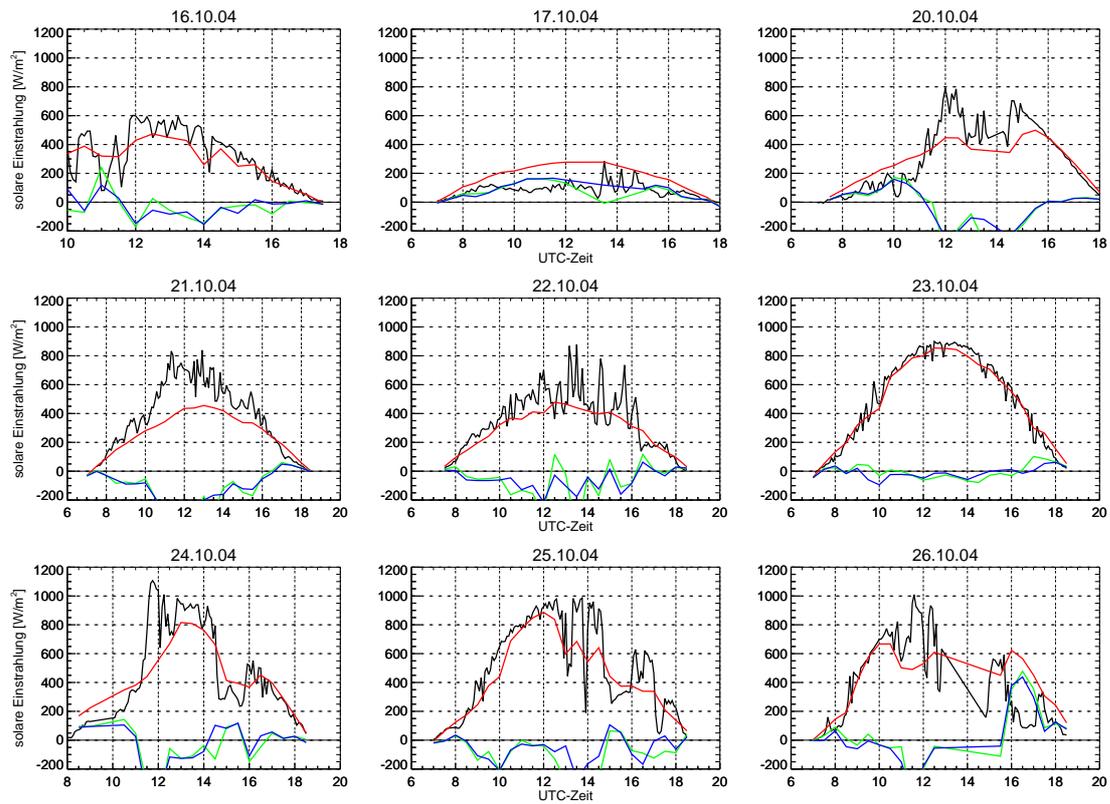
Abbildung B.4: (a) bis (f) Oberflächentemperaturfeld und Bodenluftdruck aus Analysedaten des ECMWF für den Südatlantik vom 27.10.04 bis 01.11.04. Der schwarze Punkt zeigt die Schiffposition.



