

Experimentelle Erfassung und Interpretation der solaren Einstrahlung bei durchbrochener Bewölkung

Diplomarbeit
von
Nils H. Schade

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



Kiel, Januar 2005

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	I
Abkürzungen	III
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	6
2 Strahlung	7
2.1 Solare Strahlung	7
2.2 Streuung	9
2.2.1 Rayleigh-Streuung	9
2.2.2 Mie-Streuung	10
2.2.3 Geometrische Optik	10
3 Wolkenkamera	11
3.1 Ausrüstung	11
3.2 Kamera und CCD-Chip	13
3.2.1 Aufbau und Funktionsweise des Chips	14
3.2.2 Fehlerquellen und Grenzen der CCD-Fotografie	16
4 Meßstation und weitere Meßinstrumente	19
4.1 Messtation auf Sylt	19
4.2 Zur Funktionsweise des Ceilometers	20
4.3 Zur Funktionsweise des Pyranometers	21
5 Verarbeitung der Kameradaten	23
5.1 Maske	23
5.2 Filter	24
5.3 Wolkenerkennung	25
5.3.1 Abschätzung des Bedeckungsgrades	25
5.3.2 Bedeckungsgrad mittels menschlicher Beobachtung und Wolken- kameradaten	28
5.3.3 Zenitwinkelabhängigkeit	30

5.4	Beschreibung der Wolkeninhomogenität	34
5.4.1	Umfang/Fläche-Beschreibung	34
5.4.2	Fraktale Dimension	35
6	Verarbeitung der Strahlungsdaten	41
6.1	Anpassung der Clear-Sky Kurve	41
7	Ergebnisse	45
7.1	Fallstudien	46
7.2	Strahlungserhöhungen in Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad	50
7.3	Strahlungserhöhungen in Abhängigkeit vom solaren Zenitwinkel Θ	52
7.3.1	Einfluß des Sonnenzenitwinkels auf die Strahlungserhöhungen	54
7.3.2	Verbesserte Darstellung der Häufigkeitsverteilung des Sonnenzenitwinkels bei Strahlungserhöhungen	57
7.4	Strahlungserhöhungen in Abhängigkeit von der Art der Bewölkung	59
7.4.1	Wolken/Wolkenränder	59
7.4.2	Fraktale Box-Dimension der Wolken und Wolkenränder	61
8	Schlußbetrachtung und Ausblick	65
A	Anhang	67
A.1	Zum Kapitel 3.2.1	67
A.2	Zum Kapitel 5.3.1	68
A.3	Zum Kapitel 5.4.2	73
A.4	Zum Kapitel 7	78
A.5	Zum Kapitel 7.3.1	79
	Literatur	87
	Danksagung	91
	Erklärung	93

Abbildungsverzeichnis

1.1	Bewölkungssituation an der Küste bei Seewindverhältnissen (Heise, 2004).	2
1.2	Solare Einstrahlung: Beispiel für einen Tag mit durchbrochener Bewölkung über Land (blau) und nahezu wolkenfreiem Himmel über See (rot).	2
1.3	Bild der Wolkenkamera am 14.4.2004 um 15:28 Uhr mit typischer Seewindbewölkung.	3
1.4	Gemessene Wolkenhöhen am 14.4.2004.	4
1.5	Vergleich der gemessenen solaren Einstrahlung (rot) mit der Parametrisierung nach Bennett (blau), berechnet mit dem Bedeckungsgrad (schwarz), für den 26.06.2004.	5
2.1	Schematische Darstellung des "Broken Cloud Effekts" mit den verwendeten Messgeräten: P = Pyranometer, C = Ceilometer, WK = Wolkenkamera (Macke und Stick (2004)).	8
2.2	Schematische Darstellung der Streufunktionen für Rayleigh- (blau) und Mie-Streuung (schwarz), nach Nave (2004).	10
3.1	(a) CCD-Kamera, (b) Heizelement der Kamera, eingebaut am Boden der Transportkiste.	12
3.2	Die Wolkenkamera: (a) auf dem Dach des IFM-GEOMAR, Dienstgebäude Westufer, (b) mit geöffneter Transportkiste und Blick auf das Innenleben (CCD-Kamera).	13
3.3	Total Sky Imager (TSI).	14
3.4	Schematische Darstellung des Farbfiltermosaiks: Bayer-Pattern.	14
3.5	Photoeffekt nach A. Einstein (1905): Das einfallende Photon gibt seine Energie an ein Hüllenelektron ab, welches nun das Atom verlassen kann. Damit ist das Photon vollständig absorbiert worden.	15
3.6	Auslesemechanismus eines CCD-Chip, stark vereinfacht.	15
3.7	Überschneidungen der Farben, x-Achse: Reihenfolge der Farben auf dem Bayer-Pattern, y-Achse: ausgegebener Helligkeitswert.	16
3.8	"Blooming", verursacht durch überlaufende Pixel.	17
4.1	(a) Lage der Messstation auf Sylt (Sandmann, 2002), (b) Messstation mit links hinten: Wolkenkamera, mitte hinten: Ceilometer, rechts oben: Messplattform mit Pyranometer-Batterie.	20

4.2	Funktionsweise des Ceilometers.	21
4.3	Schematischer Aufbau eines CM21 Pyranometers (Kipp & Zonen, 2004).	21
5.1	Beispielbild der Wolkenkamera mit Maske (schwarz / rot) und Filter (grün), eingebaut vor der Berechnung des Bedeckungsgrades.	25
5.2	Wolkenkameraaufnahme für den 23.2.2004 16:56:03 Uhr (komplett unbewölkter Himmel) und Häufigkeitsverteilung des R/B-Verhältnisses. Die rote Linie markiert den Schwellwert 0.75.	26
5.3	Wolkenkameraaufnahme für den 15.2.2004 08:22:48 Uhr (komplett bewölkter Himmel) und Häufigkeitsverteilung des R/B-Verhältnisses. Die rote Linie markiert den Schwellwert 0.75.	26
5.4	links: Bedeckung ohne die zusätzliche Einbeziehung der Wolkenerkennung nach ihrer Farbe, rechts: Bedeckung nach Einbeziehung.	28
5.5	Cumulusbewölkung: (a) Originalbild, (b) Bedeckungsgradberechnung mit Maske und Filter.	28
5.6	Wolkenfreier Himmel: (a) Originalbild, (b) Bedeckungsgradberechnung mit Maske und Filter.	29
5.7	Cirrus-Bedeckung: (a) Originalbild, (b) Bedeckungsgradberechnung mit Maske und Filter.	30
5.8	Oben: Fläche, die ein Pixel am Rand sieht ($\Theta > 0$), Unten: Fläche, die ein Pixel nahe dem Bildmittelpunkt sieht ($\Theta = 0$).	30
5.9	Abgelesene Winkelabhängigkeit der einzelnen Pixel: Die Kreise markieren die Zenitwinkel im Abstand von 5°	31
5.10	Vergleich der Bedeckungsgradberechnungen mit (rot) und ohne (blau) Abhängigkeit von Θ für den 28.Juni 2004.	32
5.11	Vergleich der Bedeckungsgradberechnungen mit (rot) und ohne (blau) Abhängigkeit von Θ für den 29.Juni 2004.	32
5.12	Schema zur Überschätzung des Bedeckungsgrades bei geringer Bewölkung.	33
5.13	Wolken- (weiß) und Wolkenrandpixel (magenta) für (a) Mittlere durchbrochene Cumulusbewölkung und (b) komplett stratiforme Bewölkung.	34
5.14	(a) Schema zur Berechnung der Box-Dimension der Küstenlinie Islands, (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm: Es ergab sich eine Geradensteigung von -1,26, und damit eine Box-Dimension von $D = 1,26$	36
5.15	Berechnung der Box-Dimension der kompletten Wolkenfläche für einen klaren Himmel: (a) Originalbild der Wolkenkamera, (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit daraus berechneter Box-Dimension = 1.37 (negat. Geradensteigung).	37
5.16	Berechnung der Box-Dimension der kompletten Wolkenfläche für mittlere Bedeckung: (a) Originalbild der Wolkenkamera, (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit daraus berechneter Box-Dimension = 1.57 (negat. Geradensteigung).	38

5.17	Berechnung der Box-Dimension der kompletten Wolkenfläche für einen bedeckten Himmel: (a) Originalbild der Wolkenkamera, (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit daraus berechneter Box-Dimension = 1.64 (negat. Geradensteigung).	38
5.18	(a) Komplette Bedeckung, (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit Box-Dim. = 1.6476.	39
5.19	(a) Komplette frei (ein Pixel bedeckt, sonst kein Ergebnis), (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit Box-Dim. = 0.0533.	39
5.20	(a) Halbe Bedeckung, (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit Box-Dim. = 1.5006.	40
6.1	Schema zum Zenitwinkel "Θ" (Meyer, 2001): $\Theta \stackrel{\text{def}}{=} 0$, wenn die Sonne genau senkrecht über dem Beobachter steht.	42
6.2	Tagesgang der solaren Einstrahlung an einem Tag mit durchbrochener Bewölkung incl. Referenzwerte für den unbewölkten Fall.	43
7.1	(a) Strahlungserhöhungen und -abschwächungen in $W/m^2/1000$ (rot) sowie Bedeckungsgrade (schwarz), (b) Ceilometerdaten für den 26. Juni 2004.	46
7.2	(a) Aufnahme der Wolkenkamera vom 01.07.04, 12:37:02 MESZ, (b) daraus berechneter Bedeckungsgrad ≈ 0.396 , zugehörige Strahlungserhöhung $\approx 397.28W/m^2$	47
7.3	(a) Aufnahme der Wolkenkamera vom 01.07.04, 10:31:47 MESZ, (b) daraus berechneter Bedeckungsgrad ≈ 0.557 , zugehörige Strahlungserhöhung $\approx 481.16W/m^2$	47
7.4	(a) Aufnahme der Wolkenkamera vom 01.07.04, 11:54:32 MESZ, (b) daraus berechneter Bedeckungsgrad ≈ 0.786 , zugehörige Strahlungserhöhung $\approx 385.86W/m^2$	48
7.5	(a) Aufnahme der Wolkenkamera vom 06.07.04, 11:17:15 MESZ, (b) daraus berechneter Bedeckungsgrad ≈ 0.746 , zugehörige Strahlungserhöhung $\approx 417.69W/m^2$	48
7.6	(a) Aufnahme der Wolkenkamera vom 01.07.04, 13:00:02 MESZ, (b) daraus berechneter Bedeckungsgrad ≈ 0.761 , zugehörige Strahlungserhöhung $\approx 408.49W/m^2$	49
7.7	(a) Aufnahme der Wolkenkamera vom 15.07.04, 12:42:30 MESZ, (b) daraus berechneter Bedeckungsgrad ≈ 0.989 , zugehörige Strahlungserhöhung $\approx 472.42W/m^2$	49
7.8	Korrelation zwischen Strahlungserhöhungen und Bedeckungsgraden für den gesamten Messzeitraum.	51
7.9	Häufigkeitsverteilungen der Bedeckungsgrade bei Strahlungserhöhungen für max. B.C.-Tage (oben) und den gesamten Messzeitraum (unten).	52
7.10	Strahlungserhöhungen in Abhängigkeit vom solaren Zenitwinkel für max. B.C.-Tage (oben) und den gesamten Messzeitraum (unten).	53

7.11	Häufigkeitsverteilung des solaren Zenitwinkels bei Strahlungserhöhungen für max. B.C.-Tage (oben) und den gesamten Messzeitraum (unten). . .	54
7.12	Tagesgang des solaren Zenitwinkels für Westerland (Sandmann, 2002), Zeiten in MEZ.	54
7.13	(oben) Streudiagramm, (unten) Häufigkeitsverteilungen der Bedeckungsgrade bei Strahlungserhöhungen für Zenitwinkel von 30 - 35°.	55
7.14	(oben) Streudiagramm, (unten) Häufigkeitsverteilungen der Bedeckungsgrade bei Strahlungserhöhungen für Zenitwinkel von 45 - 50°.	56
7.15	(oben) Streudiagramm, (unten) Häufigkeitsverteilungen der Bedeckungsgrade bei Strahlungserhöhungen für Zenitwinkel von 65 - 70°.	56
7.16	Änderungen der Häufigkeitsverteilung des Sonnenzenitwinkels bei Strahlungserhöhungen > 1 - 10 % der Referenzkurve für den gesamten Messzeitraum.	57
7.17	(a) Strahlungserhöhungen und Zenitwinkel für B.C.-Tage, (b) Strahlungserhöhungen in Abh. von der Tageszeit für B.C.-Tage (oben) und Gesamtmesszeitraum (unten).	58
7.18	Mittlerer Tagesgang des Bedeckungsgrads für den gesamten Messzeitraum (Stundenmittel) für alle Bedeckungsgrade (schwarz) und Bedeckungsgrade > 0.2 (magenta).	59
7.19	Tagesgang des "Homogenitätsgrads" mit: (a) Strahlungserhöhungen ($r = -0.34$), (b) Bedeckungsgrad ($r = 0.66$).	60
7.20	Korrelation zwischen Strahlungserhöhungen $\geq 300\text{W}/\text{m}^2$ und Homogenitätsgrad.	61
7.21	Tagesgang der Strahlungserhöhungen und der Boxdimension der Wolkenfläche (unten) bzw. des Bedeckungsgrads (oben) für den 01.07.2004. . . .	62
7.22	Korrelation zwischen Strahlungserhöhungen $\geq 300\text{W}/\text{m}^2$ und der Box-Dimension der kompletten Wolkenfläche.	62
7.23	Tagesgang der Strahlungserhöhungen und der Box-Dimension der Wolkenränder (unten) bzw. des Bedeckungsgrad (oben) für den 01.07.2004. . .	63
7.24	Korrelation zwischen Strahlungserhöhungen $\geq 300\text{W}/\text{m}^2$ und der Box-Dimension der Wolkenränder.	63
A.1	(a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Berechneter Bed.-Grad = $8/8$ (0,994) , vergl. geschätzter Bed.-Grad (aus dem Originalbild) = $7/8$	68
A.2	(a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Berechneter Bed.-Grad = $7/8$ (0,932) , vergl. geschätzter Bed.-Grad (aus dem Originalbild) = $6/8$	68
A.3	(a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Berechneter Bed.-Grad = $8/8$ (0,981) , vergl. geschätzter Bed.-Grad (aus dem Originalbild) = $7/8$	69
A.4	(a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Berechneter Bed.-Grad = $7/8$ (0,819) , vergl. geschätzter Bed.-Grad (aus dem Originalbild) = $3/8$	69
A.5	(a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Berechneter Bed.Grad = $7/8$ (0,826) , vergl. geschätzter Bed.-Grad (aus dem Originalbild) = $3/8$	70

A.6	(a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Berechneter Bed.-Grad = $8/8$ ($0,997$), vergl. geschätzter Bed.-Grad (aus dem Originalbild) = $8/8$	70
A.7	(a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Berechneter Bed.-Grad = $7/8$ ($0,874$), vergl. geschätzter Bed.-Grad (aus dem Originalbild) = $7/8$	71
A.8	(a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Berechneter Bed.-Grad = $1/8$ ($0,099$), vergl. geschätzter Bed.-Grad (aus dem Originalbild) = $1/8$	71
A.9	(a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Berechneter Bed.-Grad = $1/8$ ($0,161$), vergl. geschätzter Bed.-Grad (aus dem Originalbild) = $0/8$	72
A.10	(a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Berechneter Bed.-Grad = $3/8$ ($0,389$), vergl. geschätzter Bed.-Grad (aus dem Originalbild) = $3/8$	72
A.11	(a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit daraus berechneter Box-Dimension der Wolkenfläche = 1.6347.	73
A.12	(a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit daraus berechneter Box-Dimension der Wolkenfläche = 1.6255.	73
A.13	(a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit daraus berechneter Box-Dimension der Wolkenfläche = 1.6262.	74
A.14	(a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit daraus berechneter Box-Dimension der Wolkenfläche = 1.6287.	74
A.15	(a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit daraus berechneter Box-Dimension der Wolkenfläche = 1.6281.	75
A.16	(a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit daraus berechneter Box-Dimension der Wolkenfläche = 1.6358.	75
A.17	(a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit daraus berechneter Box-Dimension der Wolkenfläche = 1.6258.	76
A.18	(a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit daraus berechneter Box-Dimension der Wolkenfläche = 1.3688.	76
A.19	(a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit daraus berechneter Box-Dimension der Wolkenfläche = 1.4919.	77
A.20	(a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit daraus berechneter Box-Dimension der Wolkenfläche = 1.5727.	77
A.21	Tagesgänge der B.C.-Tage mit maximalen Strahlungserhöhungen (rot) und den dazugehörigen Bedeckungsgraden (schwarz).	78
A.22	Ceilometerdaten für B.C.-Tage mit maximalen Strahlungserhöhungen. . .	78
A.23	Bedeckungsgrade und Strahlungserhöhungen für $\Theta = 30 - 35^\circ$: (a) Streuplot und Korrelation, (b) Häufigkeitsverteilung.	79
A.24	Bedeckungsgrade und Strahlungserhöhungen für $\Theta = 35 - 40^\circ$: (a) Streuplot und Korrelation, (b) Häufigkeitsverteilung.	79
A.25	Bedeckungsgrade und Strahlungserhöhungen für $\Theta = 40 - 45^\circ$: (a) Streuplot und Korrelation, (b) Häufigkeitsverteilung.	80
A.26	Bedeckungsgrade und Strahlungserhöhungen für $\Theta = 45 - 50^\circ$: (a) Streuplot und Korrelation, (b) Häufigkeitsverteilung.	80
A.27	Bedeckungsgrade und Strahlungserhöhungen für $\Theta = 50 - 55^\circ$: (a) Streuplot und Korrelation, (b) Häufigkeitsverteilung.	81

A.28 Bedeckungsgrade und Strahlungserhöhungen für $\Theta = 55 - 60^\circ$: (a) Streu-plot und Korrelation, (b) Häufigkeitsverteilung.	81
A.29 Bedeckungsgrade und Strahlungserhöhungen für $\Theta = 60 - 65^\circ$: (a) Streu-plot und Korrelation, (b) Häufigkeitsverteilung.	82
A.30 Bedeckungsgrade und Strahlungserhöhungen für $\Theta = 65 - 70^\circ$: (a) Streu-plot und Korrelation, (b) Häufigkeitsverteilung.	82
A.31 Bedeckungsgrade und Strahlungserhöhungen für $\Theta = 70 - 75^\circ$: (a) Streu-plot und Korrelation, (b) Häufigkeitsverteilung.	83
A.32 Bedeckungsgrade und Strahlungserhöhungen für $\Theta = 75 - 80^\circ$: (a) Streu-plot und Korrelation, (b) Häufigkeitsverteilung.	83
A.33 Bedeckungsgrade und Strahlungserhöhungen für $\Theta = 80 - 85^\circ$: (a) Streu-plot und Korrelation, (b) Häufigkeitsverteilung.	84
A.34 Bedeckungsgrade und Strahlungserhöhungen für $\Theta = 85 - 90^\circ$: (a) Streu-plot und Korrelation, (b) Häufigkeitsverteilung.	84
A.35 Bedeckungsgrade und Strahlungserhöhungen für $\Theta = 90 - 95^\circ$: (a) Streu-plot und Korrelation, (b) Häufigkeitsverteilung.	85

Tabellenverzeichnis

2.1 Einteilung der Solaren Strahlung.	8
---	---

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird der Einfluß durchbrochener Bewölkung auf die solaren Einstrahlung am Boden untersucht. Die zugrundeliegende Messkampagne wurden im Rahmen einer interdisziplinären Zusammenarbeit des Leibniz - Instituts für Meereswissenschaften (IFM-GEOMAR) mit dem Institut für Medizinische Klimatologie der Universität Kiel im Sommer 2004 (18. Juni - 16. September) auf der Nordseeinsel Sylt durchgeführt. Dabei wurde die Wolkenkamera des IFM-GEOMAR zur Erfassung der Wolken im kompletten Halbraum über der Kamera verwendet. Die notwendigen Bedeckungsgraddaten wurden mithilfe eines FORTRAN77 Programms aus den Bildern der Wolkenkamera, die alle 15 Sekunden vorliegen, bestimmt. Aufgrund von Streulichteinflüssen durch die verwendete Acrylkuppel und der relativ geringen Auflösung der Helligkeitswerte sind die Kameradaten fehlerbehaftet und bedurften einer genauen Nachbetrachtung.

Dank der hochaufgelösten 2-sekündlichen Strahlungsmessungen konnten Strahlungserhöhungen von bis zu 481 W/m^2 gegenüber der theoretischen Referenzstrahlung bei wolkenfreiem Himmel festgestellt werden. Die maximalen Werte traten bei recht unterschiedlichen Bedeckungssituationen auf, wobei eine Korrelation von 0,4 zwischen Strahlungserhöhungen und Bedeckungsgrad bestimmt wurde. Im Mittel wurden die stärksten Strahlungserhöhungen bei etwa 84 % Bedeckung erreicht, was mit den Ergebnissen von Estupinan et al. (1996) übereinstimmt.

Die Bestimmung der Wolkenstruktur aus den Kameradaten wurde mithilfe einer Fläche/Umfang-Beschreibung der Wolken, dem Homogenitätsgrad ' HG ', und der fraktalen Box-Dimension ' D ' versucht. Die Ergebnisse scheinen den von Sabburg und Wong (2000) gefundenen Zusammenhang zwischen Strahlungserhöhung und Wolkentyp zu stützen. Hiernach treten die maximalen Werte bevorzugt bei cumulusartiger Bewölkung in den unteren und Cirren in den hohen Schichten auf. Die Cirruswolken führen dabei zu einer erhöhten diffusen Strahlung und somit auch zu einer erhöhten Reflexion an den Wolkenseiten der tieferen Cumuluswolken. Die Korrelation zwischen Strahlungserhöhungen $\geq 300 \text{ W/m}^2$ und HG sind allerdings mit Werten von 0.2 nicht aussagekräftig. Die Berechnungen der fraktalen Box-Dimension scheinen zudem noch fehlerbehaftet und bedürfen näheren Untersuchungen. Weiterführende Untersuchungen am IFM-GEOMAR mit einer verbesserten Kamera sollten künftig deutlichere Ergebnisse liefern.

Abkürzungen

3D	dreidimensional
APCADA	Automatic Partial Cloud Amount Detection Algorithm
ARM	Atmospheric Radiation Measurement Program
ASC	All Sky Camera
DWD	Deutscher Wetterdienst
FSI	Full Sky Imager
IFM-GEOMAR	Leibniz - Institut für Meereswissenschaften Kiel
IR	Infra-Rot
LDR	Longwave Downward Radiation
LIDAR	Light Detecting and Ranging
NIR	Nahes Infra-Rot
RADAR	Radio Detecting and Ranging
TSI	Total Sky Imager
UV	Ultra-Violett
VIS	Sichtbares Licht ("Visible")
WSI	Whole Sky Imager

1. Einleitung

“Als ich jetzt in den Tropen war, hatte ich trotz Bewölkung einen ordentlichen Sonnenbrand”

(Lars Reuning, 2004)

1.1 Motivation

Dieses Problem dürften viele Urlauber weltweit kennen. *“Wolken”,* werden sie sagen, *“Wolken schirmen doch die Strahlung ab, da ist die Gefahr doch geringer, einen Sonnenbrand zu bekommen, als unter klarem Himmel.”*

Damit haben sie zwar recht, was die Absorption durch die Wolken betrifft, sie unterschätzen dabei aber die Wirkung der Wolken als streuendes Medium, gerade an Tagen mit sog. *“durchbrochener Bewölkung”* aus Schönwetter-Cumuli. Diese reflektieren die solare Strahlung auch an ihrer Oberseite zurück in den Weltraum, doch an den weißen Wolken wird ebenfalls solare Strahlung in Richtung Erdboden gestreut. Dort würde ein Strahlungsmessgerät sowohl die direkte solare Einstrahlung, als auch die stark diffuse Strahlung der Wolken messen. Diese Summe ist grösser als die aus direkter Einstrahlung und der diffusen Strahlung des blauen Himmels, und somit auch die Gefahr, einen Sonnenbrand zu bekommen.

Hinzu kommt möglicherweise noch ein kühler Seewind, der das Temperaturempfinden beeinflusst. Seewind tritt auf, wenn sich die Luft über Land an einem warmen Tag deutlich stärker erwärmt als über dem Meer und dadurch ein Aufsteigen der Luftmassen über Land erfolgt. Es bildet sich eine typische Konvektionsbewölkung aus (Cumulusbewölkung, s.o.). Zugleich setzt der relativ kühle Seewind ein, der für eine Ausgleichsströmung von der See aufs Land sorgt (DWD, 1987). Dabei ergibt sich folgendes Bild: Die Wolkenbildung erfolgt nur über Land, wo die erwärmten Luftmassen aufsteigen, über dem Meer hingegen sinken die kühleren Luftmassen ab und führen dem Seewind Nachschub zu. Es können sich hier also keine Wolken bilden (siehe Abb. 1.1).