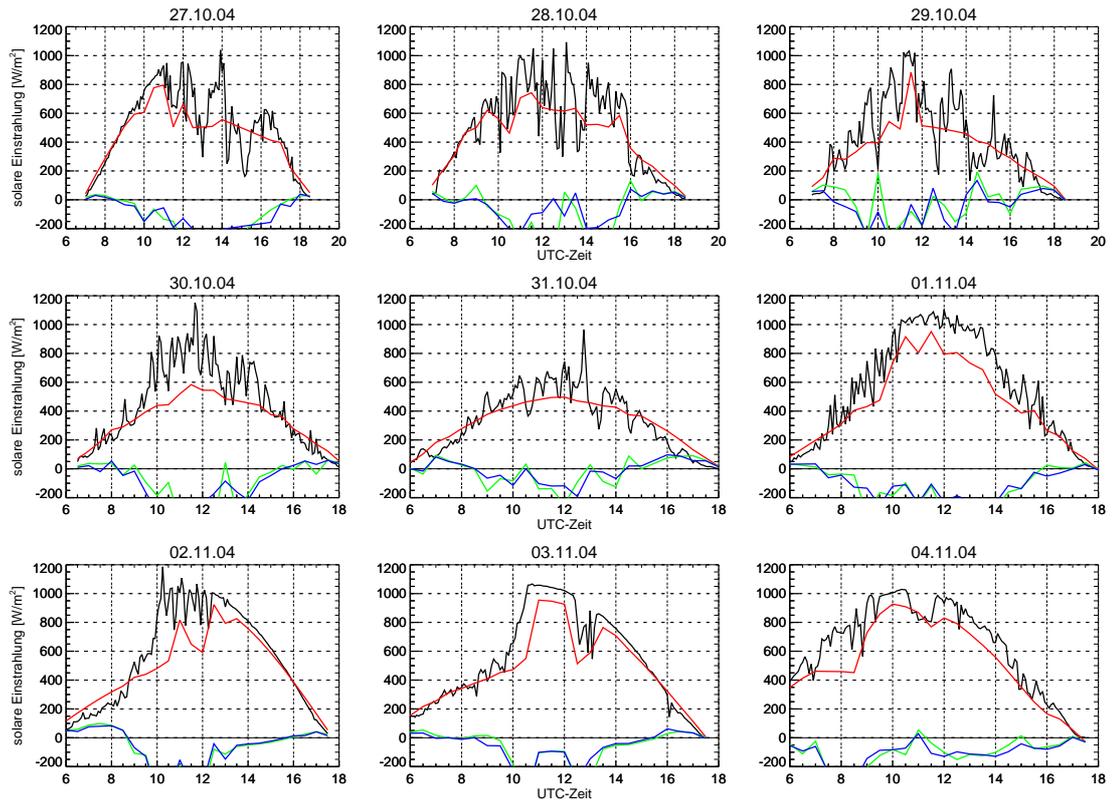
**Abbildung B.5:** (a) bis (d) Oberflächentemperaturfeld und Bodenluftdruck aus Analysedaten des ECMWF für den Südatlantik vom 02.11.04 bis 05.11.04. Der schwarze Punkt zeigt die Schiffposition.

## **Anhang C**

### **Ergänzungen zu Kapitel 6.1**



**Abbildung C.1:** Parametrisierungen solarer Einstrahlung nach Bennett (1982) für den 16.10.04 bis 26.10.04. 18. und 19.10.04 fehlen aufgrund fehlerhafter Daten. Schwarz zeigt die auf 5 Minuten gemittelte gemessene solare Einstrahlung, rot ist die parametrisierte Einstrahlung, grün die Differenz von Parametrisierungen und jeweiligem 5 - Minuten - Mittel der gemessenen Einstrahlung und blau die Differenz von Parametrisierungen und jeweiligem 30 - Minuten - Mittel der gemessenen Einstrahlung.



**Abbildung C.2:** Parametrisierungen solarer Einstrahlung nach Bennett (1982) für den 27.10.04 bis 04.11.04. Schwarz zeigt die auf 5 Minuten gemittelte gemessene solare Einstrahlung, rot ist die parametrisierte Einstrahlung, grün die Differenz von Parametrisierungen und jeweiligem 5 - Minuten - Mittel der gemessenen Einstrahlung und blau die Differenz von Parametrisierungen und jeweiligem 30 - Minuten - Mittel der gemessenen Einstrahlung.

Datum	$\overline{\Delta Q}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_5$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\overline{\Delta Q}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_{30}$ [W/m <sup>2</sup> ]
	5-min-Mittel		30-min-Mittel	
16.10.04	-31.8045	90.743	-28.1283	73.984
17.10.04	71.0743	59.528	80.0850	61.362
20.10.04	-29.6663	133.40	-22.7181	113.00
21.10.04	-104.931	113.17	-105.783	108.04
22.10.04	-60.7640	127.64	-58.4427	70.922
23.10.04	-3.66078	48.220	-11.2192	36.971
24.10.04	-40.6807	156.11	-32.9071	154.14
25.10.04	-82.7958	100.19	-58.2598	87.634
26.10.04	35.2520	206.19	23.0358	190.83
27.10.04	-82.8169	118.61	-76.6771	92.508
28.10.04	-81.9284	159.80	-49.1747	94.713
29.10.04	-15.3211	126.97	-48.7576	120.08
30.10.04	-79.3743	141.78	-91.6063	132.24
31.10.04	-21.6834	94.177	-15.1717	75.105
01.11.04	-117.453	121.22	-106.317	94.071
02.11.04	-74.2431	156.80	-69.4725	149.12
03.11.04	-61.2658	122.10	-61.5596	115.77
04.11.04	-96.5868	86.344	-102.685	79.461
gesamt	-47.1758	131.03	-45.9121	115.17

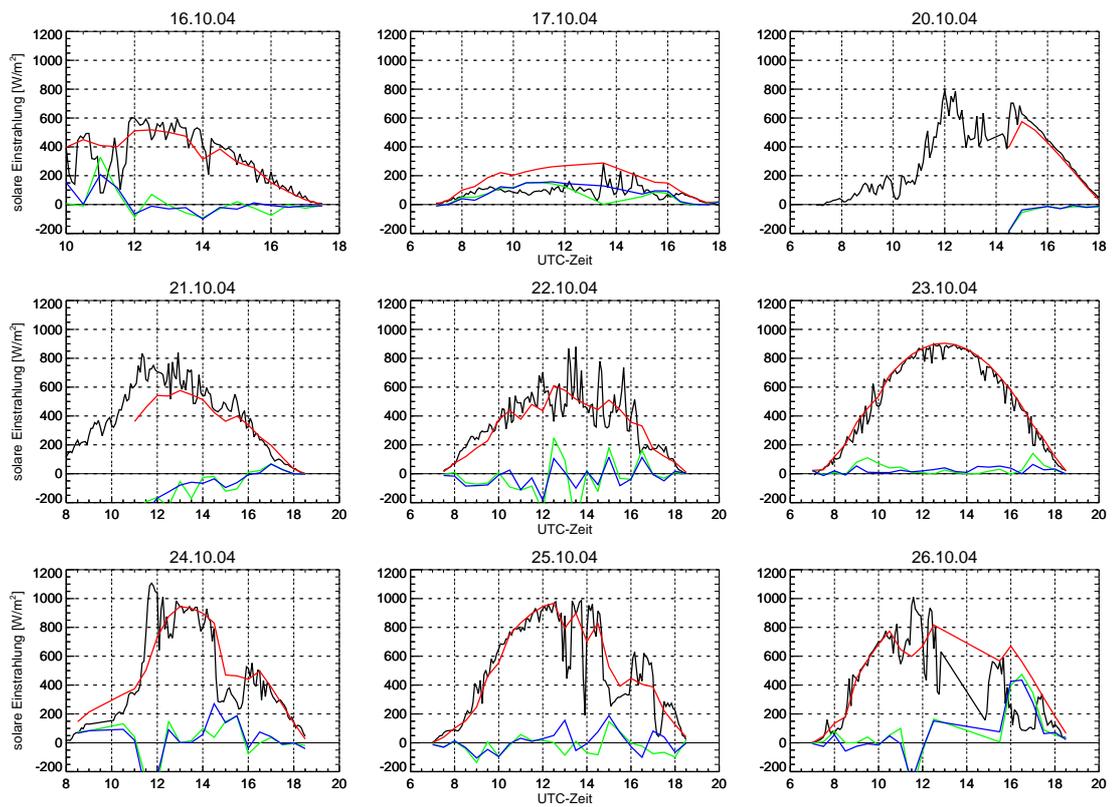
**Tabelle C.1:** Statistik der Parametrisierung nach Bennett (1982): Mittelwert  $\overline{\Delta Q}$  der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 5 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung sowie Standardabweichung  $\sigma$  der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 5 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung. In der letzten Zeile sind die Werte des gesamten Datensatzes. 18. und 19.10.04 fehlen aufgrund fehlerhafter Daten.