Sehr schön ist dieser Effekt in Kiel zu beobachten. Durch die zwei Meßstationen auf



Abbildung 1.1: Bewölkungssituation an der Küste bei Seewindverhältnissen (Heise, 2004).

dem Kieler Leuchtturm, der in der Kieler Förde steht, und auf dem Dach des IFM-GEOMAR, Dienstgebäude Westufer, ist es möglich, zeitgleich solare Strahlungsmessungen über Land und Meer zu erhalten. Ein Beispiel zeigt Abbildung 1.2 für den 14. April 2004:

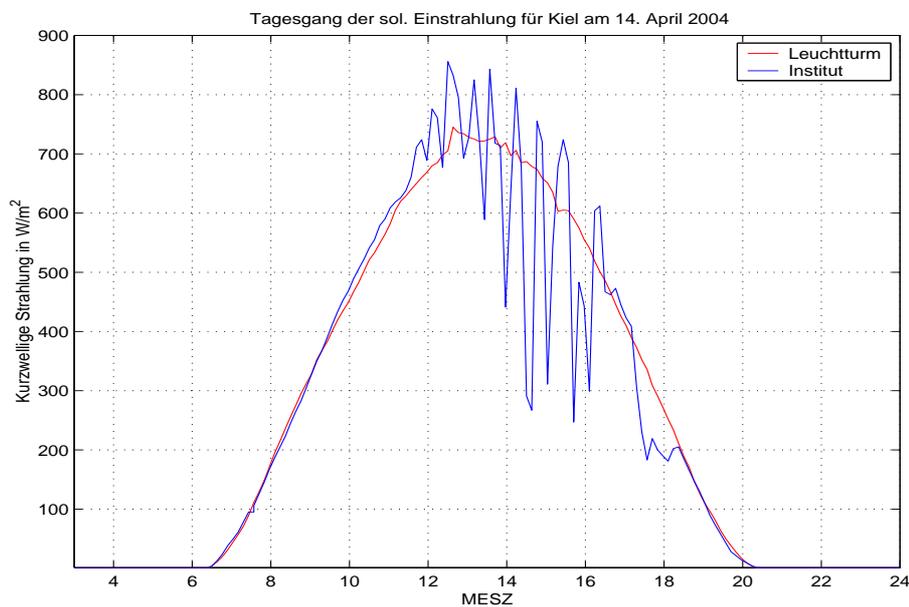


Abbildung 1.2: Solare Einstrahlung; Beispiel für einen Tag mit durchbrochener Bewölkung über Land (blau) und nahezu wolkenfreiem Himmel über See (rot).

Folgt die Kurve der solaren Einstrahlung am Leuchtturm noch recht gut dem theoretisch zu erwartenden Tagesgang bei wolkenlosem Himmel, der sich hauptsächlich aus

der geographischen Lage Kiels sowie dem genauen Zeitpunkt ergibt, so zeigt sich der Einfluß der Bewölkung in der Kurve für die Institutsmessung als doch deutliche Erhöhungen bzw. Abschwächungen der Einstrahlung, beginnend gegen Mittag bei Einsetzen des Seewindes. Erst gegen Abend, wenn die Erwärmung nachläßt und ein Temperaturausgleich stattgefunden hat, verlaufen beide Kurven wieder nahezu aufeinander.

Zur Veranschaulichung zeigt Abb. 1.3 eine Aufnahme der Wolkenkamera auf dem Institutsdach des IFM-GEOMAR, Dienstgebäude Westufer, aufgenommen zur Zeit der Strahlungserhöhung gegen 15:28 Uhr. Dokumentiert wird die vorhandene Bewölkung, eben Cumuluswolken, resultierend aus der aufsteigenden Luftbewegung über Land. Abbildung 1.4 zeigt dazu die Ceilometerdaten (siehe Kapitel 4.2) des 14. April in Form der Höhe der Bewölkung, in diesem Fall ausschließlich vereinzelt und tiefe Wolken mit Unterkantenhöhen $< 500\text{m}$, was auf Cumulusbewölkung hinweist.

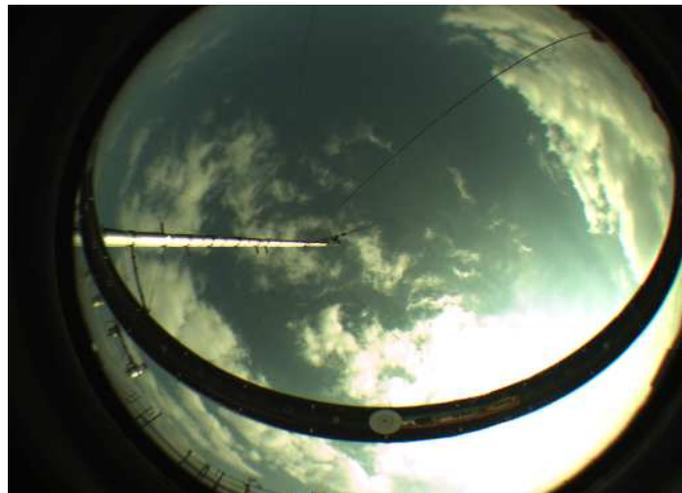


Abbildung 1.3: Bild der Wolkenkamera am 14.4.2004 um 15:28 Uhr mit typischer Seewindbewölkung.

Ein großes Ziel der Atmosphärenforschung ist es, Wolken und ihren Einfluß auf die Strahlungsbilanz besser darstellen zu können. In den bisherigen Klimamodellen bilden sie eine bedeutende Fehlerquelle, da sie noch stark vereinfacht dargestellt werden müssen. Parametrisierungen der einfallenden solaren Strahlung benötigen neben der Strahlung selbst verschiedene Eingangsgrößen wie Bedeckungsgrade, optische Dicken, Wolkenarten, etc. und sind diesen gegenüber sehr sensibel. Daher ist es wichtig, diese Eingangsgrößen möglichst genau bestimmen zu können, um realistische Parametrisierungen entwickeln zu können.

Daß einfache Parametrisierungen mitunter sehr schlechte Ergebnisse liefern, soll Abbildung 1.5 zeigen. Hier werden für einen Beispieltag, den 26. Juni 2004, die gemessenen

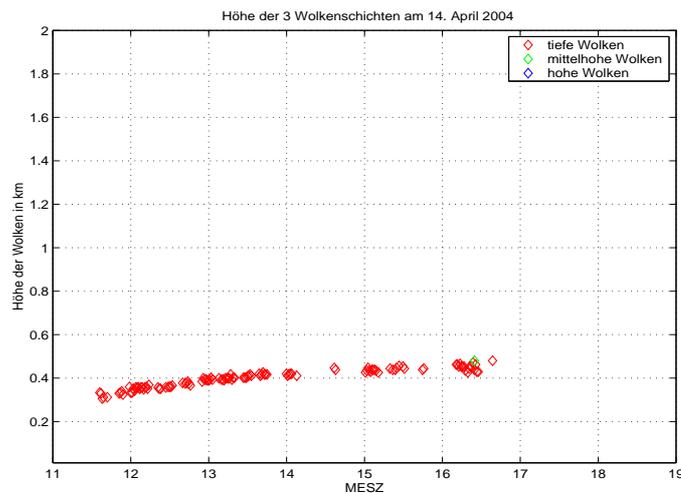


Abbildung 1.4: Gemessene Wolkenhöhen am 14.4.2004.

Strahlungswerte mit der Strahlungsparametrisierung nach Bennett (1982) verglichen. Als Eingangsgröße für diese Parametrisierung geht neben der Solarkonstante S_0 und dem solaren Zenitwinkel Θ nur noch der Bedeckungsgrad A_c in die Berechnung ein (Frerichs, 1999):

$$F_s(A_c) = 0.72 \cdot S_0 \cdot \cos(\Theta) \cdot (1.0 - 0.52 \cdot A_c) \quad (1.1)$$

Man erkennt deutlich, daß die Minima und Maxima der gemessenen Einstrahlung von der Parametrisierung $F_s(A_c)$ nicht wiedergegeben werden, die Kurve der parametrisierten Strahlung verläuft viel zu glatt. Erst ab etwa 17 Uhr MESZ wirkt sich der Bedeckungsgrad auf die Parametrisierung aus, und zumindest die Positionen einiger Maxima werden errechnet, keinesfalls aber ihre Stärke.

Zahlreiche Strahlungstransport-Modelluntersuchungen zum Thema “Durchbrochene Bewölkung” wurden bereits angestellt. So haben Barker et al. (1998) den Einfluß dreidimensionaler Wolken auf die atmosphärische Absorption des solaren Strahlungsflusses mithilfe eines Monte Carlo Modells untersucht. Dabei wurden Satellitenbilder (Landsat) und ein Wolkenmodell als Eingangsgrößen für die Wolken benutzt. Coley und Jonas (2001) benutzten ein Monte Carlo Modell mit idealisierten Wolken und simulierten Wolkenfeldern zur Berechnung der kurzwelligen Reflektion, Hignett und Taylor (1996) fanden eine starke Sensitivität der Strahlungseigenschaften gegenüber der Verteilung der Wolken. Lane et al. (2002) haben im Rahmen des *Atmospheric Radiation Measurement* (ARM) Programms ihre von Modellen berechneten Daten mit Beobachtungen verglichen und festgestellt, daß die Modelle nicht ausreichend in der Lage sind, bei Anwesenheit

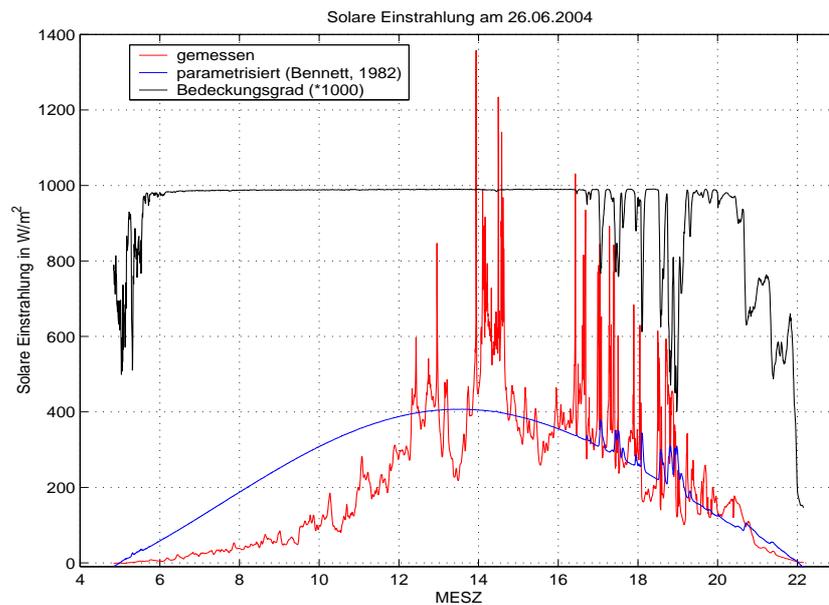


Abbildung 1.5: Vergleich der gemessenen solaren Einstrahlung (rot) mit der Parametrisierung nach Bennett (blau), berechnet mit dem Bedeckungsgrad (schwarz), für den 26.06.2004.

von Wolken die gewünschten Ergebnisse zu erbringen.

Auch am IFM-GEOMAR wurde mit Monte Carlo Modellen die Einstrahlung bei inhomogener Bewölkung untersucht, z.B. Macke et al. (1999), Scheirer und Macke (2000) und Scheirer und Macke (2003). Letzterer Arbeit zeigt u.a. systematische Fehler in der Berechnung der abwärts gerichteten breitbandigen solaren Einstrahlung am Boden aufgrund der üblichen vereinfachten Darstellung der Wolken als planparallele homogene Schichten.

Woher bekommt man nun die benötigten Eingangsgrößen, wenn man sich nicht nur auf Satellitendaten verlassen will? Früher hatte man als Beobachter nur den Menschen, der ganz subjektiv Wolkenbedeckungsgrad, Wolkenunterkantenhöhe etc. schätzte. So war natürlich keine genügende Datendichte vorhanden, man mußte automatisieren, um so viele Daten wie möglich zu bekommen. Bereits in den fünfziger Jahren gab es sogenannte "All Sky Kameras" (Oznovitch et al., 1994), die nahezu den kompletten Himmel über der Optik erfassen konnten. Im Laufe der Jahr wurden sie weiterentwickelt und sind heutzutage in der Lage, mehrere Bilder pro Minute aufzunehmen. Diese Bilder können dann am Computer weiterverarbeitet werden, um z.B. den Bedeckungsgrad oder die Wolkenarten zu bestimmen. Desweiteren bieten sich mehrere Möglichkeiten zur Datenarchivierung an, und man kann z.B. aus den einzelnen Bildern eines Tages einen kleinen Film ("Loop") erstellen, in dem atmosphärische Prozesse wie Wolkenbildung, atmosphärische Wellen, Kondensstreifen, etc. sichtbar werden.

Im ARM Programm wurden mehrere derartige Kamerasysteme verwendet (z.B. Shields et al., 1998), um möglichst genaue Messungen und somit bestmögliche Eingangsdaten für die Modelle zu bekommen.

1.2 Zielsetzung

In dieser Arbeit soll, aufbauend auf der Arbeit von Heise (2004)¹, der Einfluß durchbrochener Bewölkung auf die solare Einstrahlung experimentell mithilfe von Wolken- und Strahlungsmessungen (Kapitel 5 und 6) quantifiziert werden. Durch hochaufgelöste Messungen der beiden Komponenten soll eine genügende Datendichte erreicht werden, um möglichst realistische Ergebnisse zu erhalten, die dann z.B. in Modellen zum Einsatz kommen könnten.

Ein Schwerpunkt liegt in der Zusammenarbeit mit dem Institut für Medizinische Klimatologie der Universität Kiel (Med. Klim.), welches bereits seit einigen Jahren Strahlungsmessungen auf der Nordseeinsel Sylt durchführt, insbesondere im Hautkrebs verursachenden UV-Bereich des solaren Spektrums (siehe Stick et al., 1997, Stick und Pielke, 1998 und Stick, 2001). Hier soll nun der Zusammenhang der Stärke der solaren Einstrahlung mit dem vorherrschenden Bedeckungsgrad und weiteren Wolkeneigenschaften herausgearbeitet werden (Kapitel 7). Die Messungen sind im Sommer 2004 auf dem Dach des Dünenhauses der Med. Klim. Strahlungsmessstation (siehe Kapitel 4.1) durchgeführt worden.

Sandmann (2001), (2002) und Stick et al. (1997a) haben in weiteren Arbeiten die Auswirkungen der solaren Einstrahlung im UV-Bereich auf den Menschen beschrieben, und bedienen mit ihrer Info-Station auf Sylt schon seit einigen Jahren die Urlauber mit wichtigen Hinweisen zur Sonnenbrandverhütung. U.a. werden für die verschiedenen Hauttypen die jeweils maximal erlaubten (ungeschützten) Sonnenbadstunden pro Tag angegeben, immer abhängig von den aktuellen Strahlungsmessungen. Die vorliegende Arbeit soll auch dazu beitragen, die Gefahren der Strahlungserhöhungen bei vorhandener Bewölkung aufzuzeigen.

Weiterhin sollen die Fehlerquellen und Problematiken einer Eigenbauwolkenkamera für zukünftige Messkampagnen und die Schwierigkeiten im Umgang mit großen Datenmengen aufgezeigt werden.

¹Heise (2004) untersuchte den Einfluss durchbrochener Bewölkung auf die solare Einstrahlung für Kiel mit Hilfe von Messungen der Einstrahlung und der Wolkenunterkantenhöhe sowie eines Strahlungstransportmodells

2. Strahlung

Unter Strahlung versteht man i.a. den Energietransport in Form von elektromagnetischen Wellen (*elektromagnetische Strahlung*) oder den Fluß schnell bewegter Ionen (Protonen, Elektronen) oder Neutronen (*Korpuskularstrahlung*). Für den Antrieb der atmosphärischen Zirkulation ist die elektromagnetische Strahlung der Sonne verantwortlich, die bis zum Erdboden gelangt und zumindest teilweise in Wärme umgewandelt wird.

Von den vielen Strahlungsgrößen ist für diese Arbeit die *Bestrahlungsstärke* mit der Einheit W/m^2 die wichtigste: Sie beschreibt diejenige Energiemenge, die pro Zeiteinheit auf ein Flächenelement (z.B. ein Sensor) aus dem kompletten Halbraum darüber einfällt, und setzt sich aus der direkten solaren Strahlung und der diffusen Himmelsstrahlung zusammen. Sie wird als *Globalstrahlung* bezeichnet und ist in ihrer Stärke vom Bedeckungsgrad und vom Sonnenstand, d.h. sowohl von der Tageszeit als auch von der geographischen Breite, abhängig.

Von den in unseren Breiten maximal möglichen $1185 W/m^2$ am Oberrand der Atmosphäre¹ kommt nicht alles auch am Boden an. An klaren Sommertagen wurden auf Sylt bis etwa $900 W/m^2$ erreicht. Nicht miteinbezogen sind hier Strahlungserhöhungen, denen eine erhöhte diffuse Strahlung zugrunde liegt. Dieser 3D Effekt, durch Streuung der Strahlung in den Wolken sowie durch Reflektion an den Wolkenrändern verursacht (siehe Abb. 2.1), wird in der Literatur als "*Broken Cloud Effekt*" bezeichnet.

2.1 Solare Strahlung

Die solare Strahlung liegt zu 98 % zwischen 0.28 und $4.0 \mu m$ Wellenlänge und kann in folgende Bereiche untergliedert werden (Tabelle 2.1):

¹Dieser Wert ergibt sich aus $S_0 \cdot \cos\Theta_0(\min)$, wobei S_0 die Solarkonstante, die die Bestrahlungsstärke auf eine senkrechte Fläche der Erde in mittlerer Entfernung zur Sonne angibt, bezeichnet.

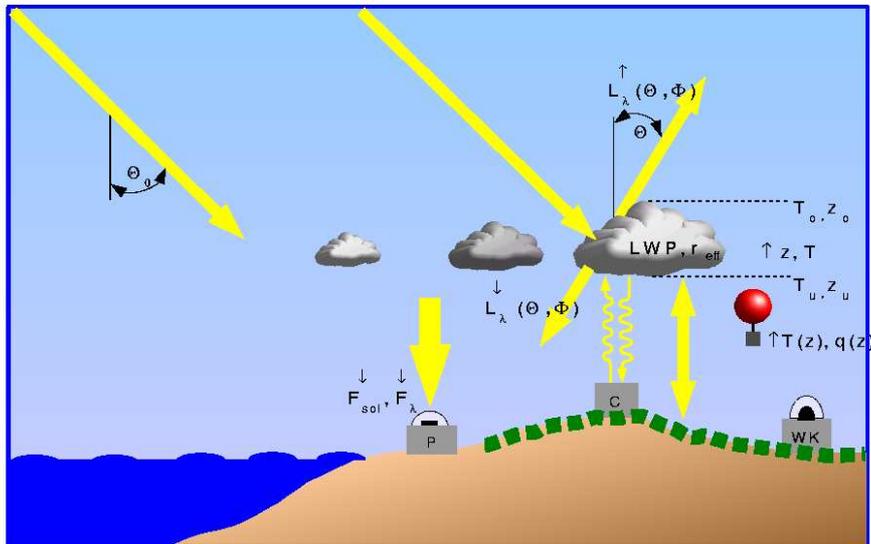


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des "Broken Cloud Effekts" mit den verwendeten Messgeräten: P = Pyranometer, C = Ceilometer, WK = Wolkenkamera (Macke und Stick (2004)).

Solare Strahlung		
Ultraviolette Strahlung (UV)		7 %
- UVB	0.28 - 0.315 μm	
- UVA	0.315 - 0.4 μm	
Sichtbare Strahlung (VIS)	0.4 - 0.73 μm	42 %
Infrarote Strahlung (IR)	0.73 - 4 μm	49 %

Tabelle 2.1: Einteilung der Solaren Strahlung.

Von den oben genannten 900 W/m^2 entfallen nur etwa 50 W/m^2 auf den UV-Bereich (Med.Klim., 2004). Daraus ergibt sich eine hautwirksame Strahlung von bis zu 200 mW/m^2 , welche wiederum extrem von Jahres- und Tageszeit abhängt. Die UVB-Strahlung spielt hier die wichtigste Rolle, da sie für die Ausbildung eines Erythems (Sonnenbrand) verantwortlich ist. Bei einer Wellenlänge von $0.3 \mu\text{m}$ ist ihre Wirksamkeit fast 10000-fach höher als im sichtbaren Bereich (Schlüter, 2004). Näheres dazu kann auf den Internetseiten des Instituts für Medizinische Klimatologie der Universität Kiel eingese-

hen werden.

2.2 Streuung

Strahlung, die durch ein Medium wie die Atmosphäre geht, behält auf ihrem Weg weder ihre Intensität noch ihre Richtung bei. Sie wird durch die atmosphärischen Partikel absorbiert oder gestreut. Dabei spielt Form und Größe (Radius = "r") dieser Partikel eine wichtige Rolle, ebenso wie die Wellenlänge "λ" der Strahlung. Folgende Gleichung definiert einen sog. Größenparameter "α", der aus Radius und Wellenlänge berechnet wird:

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

2.2.1 Rayleigh-Streuung

Rayleigh-Streuung tritt auf, wenn $\alpha < 0.1$, d.h. wenn der Radius des streuenden Partikels deutlich kleiner als die Wellenlänge des einfallenden Lichts ist, wie z.B. bei Gasmolekülen. Die spektrale Strahldichte der unter dem Winkel δ gestreuten Strahlung wird dann durch die Rayleigh-Streufunktion

$$L_{R\lambda}(\delta) = \text{const} \cdot \sigma_R(\lambda) \cdot (1 + \cos^2\delta) \quad (2.2)$$

wiedergegeben. Der Rayleigh-Streukoeffizient $\sigma_R(\lambda)$ ergibt sich nach Hansen und Travis (1974) näherungsweise zu:

$$\sigma_R(\lambda) = \text{const} \cdot \lambda^{-4} \quad (2.3)$$

Daraus folgt, daß das der blaue Anteil des sichtbaren Lichtes ($\lambda \approx 0.45\mu\text{m}$) an atmosphärischen Partikeln deutlich stärker gestreut wird als der rote Anteil ($\lambda \approx 0.67\mu\text{m}$), wodurch der Himmel blau erscheint (siehe auch Abb. 2.2). Dieser Sachverhalt wird bei der späteren Berechnung des Bedeckungsgrades aus den Bildern der Wolkenkamera wichtig sein (Kapitel 5). Hier wird zwar nicht direkt auf den Streukoeffizienten eingegangen, aber aus dem Verhältnis des roten und blauen Anteils des Lichts kann man abschätzen, ob die Kamera auf dem jeweiligen Bildpunkt eine Wolke oder den Himmel sieht.

2.2.2 Mie-Streuung

Die Mie-Theorie befaßt sich mit der Streuung an sphärischen Teilchen wie Aerosole oder Wolkentröpfchen. Nun hängt der spektrale Streukoeffizient vom Radius und vom Brechungsindex der streuenden Partikel ab. Die Streuung ist in ihrer Richtung zwar noch ähnlich der Rayleigh-Streuung, allerdings wird nun der größere Anteil vorwärts gestreut. Zudem ist die Intensität der Streuung kaum noch von der Wellenlänge abhängig. Aus diesem Grund erscheinen reine Wasserwolken wie der Cumulus auch nahezu weiß. In Abbildung 2.2 ist die Rayleigh-Streufunktion zusammen mit der Mie-Streufunktion dargestellt.

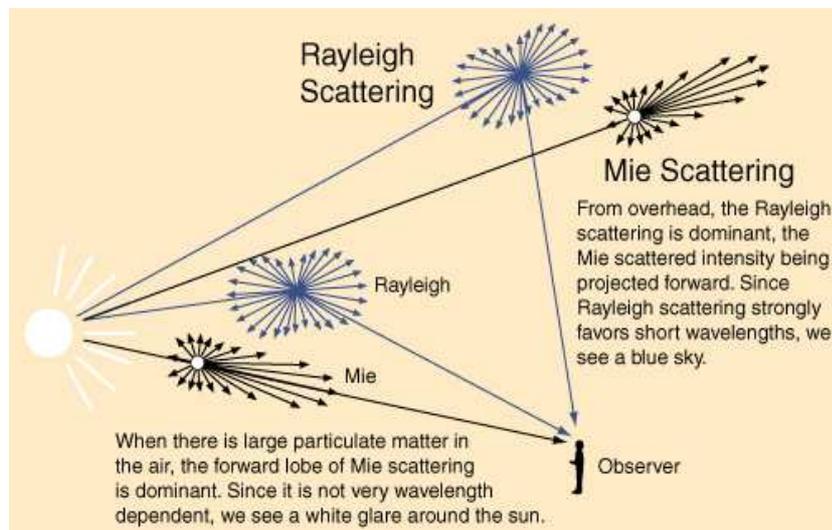


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Streufunktionen für Rayleigh- (blau) und Mie-Streuung (schwarz), nach Nave (2004).