**Anhang D**

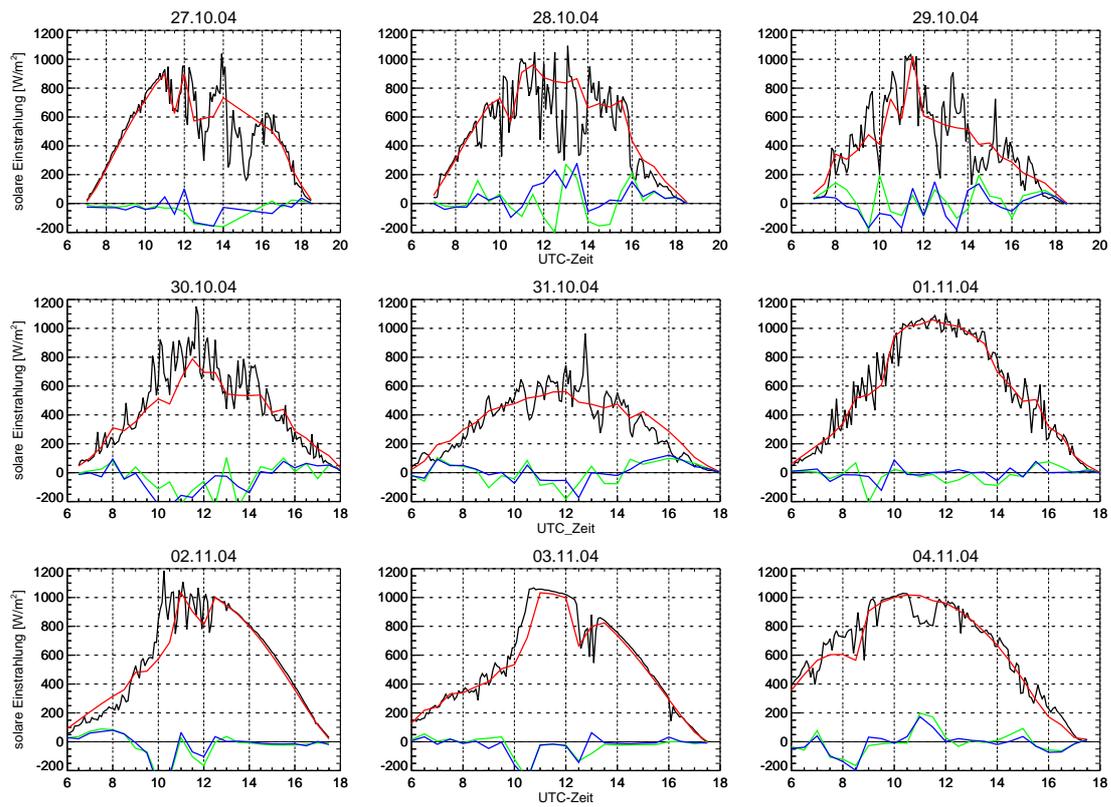
**Ergänzungen zu Kapitel 6.2**

Datum	$\overline{\Delta Q}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_5$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\overline{\Delta Q}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_{30}$ [W/m <sup>2</sup> ]
	5-min-Mittel		30-min-Mittel	
16.10.04	11.0341	99.031	14.8426	79.564
17.10.04	54.8549	50.452	64.0686	52.327
20.10.04	-35.7893	62.816	-32.4689	63.042
21.10.04	-85.1518	104.54	-83.1970	105.00
22.10.04	-39.0691	135.18	-36.4184	77.809
23.10.04	38.3168	37.159	32.0535	24.258
24.10.04	14.8630	125.59	22.7674	137.51
25.10.04	-18.7182	64.431	7.84047	74.91
26.10.04	75.6729	186.09	63.1160	171.82
27.10.04	-34.6493	63.922	-27.4766	66.938
28.10.04	16.3401	118.36	49.4513	91.939
29.10.04	7.07116	98.487	-26.2735	98.448
30.10.04	-45.5716	101.41	-56.7890	97.842
31.10.04	-22.0413	84.140	-15.0137	71.496
01.11.04	-10.7942	61.306	0.967956	49.596
02.11.04	-27.0354	95.690	-21.8390	95.967
03.11.04	-28.9135	67.149	-28.8900	76.111
04.11.04	6.80426	88.988	1.09753	83.035
gesamt	-6.12624	101.62	-3.27431	94.971

**Tabelle D.1:** Statistik der originalen Parametrisierung nach Zillman (1972): Mittelwert  $\overline{\Delta Q}$  der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 5 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung sowie Standardabweichung  $\sigma$  der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 5 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung. In der letzten Zeile sind die Werte des gesamten Datensatzes. 18. und 19.10.04 fehlen aufgrund fehlerhafter Daten.



**Abbildung D.1:** Parametrisierungen solarer Einstrahlung nach der Modifikation von Zillman (1972) für den 16.10.04 bis 26.10.04. 18. und 19.10.04 fehlen aufgrund fehlerhafter Daten.



**Abbildung D.2:** Parametrisierungen solarer Einstrahlung nach der Modifikation von Zillman (1972) für den 27.10.04 bis 04.11.04.