In der bewölkten Atmosphäre kommen Rayleigh- und Mie-Streuung immer nur gemeinsam vor, wobei die Anteile der vorhandenen Partikel festlegen, welche Art der Streuung überwiegt. Bei ansteigender Tröpfchenkonzentration überwiegt die Mie-Streuung immer mehr, und der prozentuelle Anteil des nach vorne gestreuten Lichts nimmt zu. Letzteres gilt auch für größere Tropfen.

2.2.3 Geometrische Optik

Sind die Partikel nicht sphärisch, kann das Streuverhalten nicht mehr mit der Mie-Theorie beschrieben werden, z.B. bei Eiskristallen oder großen Wassertropfen. Hier kann für hinreichend große Partikel ($r \gg \lambda$) mit den Gesetzen der geometrischen Optik (*Fresnel'sche Formeln*, *Brechungsgesetz von Snellius*) das Streu- und Absorptionsverhalten erarbeitet werden.

3. Wolkenkamera

Dank der unten noch genauer erläuterten CCD-Technik und den leistungsstarken Rechnern ist es heutzutage möglich, Wolkenbeobachtungen wie Wolkengattung, Bedeckungsgrad, Zugrichtung, etc. nicht mehr nur manuell und mit bloßem Auge zu machen. Mit Hilfe von Ganzhimmel-Kamerasystemen, sog. "Whole Sky" Kameras, kann man mehrere Bilder pro Minute vom kompletten Himmel über der Kamera erhalten, diese speichern und anschließend sofort weiterverarbeiten. So ist es sinnvoll, für bodengebundene Wolkenbeobachtungen eine digitale Kamera zu verwenden, die gegenüber einer herkömmlichen analogen Kamera noch weitere Vorteile hat:

- Kein Verbrauch an Filmmaterial,
- Einfache und platzsparende Archivierung,
- Vielfältige Möglichkeiten der Weiterverarbeitung (z.B. Erstellen von Zeitrafferfilmen, spektrale Information der Pixel, Berechnung von Bedeckungsgraden, etc.)

Damit bieten die Echtzeit-Kamerasysteme eine hervorragende Ergänzung in integrierten Beobachtungssystemen zu anderen Meßinstrumenten wie *Wolkenradar* oder *Lidar*, die z.B. in den Bodenmesszentralen des DWD (Lindeberg, Hohenpeißenberg) verwendet werden.

3.1 Ausrüstung

In dieser Arbeit wurde ein Bausatz verwendet, d.h. die zum Selbstbau einer Wolkenkamera notwendigen Geräte und Utensilien wurden von Dr. Klaus Uhlig beschafft und für das IFM-GEOMAR aufgebaut. Dazu gehören im einzelnen:

- Eine CCD-Kamera *Typ SVS204CSCL* mit Vario-Objektiv Fisheye *Typ TS2V114E* (mit veränderlicher Brennweite und (R,G,B)-Ausgang (Abb. 3.1a)):
- Netzteil für SVCam,
- Grabberkarte *EureCard GrabLink Value*,
- CameraLink Kabel, 15m,

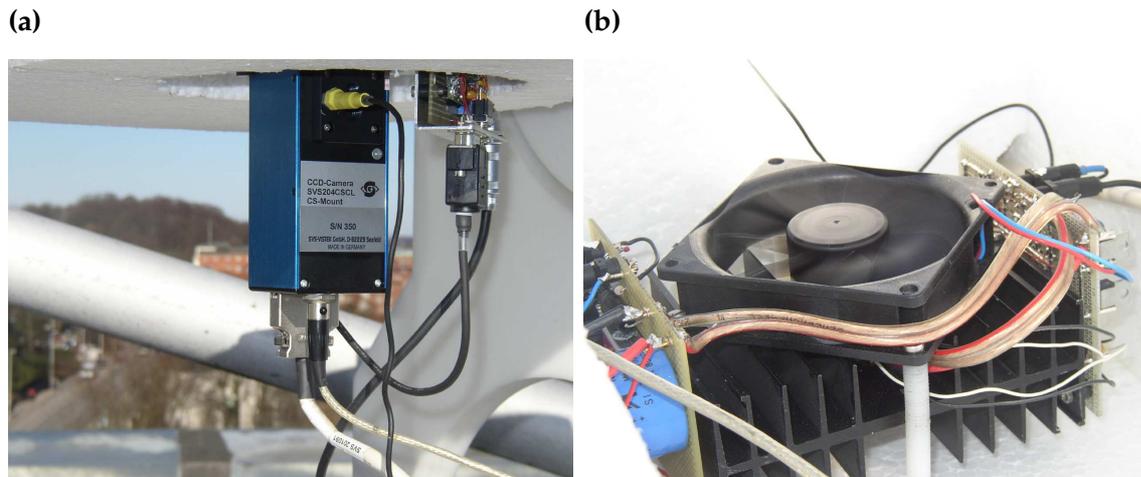


Abbildung 3.1: (a) CCD-Kamera, (b) Heizelement der Kamera, eingebaut am Boden der Transportkiste.

- Netzteil für SVCam,
- SV-Repeater *PCB-Version* für CameraLink Kameras,
- Ein kompletter Rechner mit Windows 2000 Professional Betriebsprogramm,
- Software *SVRecorder* zum Abspeichern von Bildsequenzen in "isq"-Files und ASCII-Einzelbildern ("ahx"-Files),
- Blende und Regelkreis für Belichtungssteuerung bei der Aufnahme,
- Transparente Acrylkuppel *Acrylic Display Dome 7 DIA* der *Edmund Industrie Optik GmbH* zum Schutz des Objektivs,
- Transportkiste aus Aluminium zum Schutz der Kamera und der Elektronik,
- Heizelement, um die Kamera bei optimaler Betriebstemperatur zu halten und um Kondenswasser an der Kuppel zu entfernen, da dies zu Streuung an Wassertropfen und Schlieren und damit zu Fehlern in der Erkennung von Wolken führen kann (siehe Abb. 3.1b),
- Schattenring zum Ausblenden der Sonne, manuell verstellbar nach der Formel:

$$N = 210 - 140 \cdot \cos((1 + W) \cdot 6.923) \quad (3.1)$$

wobei W = Kalenderwoche,

- Polyacetal Tafeln der *Adolf Richter Stahl, Metalle, Kunststoffe GmbH* zum Bau des Gehäuses.

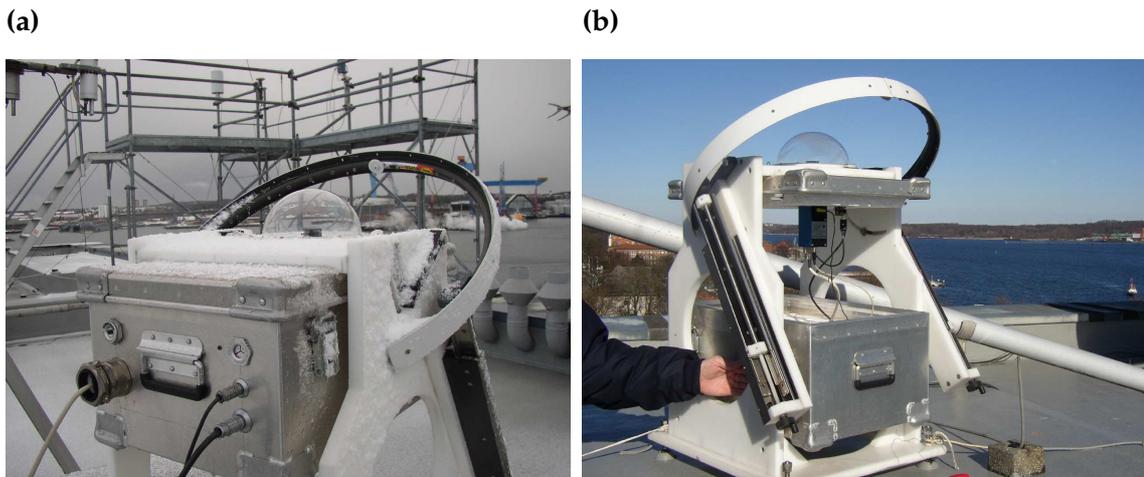


Abbildung 3.2: Die Wolkenkamera: (a) auf dem Dach des IFM-GEOMAR, Dienstgebäude Westufer, (b) mit geöffneter Transportkiste und Blick auf das Innenleben (CCD-Kamera).

Auf der Webseite des *Atmospheric Radiation Measurement Program* (kurz "ARM") sind komplette Anlagen zur optischen Wolkenerfassung beschrieben (Shields et al. (1998) und Shields et al. (2004)), wie der "Whole Sky Imager" (WSI). Dieser ist allerdings sehr kostspielig, da er mit zusätzlichen Funktionen ausgestattet wurde, wie eine Wolkenerkennung bei Mond- und/oder Sternenlicht und eine automatische Sonnenabschattung. Diese muß hier manuell eingestellt werden, um die Sonne aus dem Bild zu nehmen, da die direkte Einstrahlung den CCD-Chip zerstören, zumindest aber zu Fehlern in der Darstellung führen kann (s.u. Stichwort "Blooming"). Ein weiteres Kamerasystem im ARM Program ist der *Total Sky Imager* (TSI), Abb. 3.3, beschrieben von Morris (2004), der das Bild von einem nach oben gerichteten rotierenden Spiegel abliest, und damit das Problem der Acrylkuppel, Mißinterpretation des Streulichtes als "Wolke" (s. Kapitel 5), umgeht.

3.2 Kamera und CCD-Chip

Die von *SVS-VISTEK GmbH* hergestellte CCD-Color-Camera SVS204CSCL ist eine Sonderversion, die speziell für Fisheye Objektive, welche in Whole-Sky Wolkenkameras aufgrund des benötigten Blickwinkels von 180° Verwendung finden, ausgelegt ist. Sie verfügt über einen Progressive-Scan-Sensor mit 1024×768 Pixeln. Das Ausgangssignal besteht aus einem 8-Bit Signal (8 Bit $\Rightarrow 2^8 = 256$ verschiedene Abstufungen) für die Farben Rot, Grün und Blau (R,G,B), welche auf dem CCD-Chip in einem Farbfiltermosaik, dem sog. *Bayer-Pattern* (Abb. 3.4) angelegt sind:



Abbildung 3.3: Total Sky Imager (TSI).

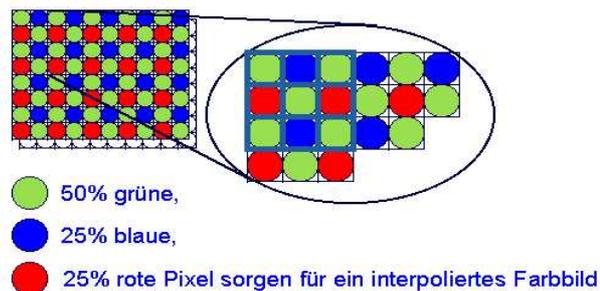


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung des Farbfiltermosaiks: Bayer-Pattern.

Die Abkürzung CCD (*charge-coupled-device*) bedeutet etwa "Ladungsgebundenes Gerät". Der CCD-Chip ist als Schnittstelle zwischen optischem und elektrischem Bildsignal anzusehen. Er ist das Kernstück der Kamera, über das das Licht in elektrische Signale umgesetzt wird, aus denen dann das fertige digitale Bild entstehen soll.

3.2.1 Aufbau und Funktionsweise des Chips

Nach dem *Einsteinschen Photoelektrischen Effekt* wird Spannung induziert, indem ein Photon ein Elektron aus Metall herausschlägt (Abb. 3.5). Einsteins Gleichung lautet nach Tipler (1994):

$$\left(\frac{1}{2}mv^2\right)_{\max} = eU_0 = h\nu - W_A \quad (3.2)$$

Hier ist $(\frac{1}{2}mv^2)_{\max}$ die maximale kinetische Energie des austretenden Elektrons, $-U_0$ die maximale Bremsspannung, h das Plancksche Wirkungsquantum, ν die Frequenz des Lichts und W_A die Austrittsarbeit, die verrichtet werden muß, um das Elektron aus der Metalloberfläche zu lösen.

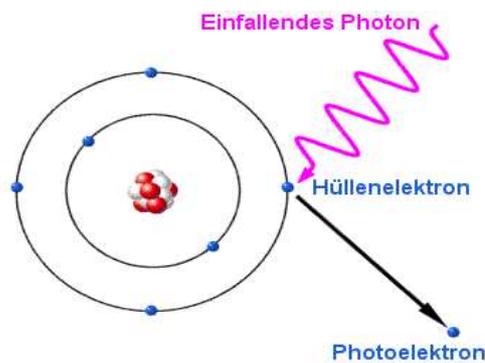


Abbildung 3.5: Photoeffekt nach A. Einstein (1905): Das einfallende Photon gibt seine Energie an ein Hüllenelektron ab, welches nun das Atom verlassen kann. Damit ist das Photon vollständig absorbiert worden.

Fällt nun Licht auf den Chip, baut sich demnach in jedem lichtempfindlichen Element (*Pixel*) eine Spannung analog zur Anzahl der eingestrahnten Photonen auf. Die induzierten Spannungen der einzelnen Pixel werden nun an einen Signalprozessor weitergegeben, der diese in Helligkeitswerte umrechnet. Abbildung 3.6 zeigt eine bildhafte Darstellung des Auslesemechanismus für die einzelnen Pixel: Die Ladungen, die sich aufgrund des Photoeffekts in den Pixeln aufgebaut haben, werden Pixel für Pixel an den Rand transportiert (ein Eimer steht hier für jeweils ein Pixel). Ist eine Zeile ausgelesen und umgewandelt, wird die nächste in Angriff genommen etc.

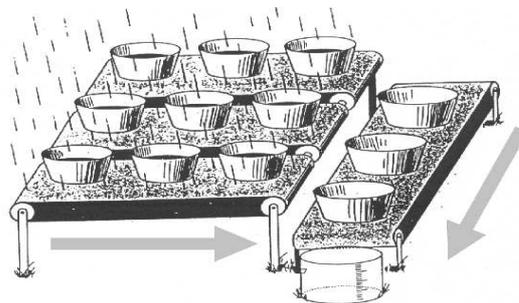


Abbildung 3.6: Auslesemechanismus eines CCD-Chip, stark vereinfacht.

Die Technik besteht nun darin, daß das Bayer-Pattern vor der lichtempfindlichen Sensorfläche angebracht ist, und jedes Element des CCD das Licht von hauptsächlich einer der

drei Grundfarben erfaßt. Leider gibt es an den Rändern eine Überschneidung (Abb. 3.7), so daß sich die fertigen Bilder geringfügig in der Farbe von der Wirklichkeit unterscheiden, was aber in der Auswertung nicht zu Problemen führen dürfte, da Wolken und blauer Himmel in gleichem Maße davon betroffen sind.

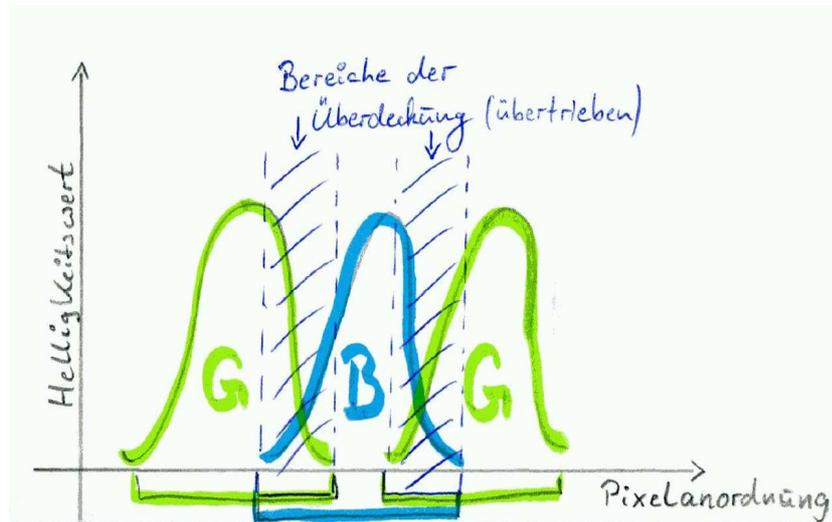


Abbildung 3.7: Überschneidungen der Farben, x-Achse: Reihenfolge der Farben auf dem Bayer-Pattern, y-Achse: ausgegebener Helligkeitswert.

Da das menschliche Auge im Grünbereich weitaus empfindlicher ist, als im übrigen Farbspektrum, benutzt man in der Regel doppelt so viele grüne wie blaue und rote Filter.

Das Ausgangssignal der Kamera ist wie gesagt ein R,G,B-Signal, d.h. die einzelnen Pixel müssen nun durch eine Software ausgelesen werden. In diesem Falle wird ein FORTRAN77 Programm, welches von Jörg Wegener erstellt wurde, verwendet, daß einen fertigen Bildpunkt aus mindestens einem Tripel der Farbanteile (R,G,B) berechnet. Dazu müssen die Eingangsdaten, die in Hexadezimalform ("ahx-Files", siehe Anlage A.1) vorliegen, zuerst umgewandelt und dann in ein Bildformat weggeschrieben werden. Hier wurde das TIFF-Format nach Version TIFF 6.0 gewählt, wobei auch andere Formate wie das JPEG möglich gewesen wären. Bevor das fertige Bild schließlich ausgegeben wird, kann man die einzelnen Bildpunkte noch in weiteren Berechnungen bearbeiten (Kapitel 5.3.1).

3.2.2 Fehlerquellen und Grenzen der CCD-Fotografie

Leider führt die hohe Lichtempfindlichkeit des Chips auch zu speziellen Problemen. Burtscher (2001) nennt hier die Effekte des *Dunkelstromes* und des *Bloomings*:

"*Blooming*" tritt auf, wenn die Spannung in einem Pixel durch einfallende Photonen nicht weiter erhöht werden kann. Bei fortdauernder Bestrahlung werden die nun überschüssi-

gen Ladungen an die benachbarten Pixel abgegeben (Abb. 3.8).

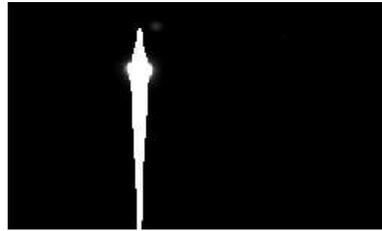


Abbildung 3.8: "Blooming", verursacht durch überlaufende Pixel.

Dieser Effekt läßt sich nur schwer korrigieren. Deshalb sollte die Belichtungszeit so angepaßt werden, daß möglichs nicht zu viel Licht auf den Chip fällt, was durch automatische Blendenanpassung versucht wird. Der oben bereits erwähnte Schattenring zum Ausblenden der direkten Sonneneinstrahlung ist hierbei ebenso wichtig.

Da der CCD-Chip auch oder gerade im IR-Bereich empfindlich ist, können allein durch die thermische Bewegung der Atome ausgeschlagene Elektronen zu Signalen führen, dem sog. *Dunkelstrom*. Dabei kann die Blende vollkommen geschlossen sein. Durch die Aufnahme eines "Dark Frames" (Dunkelbildes) kann man den Dunkelstrom isoliert messen und später die gewonnenen Helligkeitswerte von dem jeweils aktuell zu verarbeitenden Bild abziehen (Shields et al., 1998). Um von vornherein diesen Effekt so gering wie möglich zu halten, und um den Chip vor zu großer Hitze zu schützen, kann man zudem thermoelektrische Kühler (sog. *Peltier-Elemente*) im Kameragehäuse anbringen, so daß stets eine ausreichende Kühlung des CCD-Kopfes gewährleistet ist. Leider verfügt die in der vorliegenden Arbeit verwendete Kamera nicht über ein solches Kühlsystem. Da die Kamerasoftware eine Vorbelichtung durchführt und daher Dunkelbilder gar nicht erst aufnimmt, ist dieser Effekt auch nicht korrigierbar.

Ein weiteres Problem der verwendeten Kamera ist die Helligkeitsauflösung von nur 8 Bit. Damit lassen sich Wolken, die genau vor der Sonne stehen und deshalb viel zu hell erscheinen, nicht mehr genau auflösen. Das gleiche Problem ergibt sich für Bilder, wo nun die Bereiche um die Sonne zu einer hellen Fläche verschwimmen, besonders morgens und abends. Zu hell heißt, daß der jeweilige (R,G,B)-Wert nahezu (256,256,256), d.h. weiß, ergibt. Daraus folgt dann ein R/B-Verhältnis von ≈ 1 und die Erkennung des Bildpunktes als Wolke (Kapitel 5.3.1), egal, ob eine Wolke vorhanden war oder nicht. Dies führt somit zu systematischen Fehlern bei der Wolkenerkennung, d.h. der Bedeckungsgrad wird immer etwas zu hoch berechnet, solange zu helle Bildpunkte als Wolke definiert werden. Dieser Fehler ist besonders bei den Fällen bis etwa mittlerer Bedeckung des Himmels von größerer Bedeutung. Je mehr Wolken am Himmel sind, desto geringer ist dieser Sättigungsfehler.

Die Streuung des Lichts an der Acrylkuppel führte an klaren Tagen zunächst nicht zu

größeren Fehlern. Allerdings ergaben sich im Laufe der Zeit Probleme durch die materialbedingt nicht zu vermeidenden Kratzer und Absplitterungen, hauptsächlich verursacht durch Sandpartikel in den starken Seewinden. Durch die Streuung an den so entstandenen Unebenheiten ergaben sich somit weitere Bildpunkte, die im unbewölkten Fall als Wolke interpretiert wurden.

4. Meßstation und weitere Meßinstrumente

Im Rahmen dieser ersten gemeinsamen Messkampagne des IFM-GEOMAR und des Instituts für Medizinische Klimatologie vom Mai bis September 2004 wurden neben der bereits besprochenen Wolkenkamera folgende Messinstrumente verwendet:

- *Ceilometer* von Vaisala zur Bestimmung der Wolkenunterkantenhöhe,
- *Pyranometer* von Kipp & Zonen zur Messung der Globalstrahlung (direkte + diffuse Strahlung) im Spektralbereich von 0.305 bis 2.8 μm

Die Pyranometerdaten wurden uns dankenswerter Weise vom Institut für Medizinische Klimatologie unter Leitung von Prof. Dr. Carsten Stick zur Verfügung gestellt. Außerdem wurde das Pyranometer für die Messungen mithilfe einer Ventilation von einer 10 sekundlichen auf eine zweisekundliche Abtastrate umgestellt, ab dem 4. August sogar auf eine sekundliche Abtastrate. D.h., die Ausgangssignale wurden sekundlich registriert, die Zeitkonstante des Pyranometers wurde zu besser als $\tau \approx 5$ sek bestimmt. In bisherigen Arbeiten wurde keine annähernd hohen zeitlichen Auflösungen verwendet.

4.1 Messtation auf Sylt

Die Strahlungsmesstation des Instituts für Medizinischen Klimatologie liegt etwa 1.5 Kilometer nördlich von Westerland (54.93°N, 8.31°E) direkt auf der westlichen Düne am Strand. Die Messplattform mit verschiedenen Pyranometern ist in ca. 22 m Höhe auf dem Dach des Gebäudes angebracht. Die Wolkenkamera und das Ceilometer stehen auf dem Vordach in etwa 19 m Höhe (Abb. 4.1). Dabei wurde darauf geachtet, daß beide Geräte möglichst windgeschützt stehen ohne jedoch die Messungen zu beeinträchtigen. Die Kamera sollte den maximal möglichen Ausschnitt des Himmels ohne störende Masten, Bäume etc. sehen, das Ceilometer möglichst dicht neben der Kamera stehen, ohne in ihr Blickfeld zu geraten, damit ein Vergleich der Messungen beider Instrumente gewährleistet ist.