Datum	$\Delta\bar{Q}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_5$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\overline{\Delta Q}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_{30}$ [W/m <sup>2</sup> ]
	5-min-Mittel		30-min-Mittel	
16.10.04	6.63505	99.331	10.4435	79.858
17.10.04	65.0968	56.399	74.3105	59.658
20.10.04	-38.2970	57.219	-34.9766	57.096
21.10.04	-74.7368	100.24	-72.7820	100.30
22.10.04	-26.9943	130.91	-24.3435	73.367
23.10.04	29.3390	38.393	23.0757	20.922
24.10.04	17.4444	124.63	25.3488	133.99
25.10.04	-19.4892	63.542	7.06953	73.779
26.10.04	74.6503	180.26	62.0934	166.09
27.10.04	-36.0570	55.630	-28.8843	57.463
28.10.04	14.3986	116.97	47.5097	89.543
29.10.04	23.1126	96.585	-10.2321	93.750
30.10.04	-29.2682	98.548	-40.4856	92.751
31.10.04	-1.04370	78.155	5.98391	64.137
01.11.04	-14.8884	59.512	-3.12625	41.837
02.11.04	-25.3903	92.061	-20.1939	90.852
03.11.04	-25.5910	65.331	-25.5675	69.388
04.11.04	-4.06381	82.267	-9.77055	74.432
gesamt	-2.72448	98.255	0.127448	89.916

**Tabelle D.2:** Statistik der modifizierten Parametrisierung nach Zillman (1972): Mittelwert  $\overline{\Delta Q}$  der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 5 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung sowie Standardabweichung  $\sigma$  der Differenzen von Parametrisierung und entsprechendem 5 - oder 30 - Minuten - Mittel der gemessenen solaren Einstrahlung. In der letzten Zeile sind die Werte des gesamten Datensatzes. 18. und 19.10.04 fehlen aufgrund fehlerhafter Daten.



# Literaturverzeichnis

- Bennett, T. J., 1982. A Coupled Atmosphere-Sea Ice Model Study of the Role of Sea Ice in Climate Predictability. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 39, 1456–1465.
- Brodbeck, D. R., 2001. Die Zeitgleichung. <http://lexikon.astronomie.info/zeitgleichung>.
- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, 2003. *Nautisches Jahrbuch 2004*. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. 448 pp.
- Clemens, M., 2002. *Machbarkeitsstudie zur räumlichen Niederschlagsanalyse aus Schiffsmessungen über der Ostsee*. Doktorarbeit, Leibniz Institut für Meereswissenschaften an der Universität Kiel. 178pp.
- Darnell, W., Staylor, W. F., Gupta, S. K., Ritchey, N., und Wilber, A., 1992. Seasonal variation of surface radiation budget derived from international satellite cloud climatology project c1 data. *J. Geophys. Res.*, 97, 15741–15760.
- daSilva, A. M., Young, C. C., und Levitus, S., 1994. *Atlas of Surface Marine Data 1994*. NOAA Atlas NESDIS 7, U.S. Dept. of Commerce, NOAA, Washington D.C. (various pagination).
- Dera, J., 1992. *Marine Physics*. PWN - Polish Scientific Publishers, Warszawa.
- Dobson, F. W. und Smith, S. D., 1988. Bulk models of solar radiation at sea. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 114, 165–182.
- DWD, 1987. *Leitfaden des DWD, Nr.1: Allgemeine Meteorologie*. Deutscher Wetterdienst, Offenbach.
- Eucken, A., 1952. *Landolt-Börnstein: 3. Band, Astronomie und Geophysik*. Landolt-Börnstein: Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik, 6. Auflage.
- Großklaus, M., Uhlig, K., und Hasse, L., 1998. An Optical Disdrometer for Use in High Wind Speeds. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 15, 1051–1059.
- Heise, C., 2004. Der Einfluss durchbrochener Bewölkung auf die solare Einstrahlung: Eine Studie für Kiel, Diplomarbeit. Leibniz Institut für Meereswissenschaften an der Universität Kiel.