Abbildung 4.1 zeigt die Lage der Messtation der Med. Klim. auf Sylt sowie die verwendeten Instrumente:

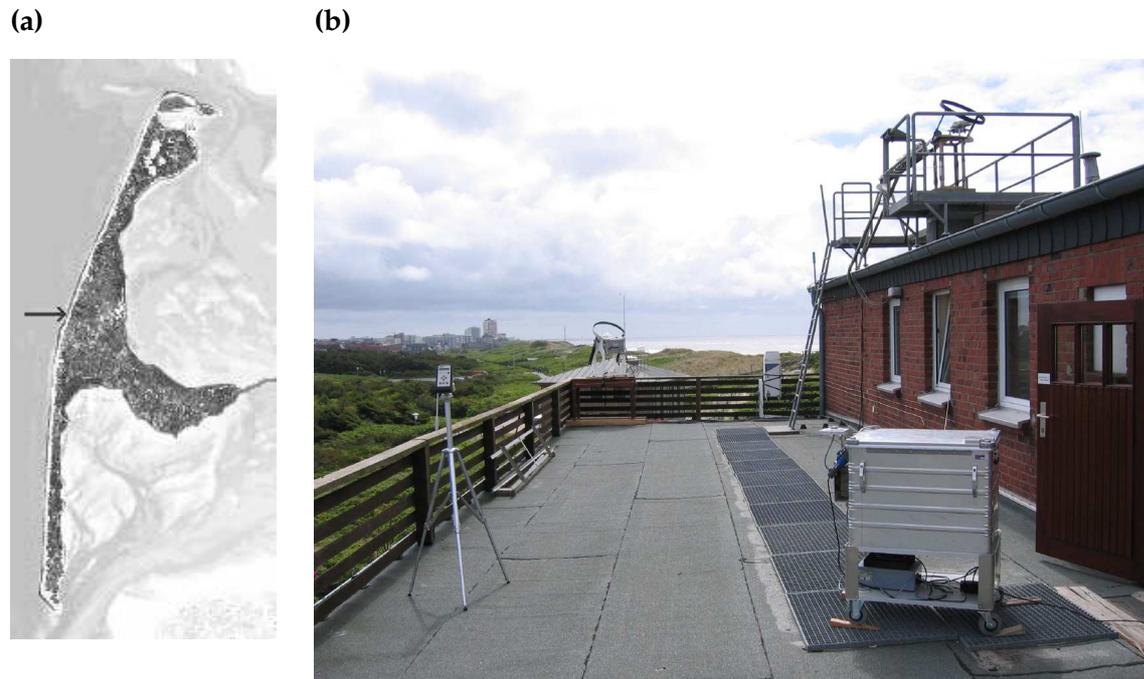


Abbildung 4.1: (a) Lage der Messtation auf Sylt (Sandmann, 2002), (b) Messtation mit links hinten: Wolkenkamera, mitte hinten: Ceilometer, rechts oben: Messplattform mit Pyranometer-Batterie.

4.2 Zur Funktionsweise des Ceilometers

Das verwendete Ceilometer dient der Messung der Wolkenunterkantenhöhen der drei untersten Wolkenschichten und kann diese bis in eine Höhe von etwa 7,5 km erkennen. Cirren, die zumeist in größeren Höhen zu finden sind, kann das Gerät nicht mehr lokalisieren und daher die Interpretation der Strahlungsmessungen verfälschen.

Das Prinzip der Ceilometermessung ist recht einfach: Ein ausgesendeter Laserstrahl wird an den Wolkenunterkanten zum Gerät zurückreflektiert. Aus der Laufzeit des Lasers kann dann die Höhe der Wolkenunterkante berechnet werden. Abbildung 4.2 zeigt dies schematisch. Bei nicht allzu optisch dicker oder bei durchbrochener Bewölkung kann das Ceilometer bis zu drei verschiedene Wolkenunterkantenhöhen unterscheiden, bevor der Laser soweit abgeschwächt wird, daß er nach einer möglichen Reflexion den Sensor nicht mehr erreicht, bzw schon vorher absorbiert oder weggestreut wurde. Ist bereits die erste Schicht stark bewölkt, kann sie der Laser nicht mehr durchdringen, und liefert folglich nur die unterste Wolkenunterkantenhöhe.

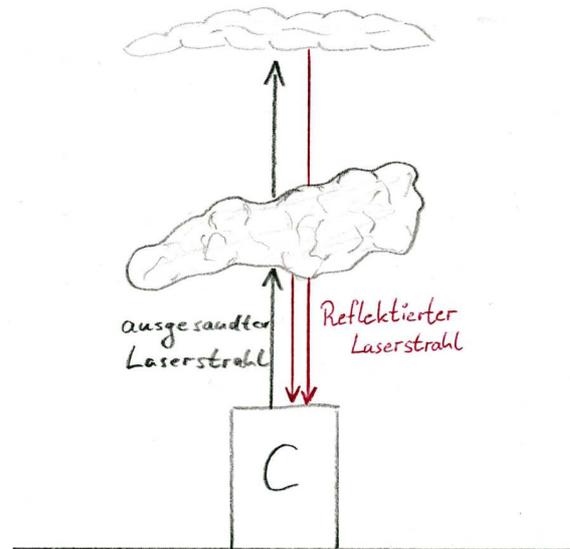


Abbildung 4.2: Funktionsweise des Ceilometers.

Die Ceilometerdaten werden schließlich in Paketen von 6 Stunden zusammengefaßt. Diese enthalten die Messungen der Unterkantenhöhen in 15 sek. Abständen.

4.3 Zur Funktionsweise des Pyranometers

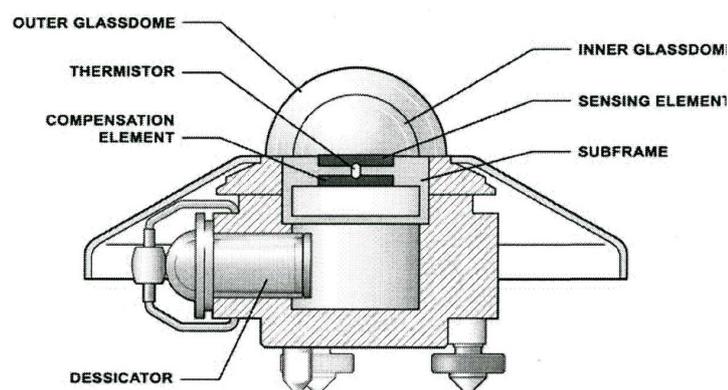


Abbildung 4.3: Schematischer Aufbau eines CM21 Pyranometers (Kipp & Zonen, 2004).

Das verwendete Pyranometer mißt die Globalstrahlung in einem Bereich von 0,305 bis

2,8 μm , d.h. über das gesamte sichtbare Spektrum sowie große Teile des UV¹- und NIR-Bereichs. Dabei wird eine geschwärzte Keramikscheibe unter einer schützenden Glaskuppel, bestehend aus zwei Halbkugeln, infolge der auftreffenden Strahlung erwärmt (Abb. 4.3). Die Wärme fließt über einen Wärmewiderstand zum Pyranometerkörper, der als Wärmeableitung fungiert. Der Temperaturunterschied über dem thermischen Widerstand ergibt nun ein Maß für die Intensität der Globalstrahlung. Eine Bestrahlungsstärke von 1000 W/m^2 führt beispielsweise zu einer Temperaturdifferenz von ca. 3 Grad Celsius (Sandmann, 2002).

Das für diese Arbeit verwendete Pyranometer ist wie bereits erwähnt in der Lage, sekundlich (!) einen Strahlungswert zu nehmen. So ist es möglich, äußerst hochaufgelöste Messungen zu erhalten, die auch starke Strahlungserhöhungen mitbekommen, welche bei geringerer Abtastrate (z.B. 10 sekundlichen Messungen) oder gar Mittelungen nicht bemerkt würden.

¹Eingeschlossen sind dabei die hautwirksamen Strahlen im UVA und UVB Bereich

5. Verarbeitung der Kameradaten

Bevor mit der Bestimmung des Bedeckungsgrades begonnen werden kann, müssen diejenigen Pixel aus der Berechnung ausgeschlossen werden, die das Ergebnis verfälschen würden. Dies beinhaltet alle Pixel am Rande des Bildes, im Bereich des Schattenringes sowie alle feststehenden Objekte in der Umgebung der Kamera wie Sendemasten, Kabel, Verstreber, etc. Hier bietet es sich an, vorab eine sog. "Maske" des Bildes zu erstellen, welche die feststehenden unerwünschten Pixel enthält.

5.1 Maske

Die Maske wird vor allen weiteren Berechnungen in das Programm eingebaut. Dafür werden alle oben genannten Pixel auf den (R,G,B)-Wert (0,0,0), also "Schwarz", gesetzt und von den nachfolgenden Berechnungen ausgeschlossen. Da selbst die Pixel am Rand des unbehandelten Bildes nie komplett schwarz sind, sondern immer noch etwas Licht messen, ist auch eine Verwechslung mit eventuell sehr dunklen Wolken nicht zu erwarten. Zudem ist die Kamera so eingestellt, daß sie bei Unterschreitung eines gewissen Helligkeitswertes keine Bilder mehr aufnimmt¹, d.h. ein Wert von (0,0,0) kann nicht auftreten.

Probleme treten bei den beweglichen Teilen auf. Der Schattenring muß jede Woche auf eine neue Position gebracht werden, d.h. man müßte ständig seine Position neu maskieren. Um das zu vermeiden, wurden aus den Messungen die R,G,B-Werte des Rings in etwa auf das Intervall [0-60] abgeschätzt. Diese Werte werden für den Fall, daß das Verhältnis "V" von Rot/Blau bei etwa 1 liegt, als Maske gewertet (in Abbildung 5.1 alle auf "rot" gesetzten Pixel), weil an Gasmolekülen in der Atmosphäre der blaue Anteil des Lichts wesentlich stärker gestreut wird, als der rote (*Rayleigh-Streuung*, Kapitel 2). Bei einem Verhältnis von ≈ 1 kann man davon ausgehen, daß hier keine Rayleighstreuung an Gasmolekülen vorliegt, sondern eher Reflexion an einem geometrischen Körper (wie dem Schattenring).

Hier ergibt sich ein weiteres Problem: Eine sehr dunkle Wolke kann im Helligkeitsin-

¹Während der Messungen auf Sylt nahm die Kamera nur Bilder von max. 4:30 Uhr bis 22:40 Uhr auf.

tervall [0-60] liegen und damit ebenfalls als Schattenring gewertet werden (siehe A.1, A.2 und A.3). Deswegen wurde das Helligkeitsintervall so angepaßt, daß möglichst viel vom Schattenring und möglichst wenig Wolke hineinfällt. Dieser Fall tritt bei starker Bewölkung auf, insbesondere bei Regenwolken (nur dann können die Wolken aufgrund der Größe und Anzahl ihrer Wolkentröpfchen dunkel genug werden) und bei relativer Dunkelheit. Da der Bedeckungsgrad meistens etwas zu hoch berechnet wird, ist nicht mit größeren Fehlern zu rechnen.

5.2 Filter

Gelegentlich muß das Streulicht um die Sonnenposition herum, welches in der Bedeckungsgrad-Berechnung als "Wolke" identifiziert werden würde, herausgefiltert werden. Dabei ist jedoch ein Unterschied zu machen zwischen der Streuung an einem klaren Tag, hervorgerufen durch die Acryl Kuppel, und der Streuung an Dunstpartikeln, die als Wolke erkannt werden sollen, da sie die solare Einstrahlung ebenfalls beeinflussen. Für den Fall, daß tatsächlich eine Wolke vor der Sonne steht, würde sie hier dann nicht als Wolke erkannt.

In der Filter-Subroutine (im Folgenden als "Streulichtfilter" bezeichnet) werden alle Pixel, die in einen Helligkeitsintervall von [225-255] liegen, von der nachfolgenden Berechnung ausgeschlossen, in Abb. 5.1 als "grün" kenntlich, leider damit auch ein Teil der vorhandenen Bewölkung, der von der Sonne angestrahlt wird und deswegen im selben Intervall liegt. Zudem kann eine möglicherweise vorhandene Wolke, die sich im Bereich des Streulichts befindet, übersehen werden (Sättigungsfehler, siehe Kapitel 3.2.2).

Ein besonderes Problem bilden die wolkenfreien Bilder. Ist der Himmel jetzt wirklich unbewölkt, oder versteckt sich eine Wolke im Streulicht, bzw. liegt ein leichter Dunstschleier vor der Sonne? Leider sind diese Fälle mit der verwendeten Kamera nicht zu unterscheiden und gehen als Fehler in die Berechnungen ein. Mit den Ceilometerdaten hat man allerdings nachträglich über die gemessenen Wolkenhöhen einen Anhaltspunkt, ob eine Wolke (zumindest über der Kamera) vorhanden war. Ebenso kann man aus den Strahlungswerten auf vorhandene Bewölkung im Sichtfeld schließen.

Für die Auswertung der Messungen auf Sylt wurde der Streulichtfilter nicht in das Berechnungsprogramm eingebaut, da durch die klare Luft, besonders nach Regenschauern, die Streuung des Sonnenlichts (und damit auch der durch Streuung verursachte Fehler) deutlich verringert ist. So können die zuvor ausgefilterten Wolken wieder als solche erkannt werden.

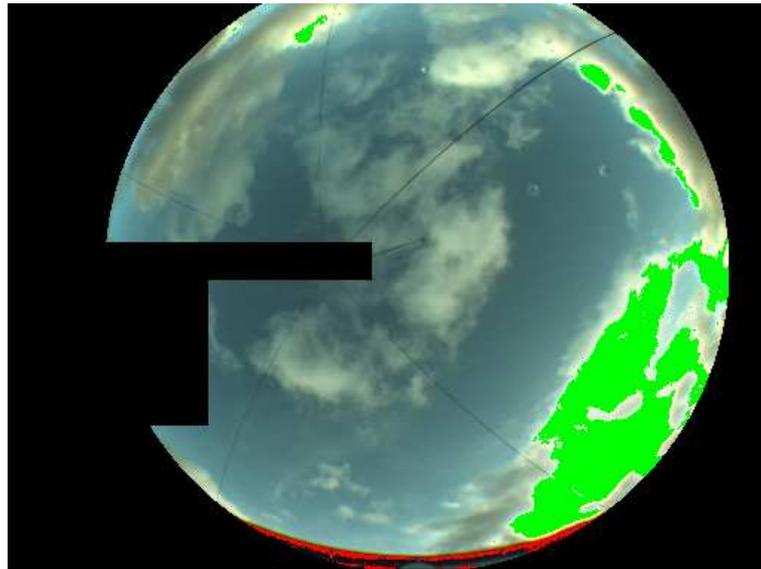


Abbildung 5.1: Beispielbild der Wolkenkamera mit Maske (schwarz / rot) und Filter (grün), eingebaut vor der Berechnung des Bedeckungsgrades.

5.3 Wolkenerkennung

5.3.1 Abschätzung des Bedeckungsgrades

Zur Erkennung von Wolken wurde in dieser Arbeit nach Long und DeLuisi (1998), Long et al. (2001) und Pfister et al. (2003) folgendermaßen vorgegangen:

Nach Entnahme der Helligkeitswerte aus den Originalbilddaten für die drei Farben (R,G,B) liegen diese in folgender Matrizenform vor²:

$$\left(\begin{array}{ccc} R(1, 1), G(1, 1), B(1, 1) & R(1, 2), G(1, 2), B(1, 2) & \dots R(1, 512), G(1, 512), B(1, 512) \\ R(2, 1), G(2, 1), B(2, 1) & R(2, 2), G(2, 2), B(2, 2) & \dots R(2, 512), G(2, 512), B(2, 512) \\ \vdots & \vdots & \ddots \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots \vdots \\ R(389, 1), G(389, 1), B(389, 1) & R(389, 2), G(389, 2), B(389, 2) & \dots R(389, 512), G(389, 512), B(389, 512) \end{array} \right) \quad (5.1)$$

Nun werden die Werte für R und B, sofern sie nicht als Teil der Maske oder als Filter definiert wurden, in jedem Bildpunkt miteinander verglichen, in der Form:

$$V = V(i, j) = \frac{R(i, j)}{B(i, j)} \quad \text{für } i = 1, 389 \text{ und } j = 1, 512 \quad (5.2)$$

²jeweils ein Tripel (R,G,B) bildet einen Bildpunkt

Ist dieses Verhältnis V größer als ein vorgegebener Schwellwert " S ", in dieser Arbeit $S = 0,75$, so wird dieser Bildpunkt als "bewölkt" gewertet, für ein Verhältnis $< S$ als "unbewölkt". Die Abbildungen 5.2 und 5.3 zeigen Häufigkeitsverteilungen des Rot/Blau Verhältnisses (berechnet nach Einsetzen von Maske und Streulicht-Filter) für einen Zeitpunkt mit nahezu klarem Himmel (Abb. 5.2) sowie mit bedecktem Himmel (Abb. 5.3):

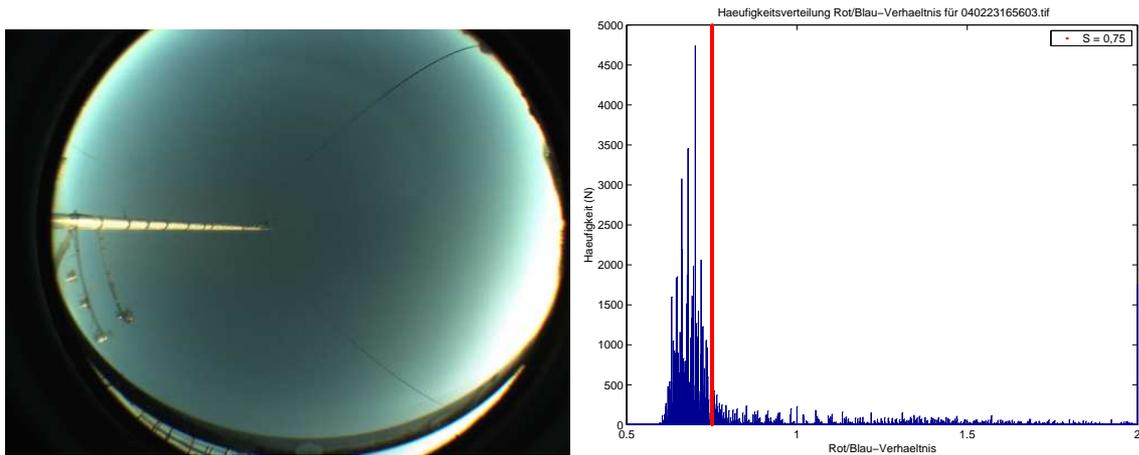


Abbildung 5.2: Wolkenkameraaufnahme für den 23.2.2004 16:56:03 Uhr (komplett unbewölkter Himmel) und Häufigkeitsverteilung des R/B-Verhältnisses. Die rote Linie markiert den Schwellwert 0.75.

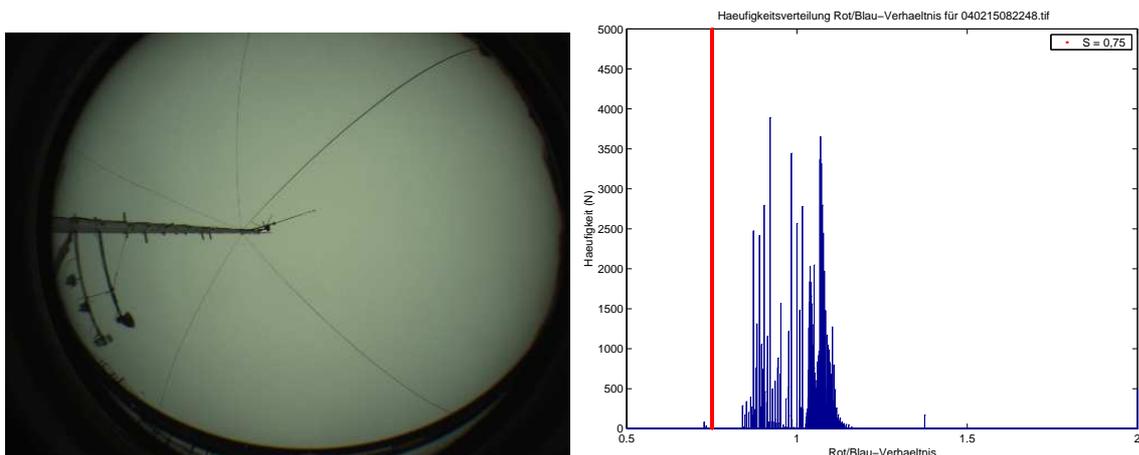


Abbildung 5.3: Wolkenkameraaufnahme für den 15.2.2004 08:22:48 Uhr (komplett bewölkter Himmel) und Häufigkeitsverteilung des R/B-Verhältnisses. Die rote Linie markiert den Schwellwert 0.75.

Man erkennt deutlich eine Verlagerung der Werte zu höheren R/B-Verhältnissen im bedeckten Fall. Der gewählte Schwellwert von 0,75 als geeignete Trennlinie (rot), zu deren Rechten die bewölkten und zu deren Linken die unbewölkten Pixel liegen, scheint hier allerdings nicht das Optimum zu sein. Man würde für die beiden Beispiele eher einen Schwellwert von 0.85 erwarten.

Schließlich werden alle Bildpunkte ausgezählt, die "bewölkten" ($= n_{cloudy}$) durch die komplette Anzahl an "bewölkten" und "unbewölkten" ($= n_{total}$) geteilt, und man erhält einen *Quasi-Bedeckungsgrad* "N":

$$N = \frac{n_{cloudy}}{n_{total}} \quad (5.3)$$

Dieser ist abgesehen von den oben genannten Fehlerquellen nur eine Näherung, da die Zuordnung zwischen Pixel und der horizontalen Ausdehnung der Projektion des Pixels auf die Wolkenunterkante noch nicht bekannt ist. In der zweiten Phase (Kapitel 5.8) soll dieses Problem weiter behandelt werden. Zudem ist die Acrylkuppel nicht winkeltreu, d.h. durch Brechung der Strahlung beim Durchgang durch die Kuppel aus ihrer Einfallrichtung liegt eine weitere Ungenauigkeit im System vor.

Zusätzlich zu dieser ersten Näherung des Bedeckungsgrades durch das R/B-Verhältnis wurden alle Pixel mit den Farbwerten "Grau", d.h. Rot und Grün > 129 als "Wolke" gewertet. Dies war notwendig, da sich ein komplett bewölkter Himmel nicht berechnen ließ, weil einige Wolken nicht als solche erkannt wurden. Dies könnte daran liegen, daß der Schwellwert für alle Pixel als konstant gewählt wurde. Pfister et al. (2003) benutzten pixelabhängige Schwellwerte, die einzeln für jedes Pixel bestimmt wurden. Hier wurden sie der Einfachheit halber über ihre Farbe als Wolke definiert. Probleme können sich dabei nicht ergeben, da alles Graue im Sichtfeld der Kamera außerhalb der Maske eine Wolke sein muß. Als Beispiel hierzu dient Abbildung 5.4 (die bedeckten Pixel sind in weiß dargestellt).

Als Test des Programms wurden 10 unbehandelte Aufnahmen mit unterschiedlichen Bedeckungsgraden und Wolkentypen ausgewählt und in Form einer kleinen Umfrage einer Gruppe von insgesamt 13 Personen, allesamt Mitarbeiter/Studenten der FE "Maritime Meteorologie" vorgelegt, die den Bedeckungsgrad schätzen sollten. Diese Schätzungen wurden mit den vom Programm berechneten Bedeckungsgraden verglichen. Die Ergebnisse für alle 10 Bilder zeigt Anhang A.2. Im Folgenden sollen nun kurz die Problemfälle, die mehr als 1/8 in Berechnung und Schätzung auseinanderliegen, sowie die besten Übereinstimmungen diskutiert werden³.

³Alle Bilder der 1. Testphase entstanden auf dem Dach des Dienstgebäudes Westufer des IFM-GEOMAR in Kiel

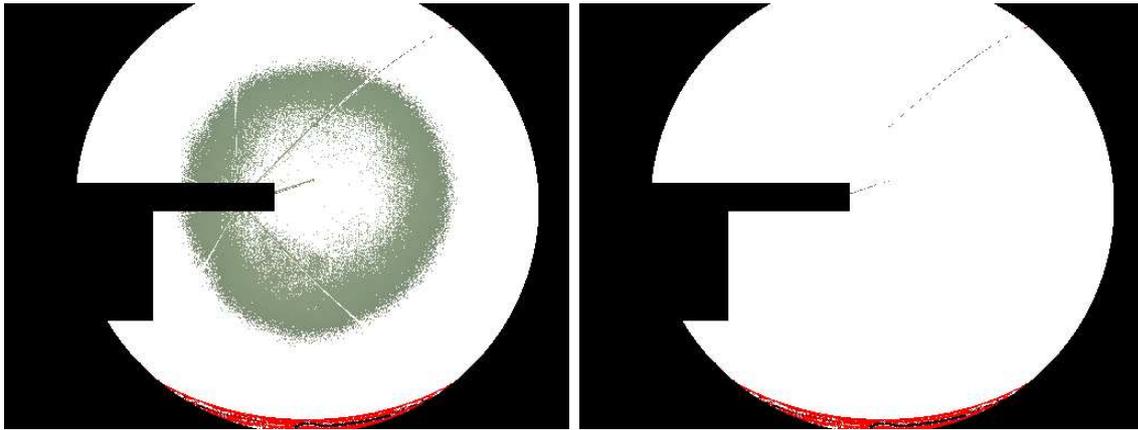


Abbildung 5.4: links: Bedeckung ohne die zusätzliche Einbeziehung der Wolkenerkennung nach ihrer Farbe, rechts: Bedeckung nach Einbeziehung.

5.3.2 Bedeckungsgrad mittels menschlicher Beobachtung und Wolkenkameradaten

Ein Ziel dieser Arbeit muß es sein, den Bedeckungsgrad unabhängig vom Typ der Bewölkung so gut wie möglich zu berechnen. Dabei ist insbesondere darauf zu achten, daß die Fälle mittleren bis hohen Bedeckungsgrades, bei denen Broken-Cloud Effekte auftreten, optimal erkannt werden. Abbildung 5.5 zeigt einen solchen Fall:

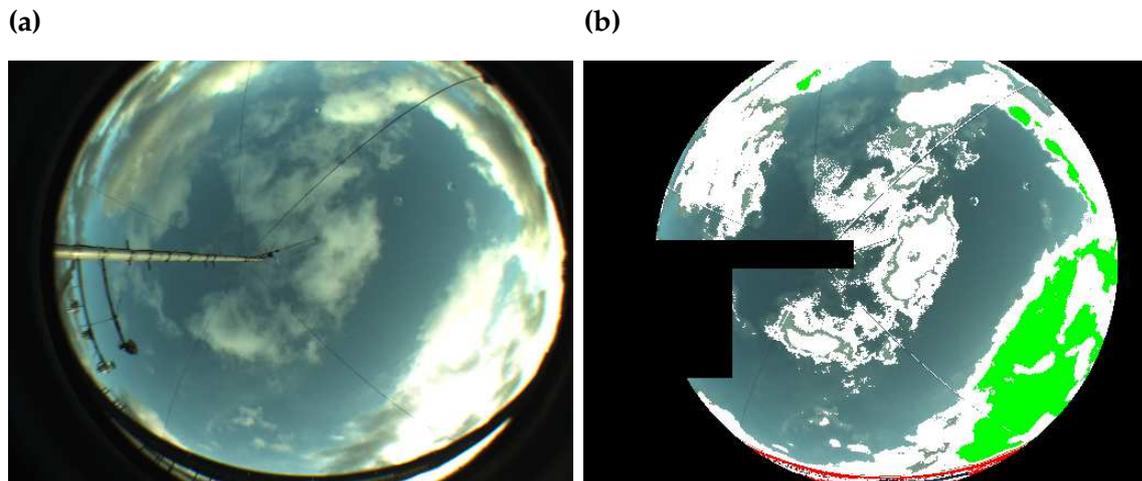


Abbildung 5.5: Cumulusbewölkung: (a) Originalbild, (b) Bedeckungsgradberechnung mit Maske und Filter.

Hier stimmen die Schätzungen von $3/8$ bis $4/8$ und die Berechnung mit $0,39$ gut über-

ein, die Bedeckung mit Cumuluswolken wird vom Algorithmus nahezu perfekt erkannt. Daß hier das Filterprogramm einen Teil der Wolken herausnimmt, verändert zwar die Berechnung etwas zu einem kleineren Bedeckungsgrad hin, diese Abweichung kann aber toleriert werden. Wie bereits erwähnt, wird für die Sylt-Messungen kein Filter verwendet. Daß es trotz Filter auch zur Erhöhung des Bedeckungsgrades kommen kann, wird aus Abbildung 5.6 deutlich. Hier wird das Streulicht an einem unbewölkten Tag als Wolke interpretiert und führt zu einem Bedeckungsgrad von 0,16 (1/8). In diesem Falle ist es wichtig, daß die Bilder auch in Form eines mpeg-Loops vorliegen, und somit die Berechnungen nachträglich überprüft werden können, indem man z.B. zeitnahe Bilder mit berücksichtigt. Sind dort Wolken zu erkennen, kann man davon ausgehen, daß das Streulicht am Rand tatsächlich eine Wolke ist. Treten auch auf zeitnahen Bildern keine Wolken auf, hat man es wahrscheinlich mit Streulicht zu tun. Desweiteren liegen noch die Strahlungsdaten zum Vergleich vor, die im Falle einer Wolke im Sichtfeld vielleicht eine Strahlungserhöhung oder -erniedrigung zeigen können.

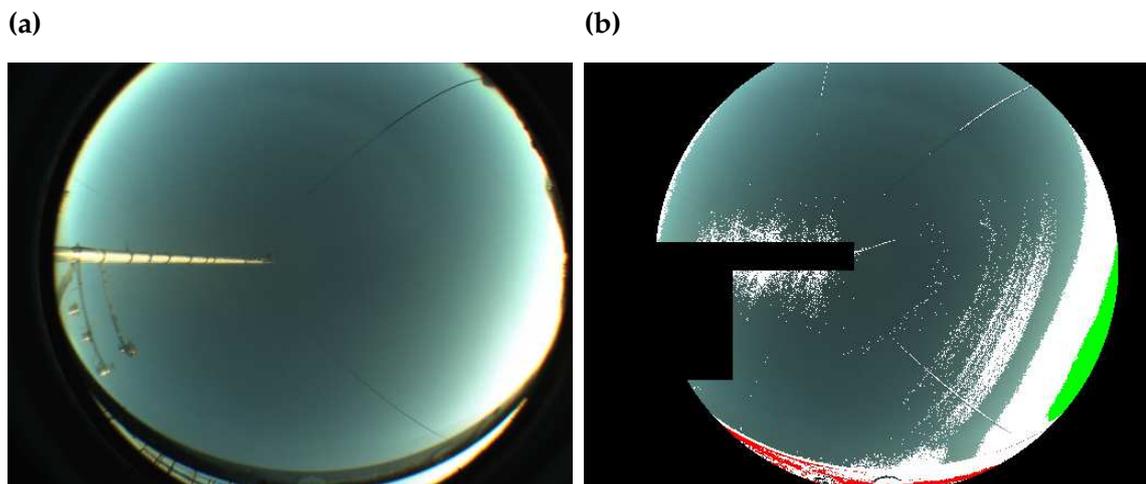


Abbildung 5.6: Wolkenfreier Himmel: (a) Originalbild, (b) Bedeckungsgradberechnung mit Maske und Filter.

Probleme ergeben sich weiterhin bei der Erkennung von Cirren (Abbildung 5.7). Die Schätzungen lagen im Bereich von 1/8 bis 8/8, die Berechnung liefert ein Ergebnis von 0,82 (etwa 7/8). Die Frage ist, wie genau in einem solchen Fall von einem Bild der Bedeckungsgrad vom menschlichen Auge zu schätzen ist, und ob die Cirren, die das Programm als Wolke erkannt hat, die einzigen Bildpunkte mit $V = R/B > 0,75$ sind. Hier dürften die Streueffekte der Kuppel einen großen Einfluß auf die Berechnungen haben. So ist auch dieser Fall mit zeitnahen Bildern zu vergleichen. Der menschliche Beobachter darf nicht zur Anpassung genutzt werden, liegen die subjektiven Schätzungen doch zu weit auseinander. Bezieht man somit alle möglichen Fehlerquellen mit in die Beurteilung ein, sollte das Programm genauere Ergebnisse liefern.

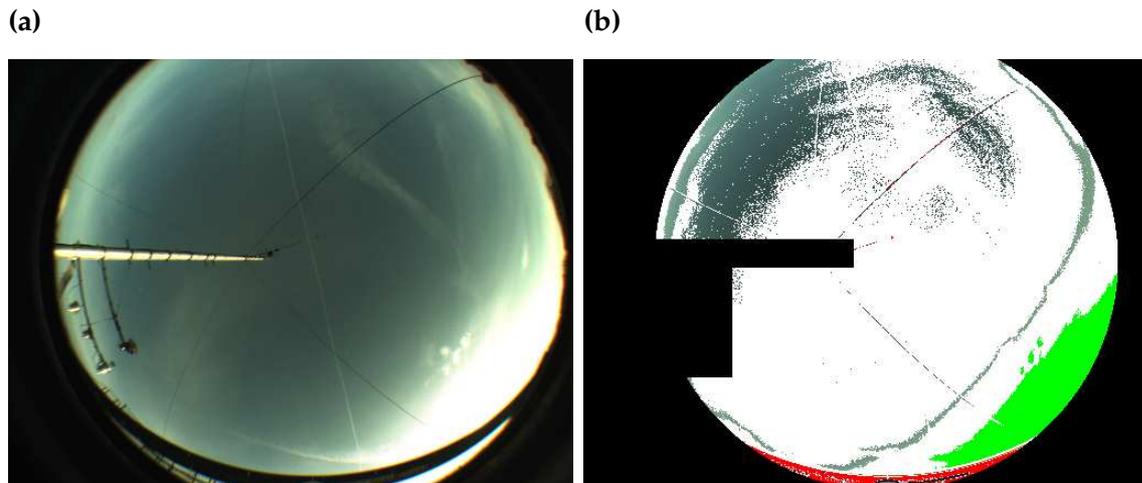


Abbildung 5.7: Cirrus-Bedeckung: (a) Originalbild, (b) Bedeckungsgradberechnung mit Maske und Filter.

5.3.3 Zenitwinkelabhängigkeit

Nun war die Frage zu klären, wie man jedem Pixel die Blickrichtung zuordnen kann, aus der es sein Signal bekommt und inwieweit sich dadurch der berechnete Bedeckungsgrad verändert. Die Fläche einer Wolke, die ein Pixel nahe dem Bildmittelpunkt sieht, ist geringer als die Fläche, die ein Pixel am Rand des Bildes erfasst, wie in Abbildung 5.8 schematisch dargestellt.

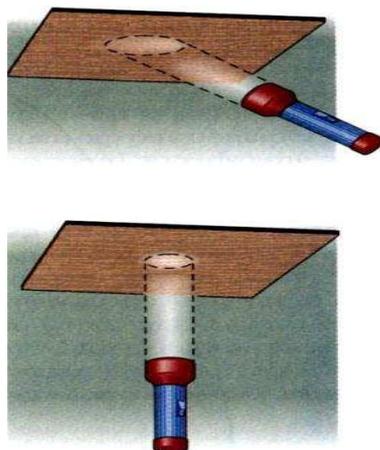


Abbildung 5.8: Oben: Fläche, die ein Pixel am Rand sieht ($\Theta > 0$), Unten: Fläche, die ein Pixel nahe dem Bildmittelpunkt sieht ($\Theta = 0$).

Aus der Graphik erkennt man, daß mit größerem Zenitwinkel Θ auch die Fläche des

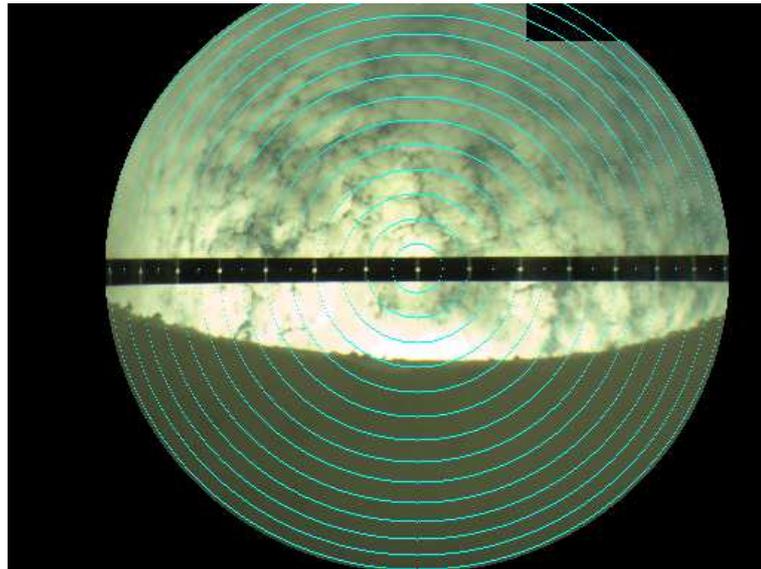


Abbildung 5.9: Abgelesene Winkelabhängigkeit der einzelnen Pixel: Die Kreise markieren die Zenitwinkel im Abstand von 5° .

betrachteten Ausschnitts der Wolke bzw. des Himmels größer ist (siehe Kapitel 5.3.1: Horizontalen Ausdehnung der Projektion der Pixel auf die Wolkenunterkante). Deshalb wurde nun jedes Pixel $P(i,j)$ entsprechend seiner Position (i,j) im Bild mit dem Kosinus des Zenitwinkels gewichtet:

$$P(i,j) = \frac{1}{\cos(\Theta)} \quad \text{für } i = 1, 389 \text{ und } j = 1, 512 \quad (5.4)$$

Die Position des Pixels entsprechend seinem Zenitwinkel aus Abbildung 5.9: Mit Hilfe einer umgebauten 28 Zoll/36 Loch Fahrradfelge, auf der die Winkel in 5 (kleine Striche) und 10 Grad (große Striche mit Loch) Abschnitten eingezeichnet wurden, wurde jedem Pixel über seine Entfernung zum Bildmittelpunkt derjenige Zenitwinkel zugeordnet, von dem es seine Bildinformationen bekommt. Die Kreise um den Mittelpunkt wurden hier "per Hand" möglichst genau an die Winkelmarkierungen angepaßt. Damit kann man jedem Pixel mit $cloudy = 1$ den jeweils zenitgewichteten Bedeckungsgrad ($cloudy_z = \frac{1}{\cos(\Theta)}$) zuordnen. Für das komplette Bild ergibt sich nun der Bedeckungsgrad nach

$$N = \frac{\sum cloudy_z}{n_total}, \quad (5.5)$$

wobei

$$n_total = \sum_{P(i,j)} \frac{1}{\cos(\Theta)} \quad (5.6)$$

wieder die Summe über die Anzahl aller in die Berechnung eingegangener Pixel ist, nun aber gewichtet mit dem jeweiligen Zenitwinkel.

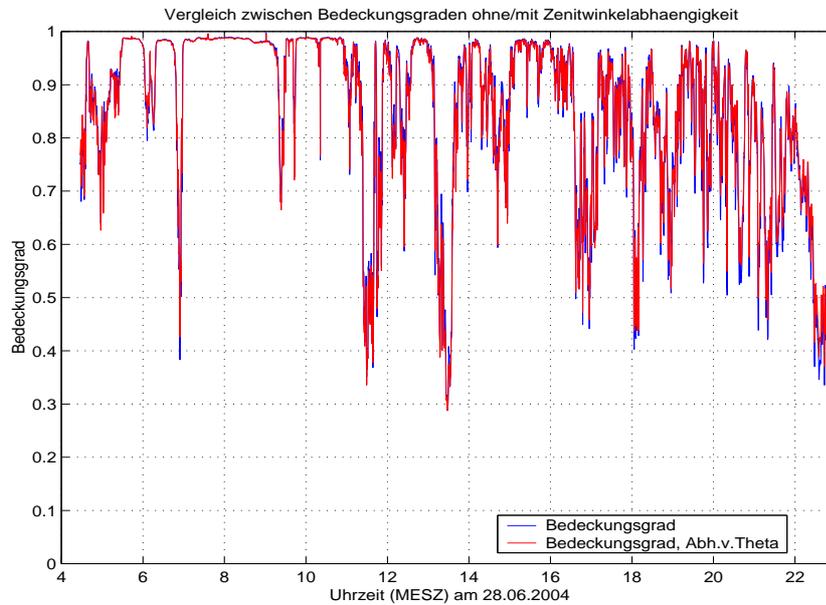


Abbildung 5.10: Vergleich der Bedeckungsgradberechnungen mit (rot) und ohne (blau) Abhängigkeit von Θ für den 28.Juni 2004.

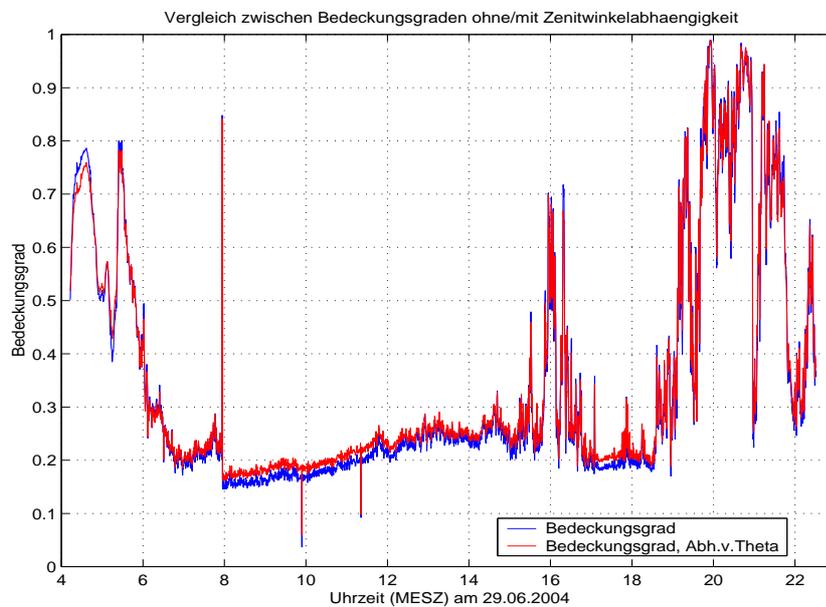


Abbildung 5.11: Vergleich der Bedeckungsgradberechnungen mit (rot) und ohne (blau) Abhängigkeit von Θ für den 29.Juni 2004.

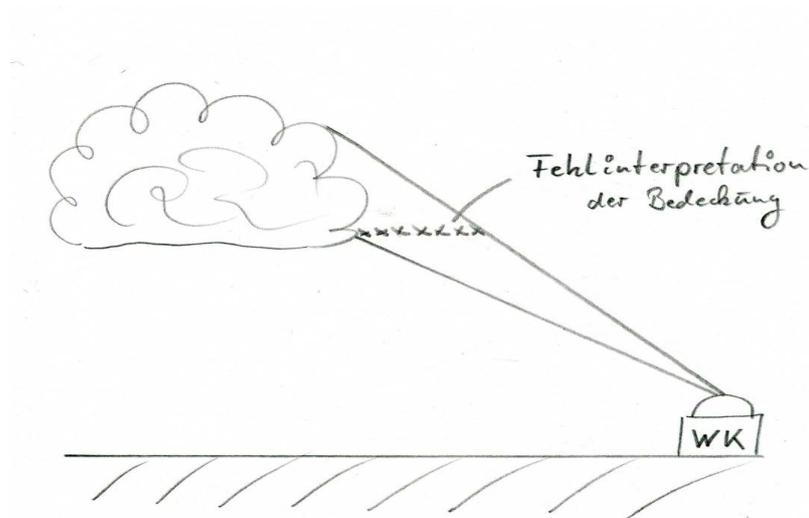


Abbildung 5.12: Schema zur Überschätzung des Bedeckungsgrades bei geringer Bewölkung.

Die Abbildungen 5.10 und 5.11 zeigen dazu den Vergleich der Bedeckungsgradberechnungen, ohne und mit Zenitwinkelabhängigkeit für zwei ausgewählte Tage mit unterschiedlich starker Bewölkung: Erkennt man für den 28. Juni (hoher Bedeckungsgrad) nur geringe Unterschiede, nämlich an den lokalen Extremwerten, fällt am 29. Juni (niedriger Bedeckungsgrad) die Zeitspanne von etwa 7 bis 19 Uhr MESZ auf, in der der Bedeckungsgrad mit Θ -Abhängigkeit (rote Kurve) fast durchgängig höhere Werte aufweist. Dies ist nicht verwunderlich, da bei geringen Bedeckungsgraden die Wolkenseiten in die Ebene projiziert werden und damit, besonders an den Bildrändern, die bedeckten Pixel höher gewichtet werden, als bei der Berechnung ohne Zenitwinkelabhängigkeit.

Das heißt nun, daß die Einbindung des Zenitwinkels nur bei den höheren Bedeckungsgraden sinnvoll wäre, wenn die Wolkenseiten nicht zusätzlich als Bedeckung mißinterpretiert werden. In diesen Fällen aber verlaufen die Bedeckungsgrade für beide berechneten Kurven nahezu aufeinander. Die Zenitwinkelabhängigkeit hat demnach nur einen geringen Einfluß auf das Ergebnis (Abbildung 5.10). Bei geringeren Bedeckungsgraden allerdings führt sie zur Überschätzung des Bedeckungsgrades gegenüber der "normalen" Kurve, wie in Abbildung 5.12 schematisch dargestellt. In dieser Arbeit wird daher für alle weiteren Berechnungen die Zenitwinkelabhängigkeit außer Acht gelassen.

Zu Abb. 5.11 ist noch zu sagen, daß die Bedeckungsgrade bei den Werten von etwa 0,2 nach Betrachtung der Bilder und des Mpeg-Loops als unbewölkt ausgemacht wurden. Dies ist dadurch zu erklären, daß der Streulichtfilter zur besseren Darstellung der mittleren bis hohen Bedeckungsgrade, die ja als Voraussetzung für den Broken Cloud Effekt vorherrschen müssen (s.o.), und aufgrund der klaren Luft am Messort ausgeschaltet

wurde. Es wurde entschieden, diesen Fehler in den Berechnungen hinzunehmen, um die Wolkenerkennung bei höheren Bedeckungsgraden zu optimieren! Im Kapitel 7 werden wir sehen, daß die maximalen Strahlungserhöhungen bei fast komplett bedecktem Himmel auftreten und die Fälle geringer Bewölkung auch geringere Werte aufweisen.

Eine weitere Möglichkeit zur Bedeckungsgradbestimmung zeigen Dürr und Philipona (2004) auf: Mit Hilfe ihres APCADA-Algorithmus wird direkt aus der langwelligen thermischen Gegenstrahlung der Bedeckungsgrad bestimmt. Dieses Verfahren funktioniert im Gegensatz zur Bestimmung der Bedeckung aus der kurzwelligen Strahlung mit sog. *Sky Imager* Systemen auch nachts, ist für diese Arbeit aber unerheblich, da Nachtmessungen nicht erforderlich sind. Allerdings wäre zukünftig ein Vergleich mit dieser Methode von Interesse.

5.4 Beschreibung der Wolkeninhomogenität

5.4.1 Umfang/Fläche-Beschreibung

Die Idee besteht darin, aus dem Verhältnis der gesamten Wolkenpixel zu den Wolkenrandpixeln Rückschlüsse auf die Art der Bedeckung zu ziehen: Je kleiner dieses Verhältnis, desto komplexer und durchbrochener ist die Wolkenstruktur (bei gleichem Bedeckungsgrad) und umgekehrt. Dies soll Abbildung 5.13 verdeutlichen: Hier sind zwei charakteristisch unterschiedliche Szenarien gezeigt, eine durchbrochene Cumulusbewölkung und eine komplett stratiforme Bewölkung.

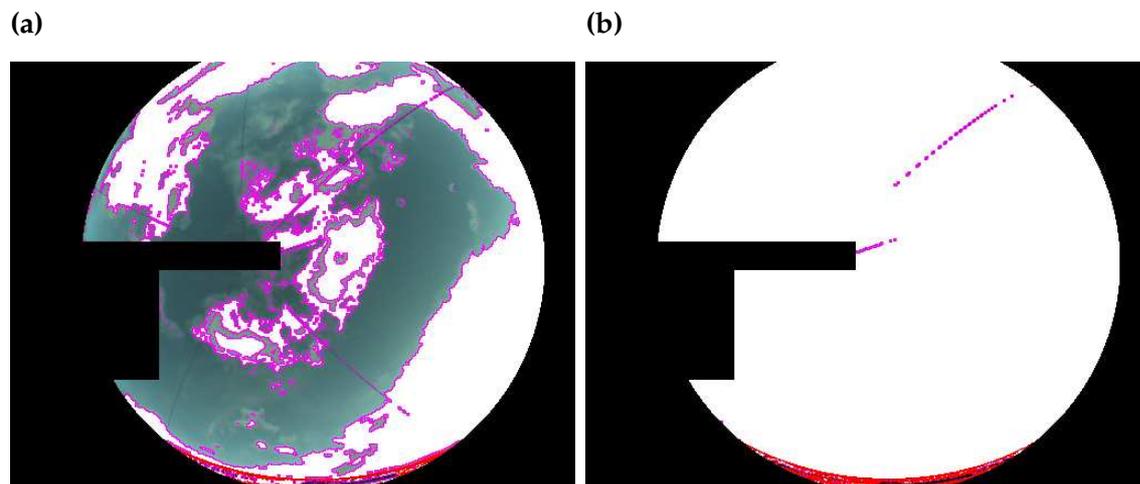


Abbildung 5.13: Wolken- (weiß) und Wolkenrandpixel (magenta) für (a) Mittlere durchbrochene Cumulusbewölkung und (b) komplett stratiforme Bewölkung.