- Heitronics, 2005. Strahlungspyrometer-Serie KT19 II.  
<http://www.heitronics.com/german2/index.htm>. 03.12.2005.
- Josey, S. A., Kent, E. C., und Taylor, P. K., 1999. New insights into the Ocean Heat Budget Closure Problem from analysis of the SOC Air-Sea Flux Climatology. *Journal of Climate* (accepted).
- Kent, E. C., Taylor, P. K., Truscott, B. S., und Hopkins, J. A., 1993. The accuracy of Voluntary Observing Ship's Meteorological Observations. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 10, 591–608.
- Kipp & Zonen, 2002. Instruction Manual CNR 1.  
[http://www.kippzonen.com/download/kipp\\_manual\\_cnr1\\_1413.pdf](http://www.kippzonen.com/download/kipp_manual_cnr1_1413.pdf). 03.12.2005.
- Laevastu, T., 1960. Factors affecting the temperature of the surface layer of the sea. *Comment. Phys. Math.*, 25(1).
- Lind, R. J., Katsaros, K. B., und Gube, M., 1984. Radiation budget components and their parametrization in JASIN. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 110, 1061–1071.
- Liou, K. N., 2002. *An Introduction to Atmospheric Radiation..* Academic Press, London, zweite Auflage.
- Long, C. N. und DeLuisi, J. J., 1998. Development of an Automated Hemispheric Sky Imager for Cloud Fraction Retrievals. 11.-16. January 1998, Phoenix, Arizona.
- Long, C. N., Slater, D. W., und Tooman, T., 2001. Total Sky Imager Model 880 Status and Testing Results. *ARM TR-006*, Seiten 1–17.
- Lumb, F. E., 1964. The influence of cloud on hourly amounts of total solar radiation at the sea surface. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 90, 43–56.
- Malevsky, S. P., Giridiuk, G. V., und Egorov, B., 1992. Radiation balance of the ocean surface. Hydrometeozidat, Leningrad. 148 pp.
- Office of the U.S. Naval Observatory, 2003. *The Nautical Almanac 2004*. U.S. Naval Observatory.
- Reed, R. K., 1977. On Estimating Insolation over the Ocean. *J. Phys. Oceanogr*, 7, 482–485.
- Schade, N., 2005. Experimentelle Erfassung und Interpolation der solare Einstrahlung bei durchbrochener Bewölkung, Diplomarbeit. Leibniz Institut für Meereswissenschaften an der Universität Kiel.
- Shine, K. P., 1984. Parametrisation of the shortwave flux over high albedo surfaces as a function of cloud thickness and surface albedo. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 110, 747–764.
- Taylor, P. K., Bradley, E. F., Fairall, C. W., Legler, D., Schulz, J., Weller, R., und White, G., 1999. Surface Fluxes and Surface Reference Sites. In *The Ocean Observing System for Climate - Oceanobs 99*. St Raphael. 25 - 27 October 1999.

- Vaisala, 2005. CT25K Brochure in English. [www.vaisala.com/businessareas/instruments/products/cloudheight](http://www.vaisala.com/businessareas/instruments/products/cloudheight). 03.12.2005.
- Wetterzentrale, 2005. Archiv der 00 UTC UKMO-Bracknell-Bodenanalysen. <http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fsfaxsem.html>. 30.11.2005.
- White, G. H. und daSilva, A., 1999. A comparison of fluxes from the reanalyses with independent estimates. *ECMWF Reanalysis Workshop*.
- Whitlock, C. H. et al., 1995. First global WCRP shortwave Surface Radiation Budget dataset. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 76, 905 – 922.
- WMO - No.8, 1996. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. Secretariat of the World Meteorological Organisation, Geneva, Switzerland, 6. Auflage.
- 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

Herrn Prof. Dr. Andreas Macke möchte ich für die Betreuung während der Diplomarbeit, für wissenschaftliche Anregungen und ein angenehmes Arbeitsklima vielmals danken. Prof. Dr. Sergey Gulev und Alexei Sinitsyn danke ich für die Organisation der Forschungsfahrten und die gute Zusammenarbeit.

Vielen Dank auch an Prof. Dr. Carsten Stick für die astronomischen Gleichungen, Dr. Klaus Uhlig für technische Installationen, Dr. Thomas Jung und Nils Schade für die Datenbereitstellung, die Wolken- und Strahlungsgruppe für die Hilfe und gute Ideen, die Doktoranden und Diplomanden der Alten Botanik für Tipps und Gesellschaft sowie an die Crew von Vavilov und Ioffe für ihre Gastfreundschaft.

Und einen ganz lieben Dank meiner Mama.



**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, Dezember 2005

(John Kalisch)