Für die nachfolgenden Darstellungen wurde ein "Homogenitätsgrad" wie folgt definiert:

$$HG = \frac{N_Wolkenpixel}{N_Wolkenrandpixel} \quad (5.7)$$

Daraus ergibt sich ein "Homogenitätsgrad" von $HG \approx 4.7$ für 5.13a, da relativ viele Pixel im Wolkenrand liegen, für 5.13b ist $HG \approx 258.3$, da bei stratiformer Bewölkung kaum bis gar keine Wolkenränder zu erkennen sind⁴. Cirruswolken ergeben ähnliche HG wie die Cumuluswolken, da sie aufgrund ihrer Faserigkeit ebenfalls viel Wolkenrand aufweisen.

5.4.2 Fraktale Dimension

Fraktale bieten eine weitere interessante Möglichkeit, Wolkenformationen näher zu beschreiben. Wie alle natürlichen Objekte besitzen Wolken keine glatten geometrischen, sondern chaotische Formen aus selbstähnlichen großen und kleinen Strukturen. Daher ist eine Beschreibung im klassischen geometrischen Sinne auch schwierig und unzureichend.

Der Begriff *Fraktale* stammt aus der Dimensionstheorie und beschreibt geometrische Objekte, denen man aufgrund ihrer Eigenschaften eine gebrochene Dimension zuordnen kann. In der Literatur werden mehrere Dimensionsbegriffe aufgeführt. Die am häufigsten praktisch angewandte (da am einfachsten zu ermitteln) ist die *Box-Dimension*. Nach Hastings und Sugihara (1996) ist die Box-Dimension " D " einer Teilmenge " X " der Ebene, wie z.B. das Bild einer Wolke am Himmel oder des Wolkenrandes, wie folgt definiert:

Sei $N(r)$ die Anzahl der Kästchen mit der Kantenlänge r in einem Gitter, die X berühren. Dann hat X die Box-Dimension D , falls $N(r)$ dem Potenzgesetz

$$N(r) \approx c \left(\frac{1}{r} \right)^D \quad (5.8)$$

in dem Sinne asymptotisch genügt, daß

$$\lim_{r \rightarrow 0} N(r)r^D = c \quad (5.9)$$

gilt. Löst man diese Gleichung asymptotisch nach D auf, erhält man die Box-Dimension

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \left[-\frac{\log N(r)}{\log r} \right]. \quad (5.10)$$

⁴Die Marker in 5.13b sind Teile der Spanndrähte des Masts auf dem Dach des Dienstgebäudes Westufer des IFM-GEOMAR

Für den praktischen Gebrauch heißt das:

Man lege ein Gitter mit der Kästchenlänge r über die zu bestimmende Teilmenge und zähle alle Kästchen, die von der Teilmenge berührt oder geschnitten werden. Dann verkleinere man r so oft und so weit es geht und wiederhole zu jedem r das Auszählen der Kästchen. Schließlich hat man endlich viele Wertepaare $(r, N(r))$, die man nun in einem doppelt logarithmischen Diagramm auftragen kann. Im Idealfall sollte sich eine Gerade ergeben, deren Steigung mit dem umgekehrten Vorzeichen dann die Box-Dimension ergibt (BTU-Cottbus, 2004).

Die Abbildung 5.14 zeigt dazu recht anschaulich die Bestimmung der Box-Dimension der Küstenlinie Islands (Kraft, 1995) nach dem erläuterten Verfahren. Ebenso lässt sich auch die Box-Dimension von Wolkenrändern bestimmen.

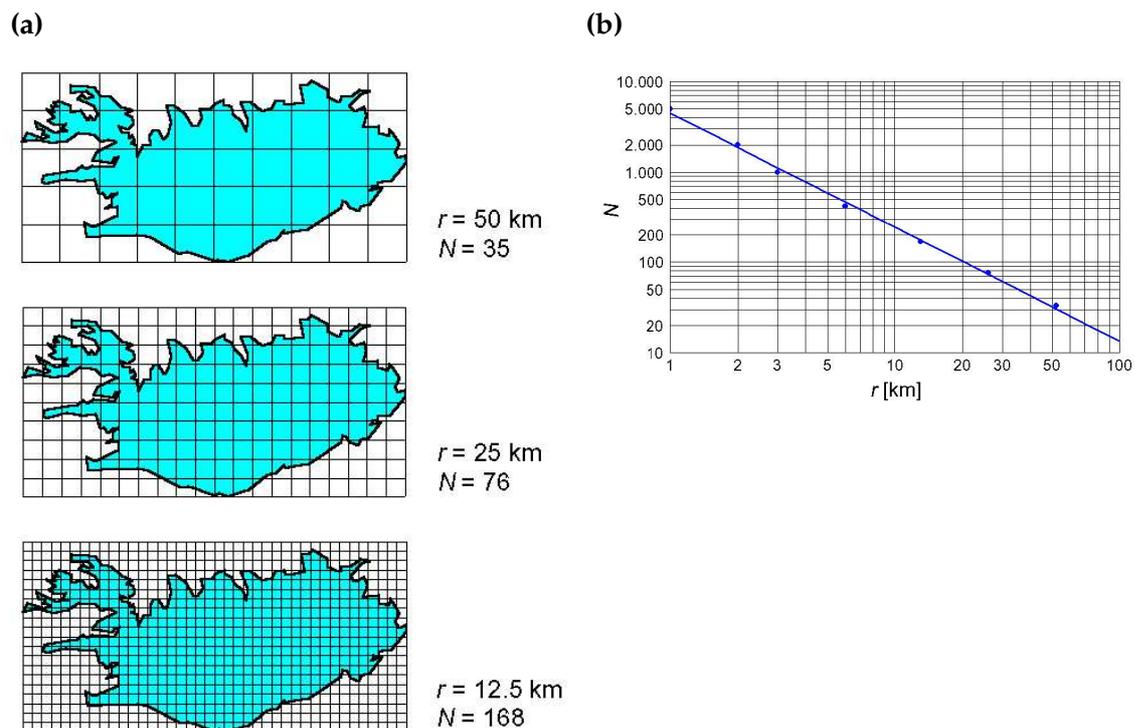


Abbildung 5.14: (a) Schema zur Berechnung der Box-Dimension der Küstenlinie Islands, (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm: Es ergab sich eine Geradensteigung von $-1,26$, und damit eine Box-Dimension von $D = 1,26$.

Bei der Bestimmung der Box-Dimension der kompletten Wolken aus den Kameradaten

wird nun entsprechend vorgegangen. Der einzige Unterschied besteht darin, daß nun nicht die Bildpunkte im Rand der Wolke, sondern die der gesamten Wolkenfläche ausgezählt werden. Die Kantenlängen der Kästchen werden hier anhand der Bildpunkte festgelegt, d.h. die kleinste mögliche Kantenlänge beträgt genau einen Bildpunkt, die maximal mögliche 512 Bildpunkte. Daraus folgt eine Anzahl von insgesamt 512 Wertepaaren $(r, N(r))$. $N(r)$ bezeichnet hier die Anzahl der Kästchen, in denen wenigstens ein Bildpunkt als Wolke bzw. als Wolkenrand gewertet wurde. Die ersten Testbilder ergaben ordentliche Ergebnisse, wie im Folgenden erklärt wird⁵:

Wir erwarten für das Bild einer Wolke eine fraktale Box-Dimension zwischen 1 und 2, ähnlich wie wir es in Abbildung 5.14 gesehen haben. Die Abbildungen 5.15 bis 5.17 liefern genau dieses Ergebnis: Der Kurvenverläufe im doppelt logarithmischen Diagramm sind nahezu Geraden mit Box-Dimensionen von $D \approx 1.37$ bei klarem Himmel bis $D \approx 1.64$ bei bedecktem Himmel. Wir können also aus den Bildern der Wolkenkamera die fraktale Box-Dimension der Wolkenfläche bestimmen und daraus auch die Art der Bedeckung ableiten: Je größer die Box-Dimension, desto dichter und zusammenhängender die Wolken (siehe auch Kapitel 7.4.2). Bestimmt man hingegen die Box-Dimension der Wolkenränder so bedeutet höhere Box-Dimension mehr Wolkenrand, d.h. mehr einzelne Wolken und i.a. geringere Bewölkung.

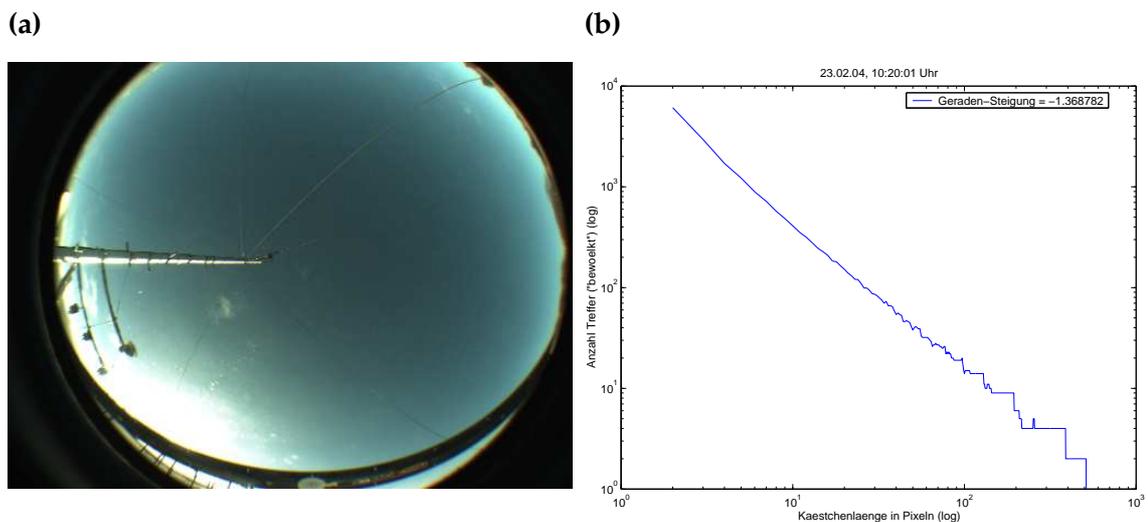


Abbildung 5.15: Berechnung der Box-Dimension der kompletten Wolkenfläche für einen klaren Himmel: (a) Originalbild der Wolkenkamera, (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit daraus berechneter Box-Dimension = 1.37 (negat. Geradensteigung).

Die theoretischen Werte für die Box-Dimension der kompletten Wolken, die sich für einen

⁵Weitere Testbilder sind im Anhang A.3 gezeigt, da sie ähnliche Ergebnisse liefern

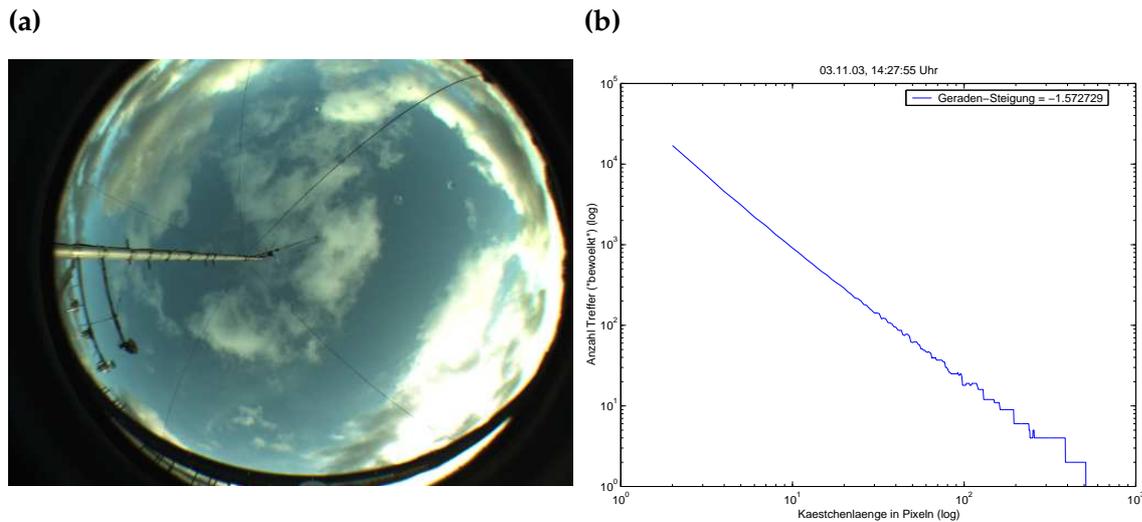


Abbildung 5.16: Berechnung der Box-Dimension der kompletten Wolkenfläche für mittlere Bedeckung: (a) Originalbild der Wolkenkamera, (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit daraus berechneter Box-Dimension = 1.57 (negat. Geradensteigung).

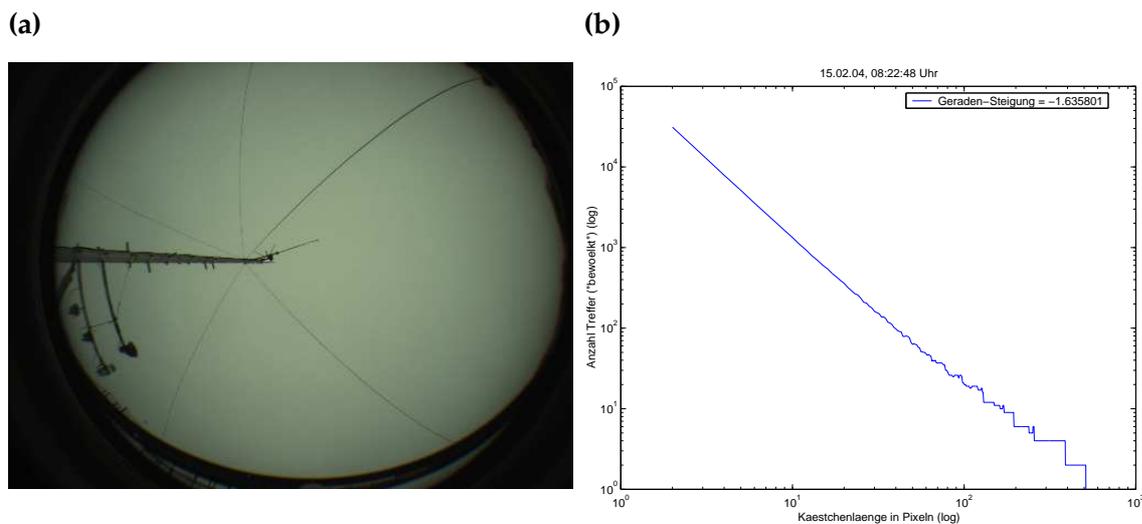


Abbildung 5.17: Berechnung der Box-Dimension der kompletten Wolkenfläche für einen bedeckten Himmel: (a) Originalbild der Wolkenkamera, (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit daraus berechneter Box-Dimension = 1.64 (negat. Geradensteigung).

vollkommen bedeckten und einen vollkommen klaren Himmel ergeben müssten, sind in den Abbildungen 5.18 und 5.19 dargestellt. Da die Dimension eines Punktes genau 0 ist, sollte für einen klaren Himmel eine Bestimmung der Box-Dimension einer nicht vorhandenen Bewölkung auch kein Ergebnis liefern, was auch der Fall ist. Deshalb wurde in

Abbildung 5.19 ein Bildpunkt in der Mitte des Bildes als Wolke gesetzt, der dann die Dimension 0 haben sollte, was auch in etwa herauskommt (0.053).

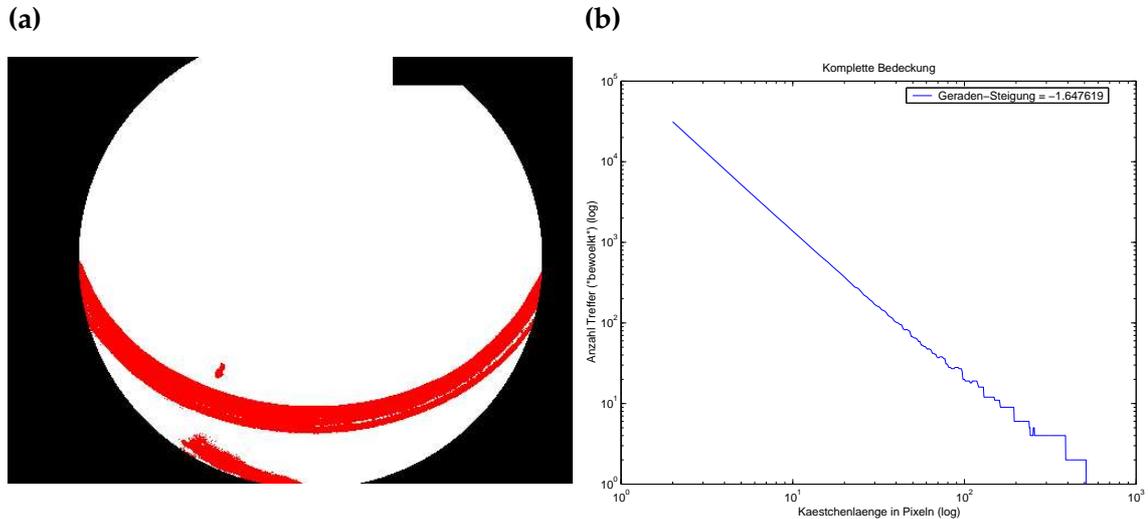


Abbildung 5.18: (a) *Komplette Bedeckung*, (b) *Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit Box-Dim. = 1.6476*.

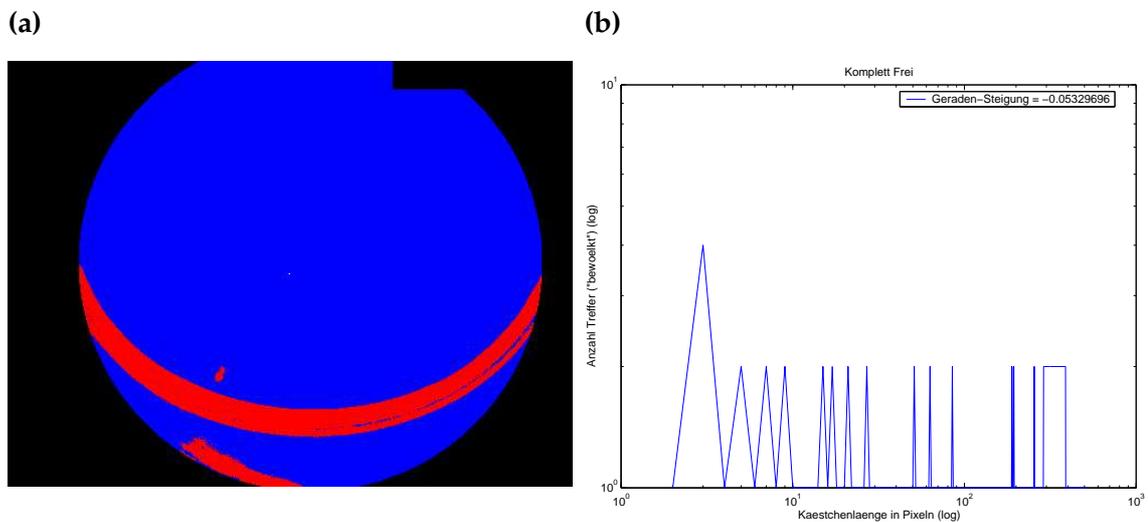


Abbildung 5.19: (a) *Komplett frei (ein Pixel bedeckt, sonst kein Ergebnis)*, (b) *Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit Box-Dim. = 0.0533*.

Für einen komplett bedeckten Himmel erwartet man eine Box-Dimension nahe 2, also die Dimension einer Fläche. Nun ist der zu betrachtende Bildausschnitt ein Rechteck mit ungleichen Kantenlängen, daß in Quadrate aufgeteilt wird und somit nicht in exakte

kleinere Kopien seiner selbst. Die Dimension sollte daher kleiner als 2 sein (Es ergab sich schließlich ein Wert von rund 1.65 für komplett bedeckten Himmel). Weiterhin zeigt Abbildung 5.20 ein theoretisches Beispiel für einen etwa zur Hälfte bedeckten Himmel. Hier muß die Box-Dimension nun zwischen 1 (Dimension einer Geraden) und 1.65 liegen.

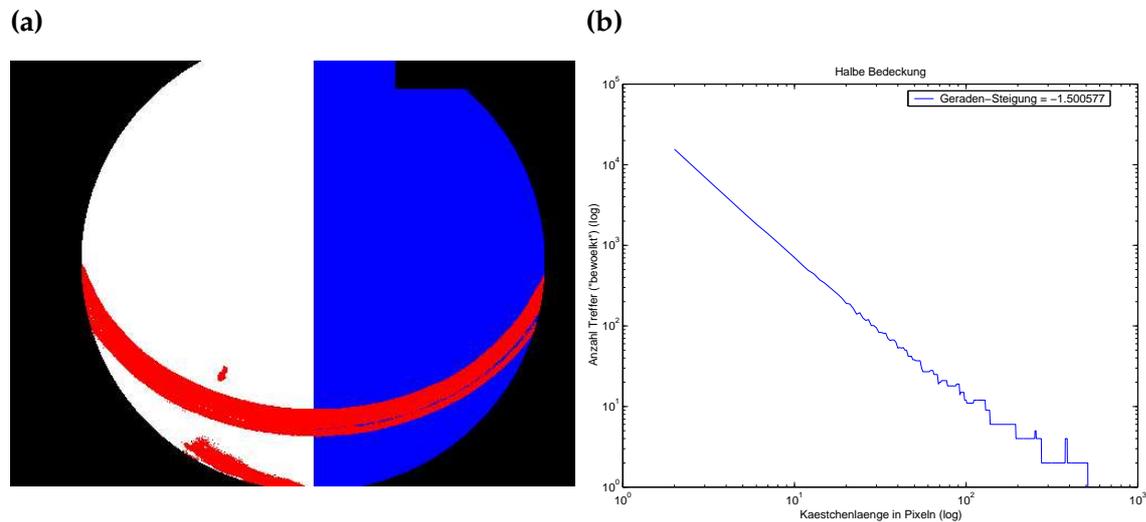


Abbildung 5.20: (a) Halbe Bedeckung, (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit Box-Dim. = 1.5006.

Würde man hier die Boxdimension des Wolkenrandes bestimmen, ergäbe der unbewölkte, sowie der komplett bewölkte Himmel kein Ergebnis, da kein Wolkenrand zu erkennen ist. Bei genau halber Bedeckung nach Abb. 5.20 müßte sich für den Wolkenrand eine Box-Dimension von genau 1, also der Box-Dimension einer Geraden, ergeben.

6. Verarbeitung der Strahlungsdaten

Bevor die Strahlungsdaten mit den berechneten Bedeckungsgraden aus den Kamerabilddern verglichen werden können, müssen die Strahlungserhöhungen, welche die Stärke des Broken Cloud Effekts beschreiben, aus den Strahlungsmessungen bestimmt werden. Dieses soll im folgenden erklärt werden.

6.1 Anpassung der Clear-Sky Kurve

Die Stärke der am Erdboden gemessenen Strahlung hängt in erster Linie von Sonnenstand ab. Geht man von einer wolkenfreien Atmosphäre aus, so läßt sich die theoretische Strahlung nach Pfister et al. (2003) und Long und Ackermann (2000) mit der folgenden einfachen Formel berechnen:

$$S = \alpha \cdot S_0 \cdot \cos(\Theta)^\beta \quad (6.1)$$

Mit:

- $\alpha = 0,79 - 0,88$
- $S_0 = 1368 \text{ W/m}^2$
- $\beta = 1,21$

Dabei bezeichnet S_0 die Solarkonstante, Θ den Sonnenzenitwinkel (siehe Abb. 6.1) und α einen konstanten Vorfaktor, der die Schwächung der Strahlung auf ihrem Weg durch die Atmosphäre beschreibt. Long und Ackermann (2000) berechneten die Konstanten aus Messungen bei unbewölktem Himmel nach der Methode der kleinsten Quadrate (Schönwiese, 2000). Für diese Arbeit wurden die Konstanten an den Kurven für ganztägig unbewölkten Himmel der Sylter Messungen bestimmt und für die einzelnen Tage angepaßt.

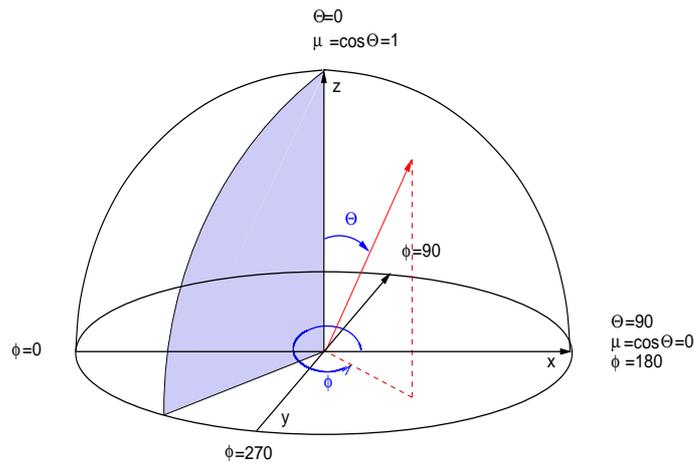


Abbildung 6.1: Schema zum Zenitwinkel "Θ" (Meyer, 2001): $\Theta \stackrel{\text{def}}{=} 0$, wenn die Sonne genau senkrecht über dem Beobachter steht.

Der Kosinus des solaren Zenitwinkels berechnet sich, abhängig von der Breite "Φ" und der Deklination "δ", nach Liou (1980) aus der Gleichung

$$\cos(\Theta) = \sin(\Phi)\sin(\delta) + \cos(\Phi)\cos(\delta)\cos\left(\frac{2\pi t}{86400}\right) \quad (6.2)$$

für jede Sekunde "t" des jeweiligen Tages. Die Deklination folgt aus

$$\delta = 0,40954 \cdot \sin(0,0172(T - 79,34974)) \quad (6.3)$$

mit dem Tag nach dem Julianischen Kalender "T" (Brodbeck, 2001).

Damit kann man die Strahlungserhöhungen und -abschwächungen als Differenz aus Messung und theoretischer Kurve erhalten (Abb. 6.2).

Wir haben nun zu jedem Zeitpunkt der Strahlungsmessung einen Wert der Strahlungserhöhung oder -abschwächung. Da die Wolkenkamera aber nur alle 15 Sekunden eine Aufnahme macht, wird für spätere Vergleiche mit den Wolkenmessungen aus den Strahlungsdaten die zeitnächste Strahlungserhöhung gesucht. Dieser Wert geht dann in die weiteren Berechnungen ein.

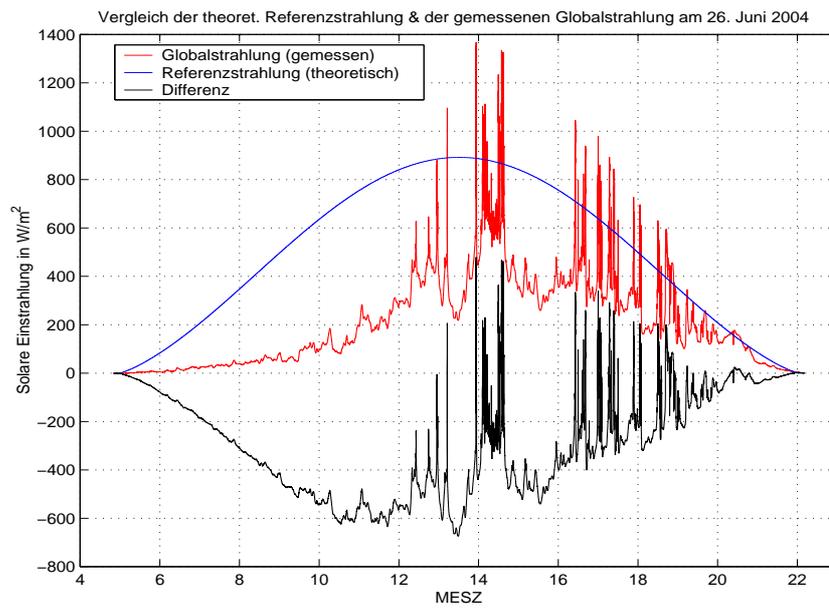


Abbildung 6.2: Tagesgang der solaren Einstrahlung an einem Tag mit durchbrochener Bewölkung incl. Referenzwerte für den unbewölkten Fall.

7. Ergebnisse

Nach diversen Problemen mit der Datenerfassung und Datensicherung ergab sich ein Gesamtmeßzeitraum auf Sylt vom 18. Juni 2004 bis zum 16. September 2004 (also 60 Tage). Davon konnten 47 Tage verwertet werden. Die restlichen 13 Tage mußten aufgrund von unkorrigierbaren Fehlern außer Acht gelassen werden. Im einzelnen gehörten dazu

- Tage, an denen die Kuppel der Wolkenkamera beschlagen, d.h. keine sinnvolle Bedeckungsgradbestimmung möglich war,
- Tage, an denen sich die schwarze Folie auf der Innenseite des Schattenrings aufgrund der Witterung komplett gelöst hatte (Darunter war der Ring weiß und wurde nun als Wolke mißinterpretiert),
- Tage mit langanhaltenden Niederschlägen, wodurch sich Tropfen auf der Kuppel über längere Zeit hielten und so ebenfalls eine vernünftige Bedeckungsgradbestimmung verhinderten. Da an solchen Tagen ohnehin vollständige und sehr dichte Bedeckung herrschte, und keine Broken Cloud Effekte auftreten konnten, war das "Fehlen" dieser Tage zu verschmerzen.

Pro Tag wurden so etwa 2000 - 4000 Wolkenkamerabilder und Ceilometermessungen, sowie 20000 - 30000 Strahlungsmessungen vorgenommen und ausgewertet. In Anbetracht dieser Datenmenge kann man trotz allem statistisch recht aussagekräftige Ergebnisse erwarten.

Abbildung 7.1 soll den Tageslauf der drei Meßinstrumente noch einmal verdeutlichen. Als Beispiel wurde wieder der 26. Juni 2004 ausgewählt. Hierbei werden nur die Strahlungserhöhungen und -abschwächungen gezeigt (siehe Abb. 6.2).

Man erkennt sofort, daß die maximalen Strahlungserhöhungen gegen 14:00 Uhr nicht bei geringer bis mittlerer Cumulusbewölkung auftraten, wie es bei Seewindzirkulation der Fall ist, sondern bei nahezu vollständig bedecktem Himmel. Verdeutlicht wird dies anhand der Ceilometermessungen für diesen Tag, hauptsächlich sehr tiefe und dichte Bewölkung mit Wolkenunterkantenhöhen von zeitweise nur 100 m. Anlage A.4 zeigt zum Vergleich die 5 Tage mit den stärksten Strahlungserhöhungen, von denen die meisten bei

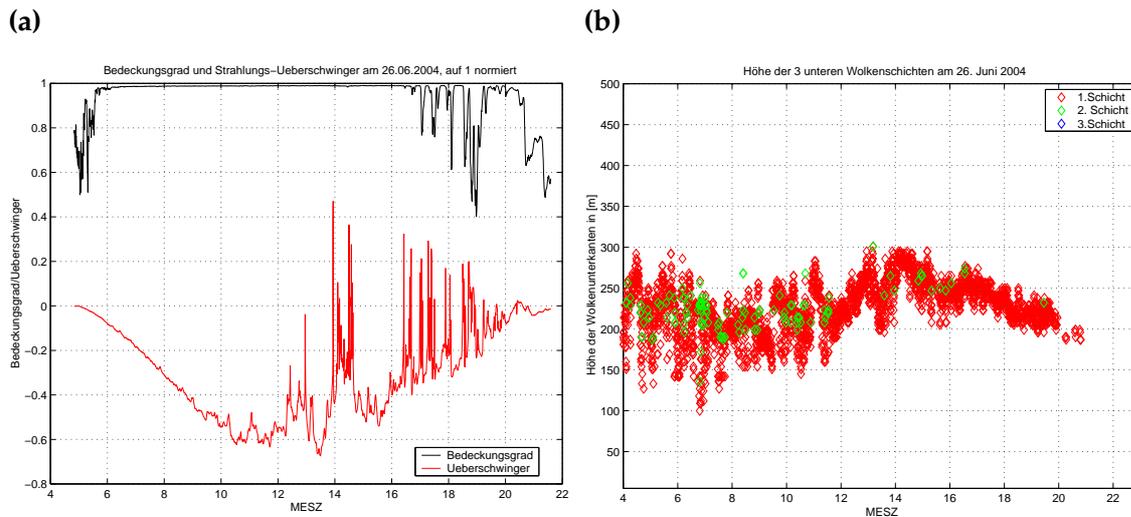


Abbildung 7.1: (a) Strahlungserhöhungen und -abschwächungen in $W/m^2/1000$ (rot) sowie Bedeckungsgrade (schwarz), (b) Ceilometerdaten für den 26. Juni 2004.

fast komplett bedecktem Himmel auftraten, einige aber auch bei mittleren Bedeckungsgraden.

Anhand einiger Fallbeispiele soll im Folgenden aufgezeigt werden, bei welchen unterschiedlichen Bewölkungssituationen starke Strahlungserhöhungen auftreten können.

7.1 Fallstudien

Aufgrund der zeitlich sehr hoch aufgelösten Strahlungsmessungen (1 Messung pro Sekunde !) war es möglich, auch die stärksten Strahlungserhöhungen gegenüber der theoretischen Strahlung bei wolkenlosem Himmel, im Folgenden als Referenzstrahlung bezeichnet, zu erhalten. Für die folgenden Beispiele wurde zu den Strahlungsdaten jeweils die zeitlich naheliegendste Aufnahme der Wolkenkamera gesucht. Dabei lagen maximal 7 Sekunden zwischen den beiden Messungen, d.h., auch wenn sich die Bewölkungssituation recht schnell ändern kann, so wird sie zum Zeitpunkt der Strahlungsmessung doch nahezu identisch ausgesehen haben.

Die Abbildung 7.2 und 7.3 zeigen ein unerwartetes Bild: Obwohl die Bedeckung eher niedrig bis mittelstark ist, treten sehr starke Strahlungserhöhungen auf, wobei der absolute Maximalwert der kompletten Messreihe, $481.16 W/m^2$ bei gerade mal 0.557, also etwa $4/8$ Bedeckung auftritt. Dazu zeigen sich die Fehler in der Bedeckungsgradbestimmung durch das Streulicht um die Sonne sowie durch die Acrylkuppel, wodurch der Bedeckungsgrad immer zu hoch eingeschätzt wird, besonders deutlich in der in Abb. 7.2

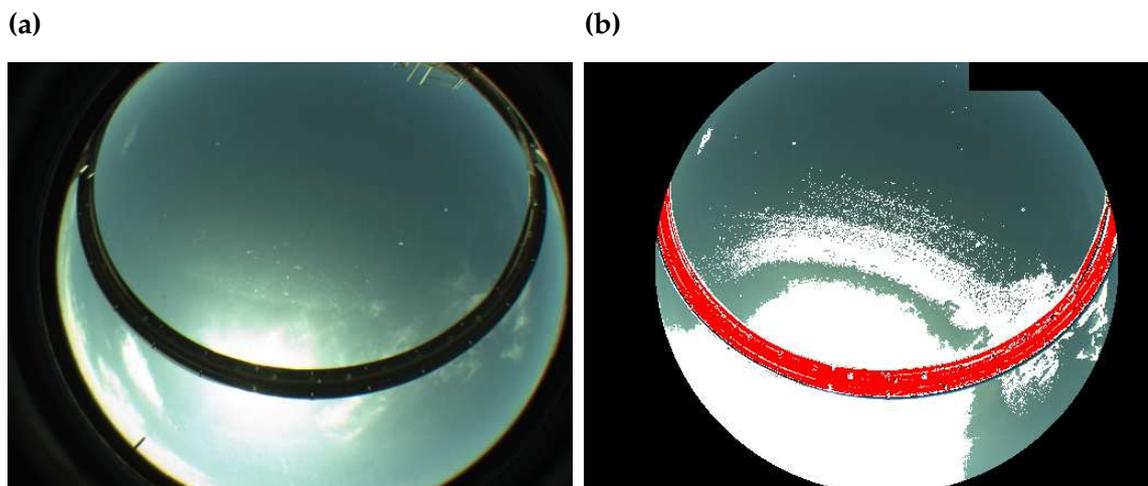


Abbildung 7.2: (a) Aufnahme der Wolkenkamera vom 01.07.04, 12:37:02 MESZ, (b) daraus berechneter Bedeckungsgrad ≈ 0.396 , zugehörige Strahlungserhöhung $\approx 397.28\text{W}/\text{m}^2$.

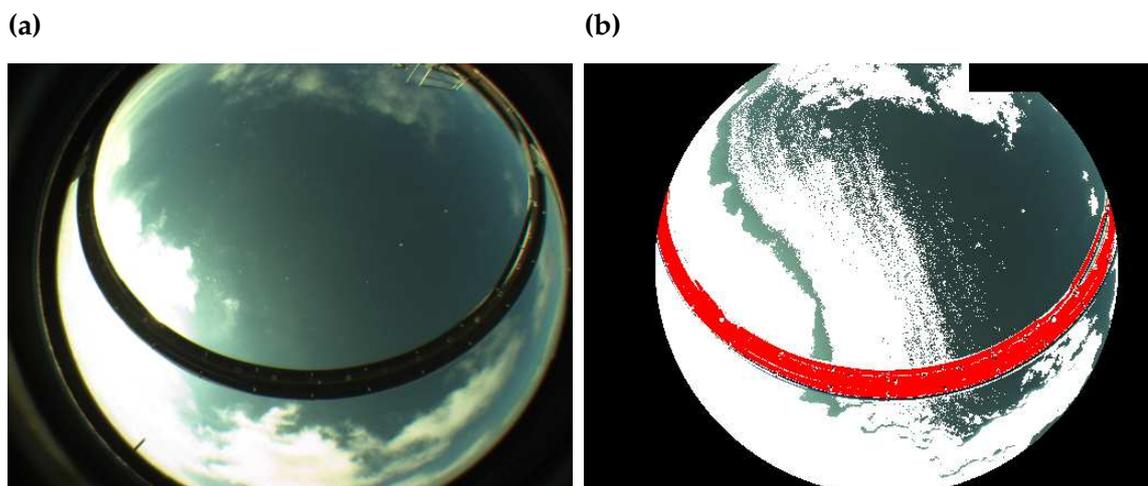


Abbildung 7.3: (a) Aufnahme der Wolkenkamera vom 01.07.04, 10:31:47 MESZ, (b) daraus berechneter Bedeckungsgrad ≈ 0.557 , zugehörige Strahlungserhöhung $\approx 481.16\text{W}/\text{m}^2$.

dargestellten Situation¹. In beiden Fällen überwiegt die Strahlungserhöhung durch Reflexion an den Wolkenrändern die durch diffuse Streuung durch die Wolken hindurch.

Auch in den Abbildungen 7.4 und 7.5 ist die Bedeckung keineswegs nahe 8/8, sondern bewegt sich eher in mittleren Bedeckungsgraden von 5/8 bis 6/8.

¹Der Schattenring (in rot) wird hingegen recht gut erkannt

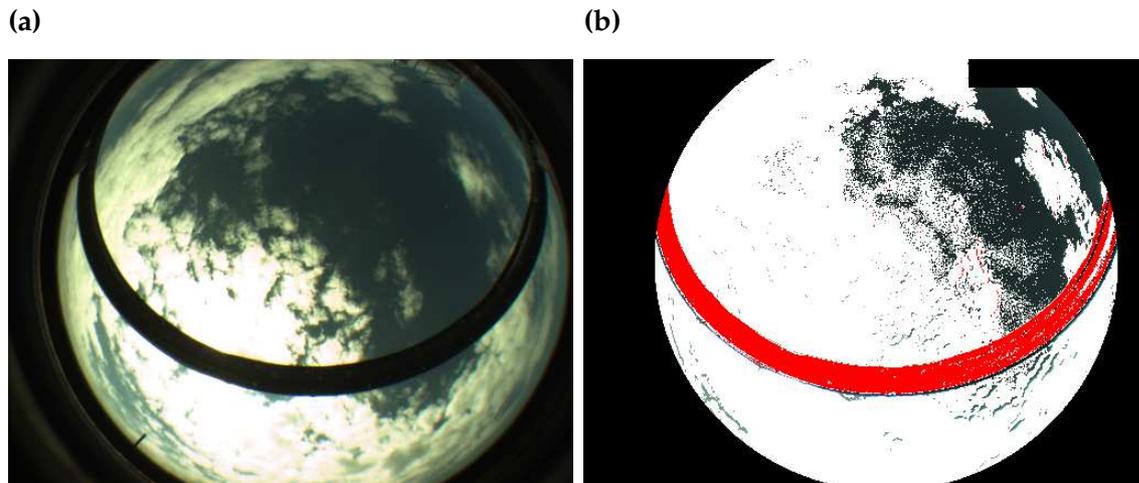


Abbildung 7.4: (a) Aufnahme der Wolkemkamera vom 01.07.04, 11:54:32 MESZ, (b) daraus berechneter Bedeckungsgrad ≈ 0.786 , zugehörige Strahlungserhöhung $\approx 385.86\text{W}/\text{m}^2$.

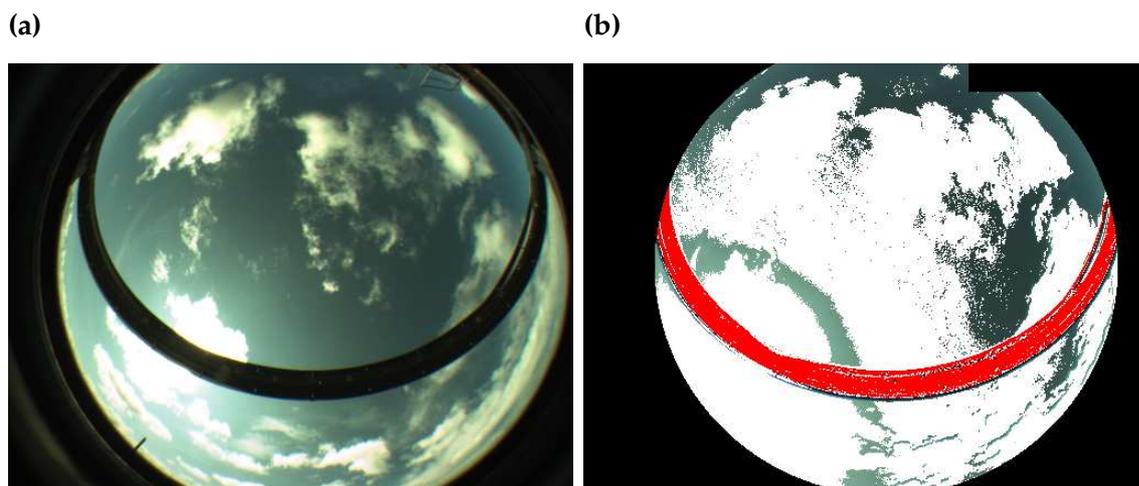


Abbildung 7.5: (a) Aufnahme der Wolkemkamera vom 06.07.04, 11:17:15 MESZ, (b) daraus berechneter Bedeckungsgrad ≈ 0.746 , zugehörige Strahlungserhöhung $\approx 417.69\text{W}/\text{m}^2$.

Die letzten beiden Beispiele zeigen einen etwas anderen Fall: Zwar sind in Abbildung 7.6 auch "nur" 6/8 Bedeckung zu erkennen, allerdings stimmen nun die Berechnungen mit den Beobachtungen nahezu überein. Zudem scheint die Sonne nahezu komplett verdeckt zu sein und die diffuse Transmission durch die Wolken hindurch nimmt nun einen größeren Anteil an der Strahlungserhöhung an als die Streuung an Wolkenrändern. Besonders deutlich wird dies in Abbildung 7.7: Hier wurde die zweitstärkste Strahlungserhöhung des kompletten Messzeitraumes erreicht. Die Bedeckung ist nahezu vollständig und die

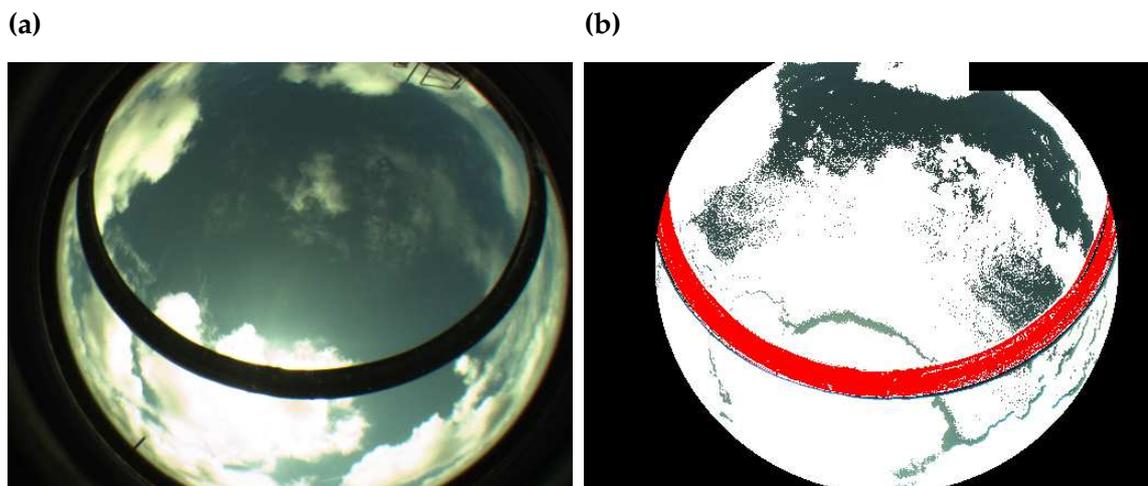


Abbildung 7.6: (a) Aufnahme der Wolkenkamera vom 01.07.04, 13:00:02 MESZ, (b) daraus berechneter Bedeckungsgrad ≈ 0.761 , zugehörige Strahlungsgerhöhung $\approx 408.49\text{W}/\text{m}^2$.

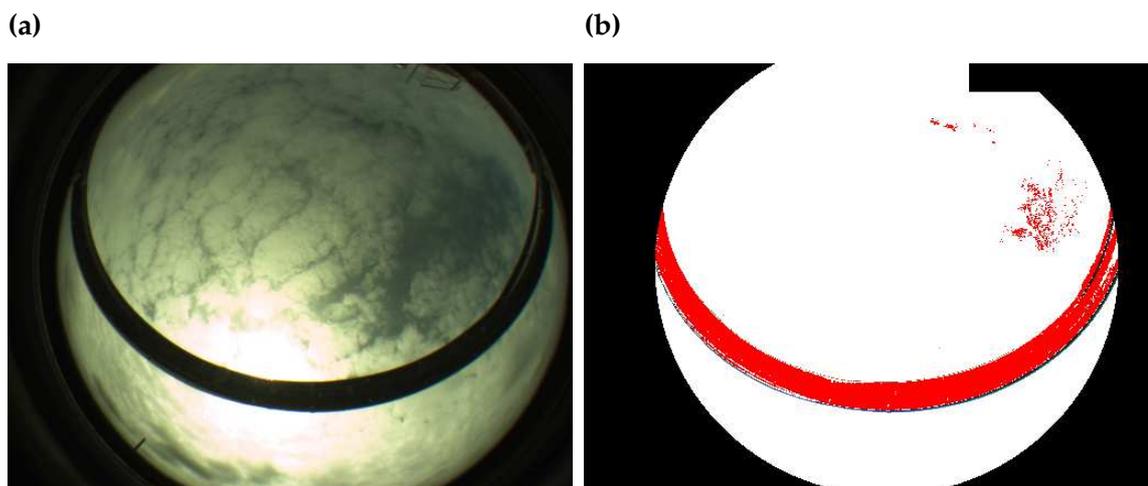


Abbildung 7.7: (a) Aufnahme der Wolkenkamera vom 15.07.04, 12:42:30 MESZ, (b) daraus berechneter Bedeckungsgrad ≈ 0.989 , zugehörige Strahlungsgerhöhung $\approx 472.42\text{W}/\text{m}^2$.

diffuse Streustrahlung um die Sonne überwiegt deutlich. Eventuell kommt durch eine Wolkenlücke auch kurzfristig direkte Strahlung hinzu, denn die Strahlungsmessungen zeigen im zeitlichen Verlauf starke Fluktuationen (siehe dazu Anlage A.4, Abb. A.21). Allerdings könnte auch eine hohe Bodenalbbedo und die damit verbundene erhöhte Gegenstrahlung eine Rolle spielen, da mit der Streuung auch immer ein Energieverlust verbunden ist.

Es gibt also viele mögliche Situationen, die extreme Strahlungserhöhungen verursachen können, sowohl bei relativ geringer, wie auch bei sehr starker Bewölkung. Welcher Fall in einer längeren Messreihe überwiegt, soll nun anhand der Messungen auf Sylt näher untersucht werden.

7.2 Strahlungserhöhungen in Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad

Um einfache lineare Zusammenhänge zwischen zwei Messreihen x_i und y_i herauszuarbeiten, bedient man sich in der Statistik häufig der Korrelations- und Regressionsanalyse. Der lineare Korrelationskoeffizient "r" berechnet sich nach Sachs (1992) aus folgender Formel:

$$r = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7.1)$$

Die Werte für r liegen zwischen -1 und 1. $r > 0$ bedeutet dann, daß x und y gleichzeitig ansteigen, bzw. $r < 0$, daß y fällt, wenn x ansteigt. $r = 0$ heißt, daß beide Größen nicht miteinander korrelieren, also nicht miteinander in Zusammenhang stehen. Korrelieren zwei Größen miteinander, so läßt sich im Streudiagramm beider Größen eine Regressionsgerade derart legen, daß der Abstand der einzelnen Punkte zur Geraden minimal wird. Bei $r = 1$ (-1) hieße das, alle Punkte liegen exakt auf der Geraden, die eine positive (negative) Steigung haben muß.

Abbildung 7.8 zeigt die Korrelation und die lineare Regression für die Strahlungserhöhungen und den dazugehörigen Bedeckungsgraden, unabhängig von der Stärke der Strahlungserhöhung²: Es ergab sich eine Korrelation von $r \approx 0.404$ für den gesamten Messzeitraum, d.h. für ein Anstieg der Strahlungserhöhungen bei zunehmender Bewölkung mit einem Maximum bei fast komplett bedecktem Himmel. Ein Bedeckungsgrad von 1 entspricht 8/8 oder 100 % Bedeckung. Dies war auch zu erwarten, da das Maximum an Strahlung, daß zum Erdboden gelangt, erreicht werden muß, wenn sowohl die direkte solare, als auch die diffuse Strahlung durch Wolken und die an den Wolkenrändern gestreute Strahlung zusammenkommen. Je mehr Wolken nun am Himmel sind, desto größer ist die diffuse Strahlung. Dann genügt ein einziges wolkenfreies Stück, durch das direkte und gebrochene Strahlung hindurchkommt und zum Messgerät gelangt, um einen maximalen Strahlungswert zu erhalten.

²Hierbei wurden alle Werte genommen, die größer als die Referenzstrahlung sind

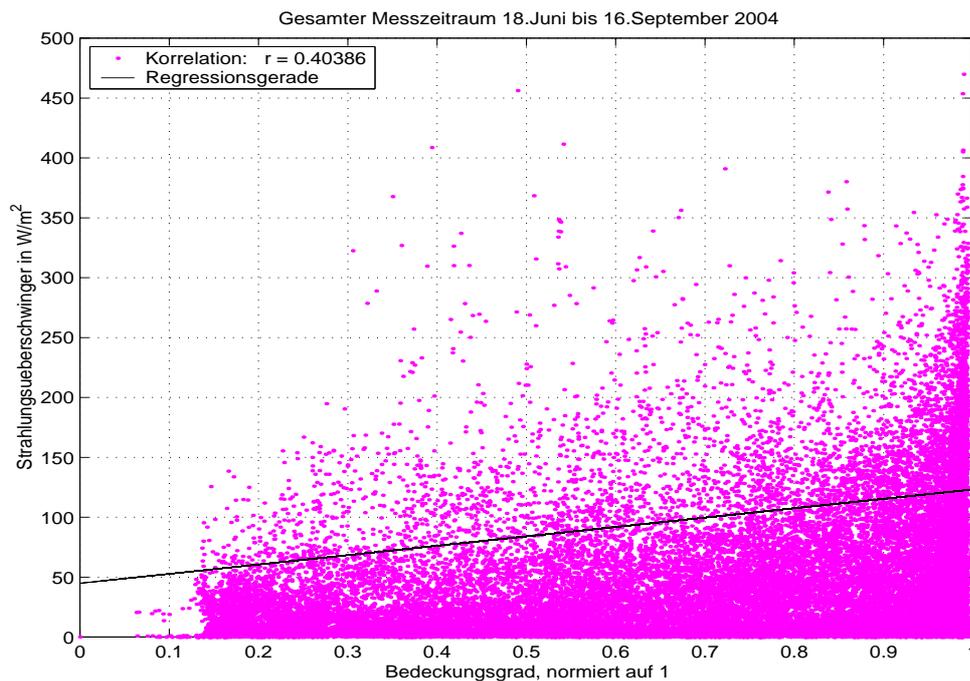


Abbildung 7.8: Korrelation zwischen Strahlungserhöhungen und Bedeckungsgraden für den gesamten Messzeitraum.

Führt man dazu eine Signifikanzanalyse nach Schönwiese (2000) durch, so ergibt sich ein Mutungsbereich von 0.39 bis 0.42, in dem mit 99.99 % Wahrscheinlichkeit der Korrelationskoeffizient der zugehörigen Grundgesamtheit (GG) liegen wird. Diese GG gibt die theoretische Menge an, die alle weiteren möglichen Messungen der beiden Parameter (Strahlungsüberschwinger und Bedeckungsgrad) enthalten würde. Mit 80 % Wahrscheinlichkeit ergäbe sich sogar ein Mutungsbereich des Korrelationskoeffizienten von 0.400 bis 0.407, was einer Abweichung vom berechneten Korrelationskoeffizienten von nur 1 % entspricht. Das heißt, die Wahrscheinlichkeit, daß ein berechneter Korrelationskoeffizient für alle weiteren Messungen nicht mehr als 1 % Abweichung von $r \approx 0.404$ ergeben würde, liegt bei immerhin 80 %.

Abbildung 7.9b zeigt nun die Häufigkeitsverteilung der Bedeckungsgrade bei Strahlungserhöhungen mit einem deutlichen Maximum bei Bedeckungsgraden nahe 1. Noch extremer zeigt sich diese Verteilung, wenn man die Tage mit Strahlungserhöhungen von über $400 W/m^2$, im folgenden als B.C.-Tage bezeichnet, gesondert betrachtet (Abbildung 7.9 oben).

Dies verdeutlicht die Tatsache, daß extreme Strahlungserhöhungen bevorzugt bei sehr hohen Bedeckungsgraden zustande kommen, da mit wachsendem Bedeckungsgrad eine Kombination aus Mie-Streuung an Wolkentröpfchen und Rayleigh-Streuung auch zu wachsender diffuser Einstrahlung führt. Ähnliches fanden auch Estupinan et al. (1996)

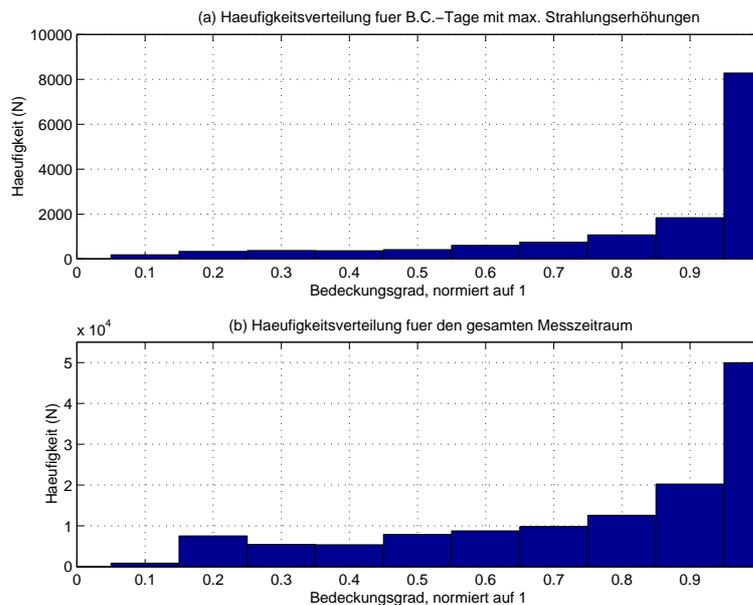


Abbildung 7.9: Häufigkeitsverteilungen der Bedeckungsgrade bei Strahlungserhöhungen für max. B.C.-Tage (oben) und den gesamten Messzeitraum (unten).

heraus: Ihre Ergebnisse lassen darauf schließen, daß 80 – 90% Wolkenbedeckung zu den stärksten UVB-Strahlungserhöhungen führen.

Die stärkste Strahlungserhöhung im gesamten Messzeitraum wurde am 01. Juli 2004 gegen 11:31:51 Uhr mit 481.16 W/m^2 über dem theoretischen Wert bei etwa $4/8$ Bedeckung (s.o.) erreicht. Das Strahlungsmaximum am Boden wurde mit 1366.10 W/m^2 am 26. Juni 2004 gemessen. Dieser Wert liegt nur knapp unterhalb der maximal möglichen am Oberand der Atmosphäre ankommenden Strahlung, $\approx 1368 \text{ W/m}^2$ bei senkrechtem Einfall, was in unseren Breiten aber nicht vorkommt (siehe Kapitel 2)! So kann mittlere bis starke Bewölkung dazu führen, daß die Abschwächung der Strahlung beim Durchgang durch die Atmosphäre vollständig wettgemacht wird³. Die Strahlungserhöhung macht in diesem Fall mehr als die Hälfte der Referenzstrahlung des unbewölkten Falles aus.

7.3 Strahlungserhöhungen in Abhängigkeit vom solaren Zenitwinkel Θ

Nun ist nicht nur die Frage, bei welchem Bedeckungsgrad die höchsten Strahlungsüberschwinger auftreten, sondern auch zu welcher Zeit, d.h., bei welchem solaren Zenitwinkel. Abbildung 7.10 zeigt dies, wiederum für den gesamten Messzeitraum (unten) und für die B.C.-Tage (oben). Es ergab sich eine negative Korrelation zwischen Strahlungs-

³Am 15 Juni 2004 wurden am Boden sogar 1385.76 W/m^2 (12:47:53 Uhr) gemessen. Leider wurden die dazugehörigen Kameradaten im Archivierungsprozeß gelöscht

erhöhung und Sonnenzenitwinkel, allerdings deutlich schwächer für den Gesamtmeßzeitraum: Je höher die Sonne steht, also je geringer Θ , desto eher kann Strahlung durch Wolkenlücken direkt und durch Streuung diffus zum Boden gelangen.

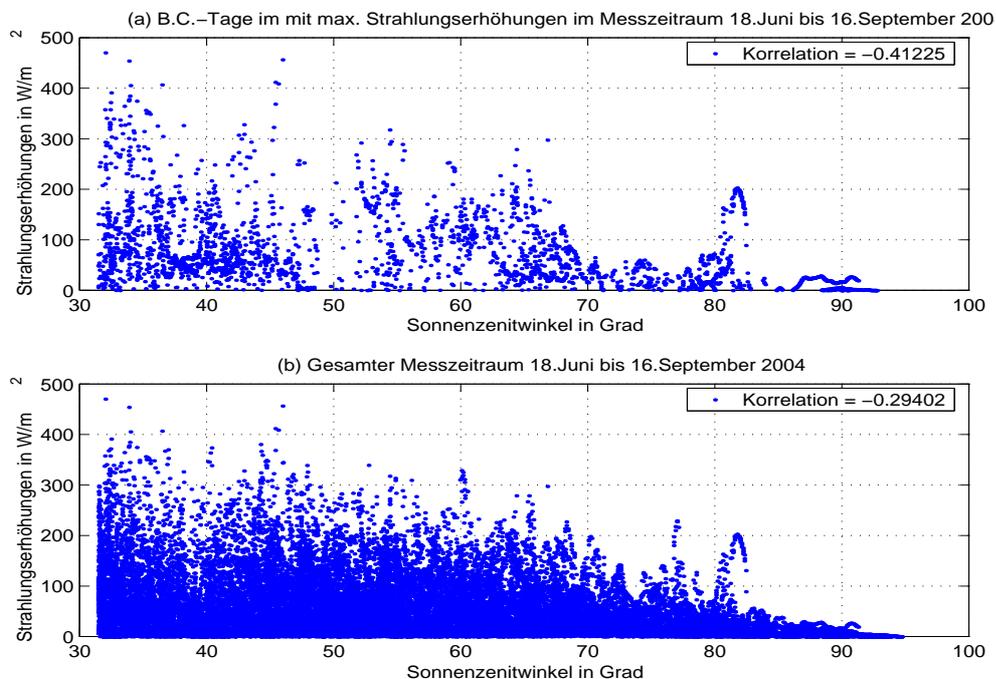


Abbildung 7.10: Strahlungserhöhungen in Abhängigkeit vom solaren Zenitwinkel für max. B.C.-Tage (oben) und den gesamten Messzeitraum (unten).

Sieht man sich dazu die Häufigkeitsverteilungen des Sonnenzenitwinkels (Abbildung 7.11) an, so fällt auf, daß das Maximum an B.C.-Tagen (oben) wie erwartet bei Θ um 35° liegt, also etwa zur Mittagszeit Ende Juni bis Mitte Juli für die geographische Breite von Westerland. Allerdings ergibt sich für den gesamten Messzeitraum (unten) ein etwas anderes Bild: Hier liegt das Maximum bei $\Theta = 55^\circ$.

Dies kommt dadurch zustande, daß sich der Tagesgang des solaren Zenitwinkels im Laufe des Jahres verändert (Abb. 7.12). Kommen in den Sommermonaten gegen Mittag Zenitwinkel bis etwa 31° vor (immer gerechnet für die Breite von Westerland), werden Mitte September nur noch max. 54° erreicht. Da die B.C.-Tage alle Ende Juni bis Mitte Juli liegen, und sich der gesamte Messzeitraum von Mitte Juni bis Mitte September erstreckt, muß sich die Häufigkeitsverteilung demnach zu höheren Zenitwinkeln verschieben, weil die Sonne im Mittel häufiger unter höheren Zenitwinkeln steht.

Die Monate Juli bis November folgen den Kurven von Januar (November) bis Mai (Juli).

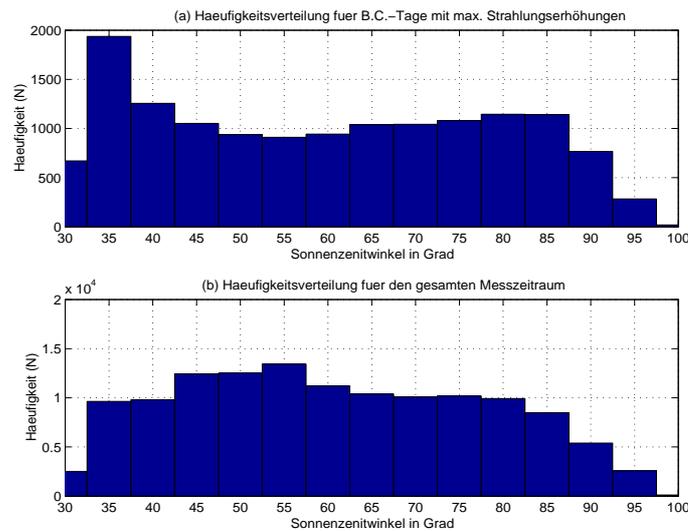


Abbildung 7.11: Häufigkeitsverteilung des solaren Zenitwinkels bei Strahlungserhöhungen für max. B.C.-Tage (oben) und den gesamten Messzeitraum (unten).

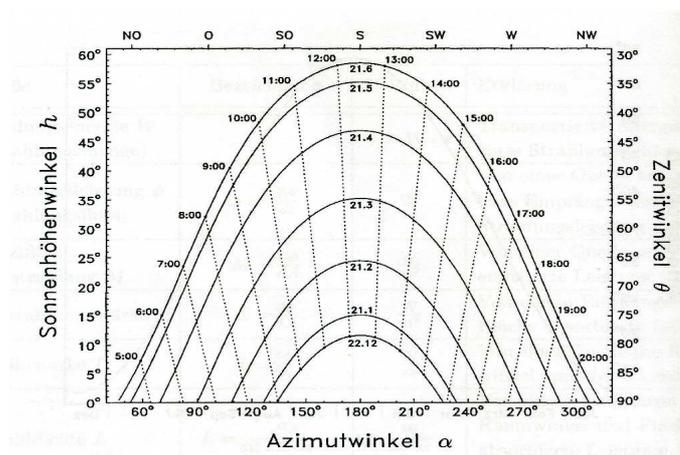


Abbildung 7.12: Tagesgang des solaren Zenitwinkels für Westerland (Sandmann, 2002), Zeiten in MEZ.

7.3.1 Einfluß des Sonnenzenitwinkels auf die Strahlungserhöhungen

Nun kann man sich den Einfluß der Zenitwinkel auf die Strahlungserhöhungen für den gesamten Messzeitraum noch etwas genauer ansehen. Dazu wurden die Bedeckungsgrade und Strahlungserhöhungen für Zenitwinkel von 30 – 35° bis 90 – 95° jeweils in 5° Intervalle zusammengefaßt und miteinander korreliert. Da die Abbildungen doch recht ähnlich sind, soll nur auf die wichtigsten Fälle eingegangen werden, die übrigen sind in Anlage A.5 einzusehen.

Beginnend mit Abbildung 7.13 (oben) für Zenitwinkel von 30 – 35° zeigt sich folgen-

des Bild: Die stärksten Strahlungserhöhungen treten erwartungsgemäß bei hohen Bedeckungsgraden auf, einige aber auch bei deutlich geringeren. Letzteres mag daher rühren, daß bei einem hohen Sonnenstand geringere Bewölkung zu einer verstärkten Strahlungsreflexion an den Wolkenrändern führt und weniger Strahlung diffus durch die Wolken kommt, weswegen die maximalen Werte auch nicht erreicht werden. Eine Korrelation von 0.469 ist trotzdem beachtlich.

Auffallend ist im Histogramm (unten) das häufige Auftreten von Strahlungserhöhungen bei Bedeckungsgraden um 0.2. Eine mögliche Erklärung könnte sein, daß hier geringe Erhöhungen mit eingeflossen sind, die aus Ungenauigkeiten in der Anpassung der theoretischen Referenzstrahlung herrühren. Zudem handelt es sich bei diesen Bedeckungsgraden um Werte für nahezu wolkenfreien Himmel, die am stärksten gegen Mittag sind. War bisher die Anpassung der theoretischen Referenzkurve nicht genau genug, kann sich aufgrund dieser Ungenauigkeiten und aufgrund der Streuung an der Acrylkuppel leicht eine Anhäufung in diesem Strahlungs- und Bedeckungsgradbereich ergeben.

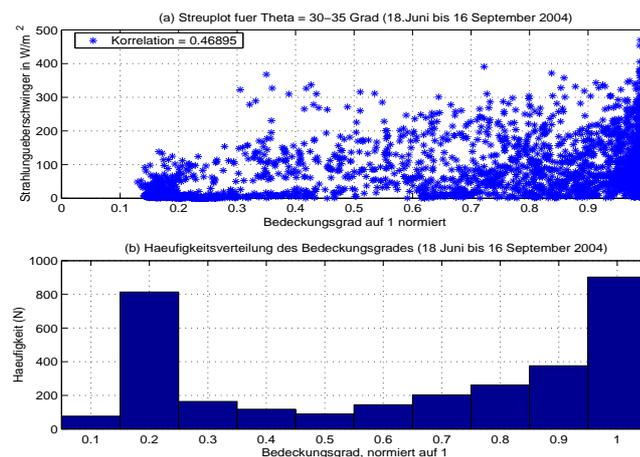


Abbildung 7.13: (oben) Streudiagramm, (unten) Häufigkeitsverteilungen der Bedeckungsgrade bei Strahlungserhöhungen für Zenitwinkel von $30 - 35^\circ$.

Abbildung 7.14 zeigt die Verteilung für Zenitwinkel von $45 - 50^\circ$. Nun treten Maxima bei Bedeckungsgraden zwischen 0.4 und 0.6 auf (oben), was am Einfluß der B.C.-Tage (s.o.) liegen dürfte: Starke Einstrahlung bei mittlerer bis hoher Bedeckung führt dazu, daß direkte, gestreute und diffuse Strahlung zum Boden gelangt. Dazu kommt die starke Reflexion der Strahlung an den direkt beleuchteten Wolkenseiten. Eine Korrelation von 0.433 weist aber dennoch auf eine Anhäufung bei hohen Bedeckungsgraden hin, wie auch in Abb. 7.14 (unten) deutlich wird. Hier erkennt man dazu ein drittes Maximum im Histogramm bei 0.6, während Bedeckungsgrade um 0.2 (entspricht nahezu wolkenlosem Himmel!) nicht mehr so häufig auftreten, allerdings immer noch ein lokales Maximum bilden.

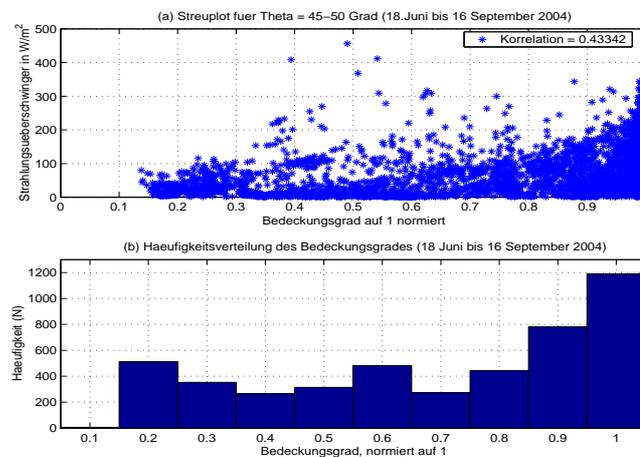


Abbildung 7.14: (oben) Streudiagramm, (unten) Häufigkeitsverteilungen der Bedeckungsgrade bei Strahlungserhöhungen für Zenitwinkel von 45 - 50°.

Abbildung 7.15 (oben) schließlich zeigt die stärkste Korrelation zwischen Bedeckungsgrad und Strahlungsüberschwingern mit $r \approx 0.615$ bei Zenitwinkeln von 65–70°. Das absolute Maximum liegt nun eindeutig bei Bedeckungsgraden nahe 1, die Häufigkeiten (unten) weisen noch immer drei lokale Maxima auf, wobei das Max. bei Bedeckungsgraden nahe 0.5 besonders stark ausgeprägt ist. Dies stützt die Hypothese, daß Reflexionen an den Wolkenseiten der verantwortliche Mechanismus für die Strahlungserhöhung ist.

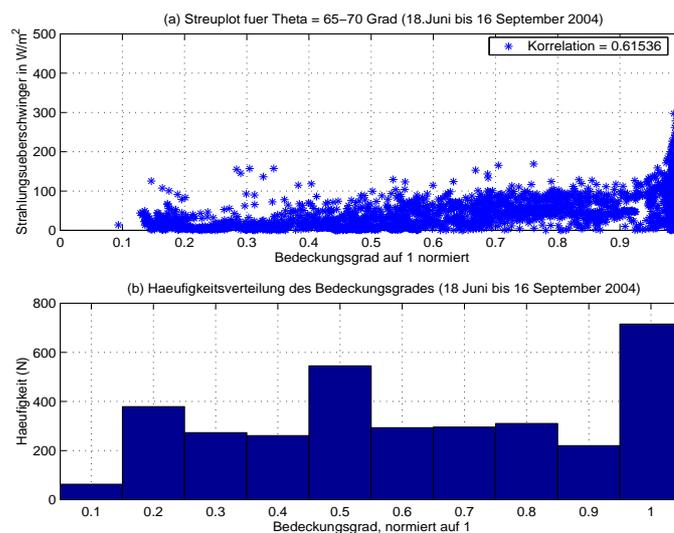


Abbildung 7.15: (oben) Streudiagramm, (unten) Häufigkeitsverteilungen der Bedeckungsgrade bei Strahlungserhöhungen für Zenitwinkel von 65 - 70°.

Insgesamt treten die maximalen Strahlungserhöhungen für alle Zenitwinkel fast immer bei Bedeckungsgraden nahe 1 auf, die etwas geringeren bei kleinen Zenitwinkeln und nahezu wolkenfreiem Himmel. Bei höheren Zenitwinkeln, etwa um 65° , ergibt sich ein drittes Maximum bei mittleren Bedeckungsgraden. Für höhere Zenitwinkel nimmt die Korrelation deutlich ab, da ja nun auch kaum noch direkte Strahlung den Boden erreichen kann.

7.3.2 Verbesserte Darstellung der Häufigkeitsverteilung des Sonnenzenitwinkels bei Strahlungserhöhungen

Bis jetzt wurden alle Strahlungserhöhungen > 0 betrachtet. Wenn man nun diejenigen Werte, die im Bereich von 1 % - 10 % der Strahlungsmessungen liegen (was etwa Werten von 10 - 100 W/m^2 entspricht) als natürliche Schwankungen um die Referenzkurve oder als angenommene Fehler aus den Daten herausfiltert, ergibt sich nach Abbildung 7.16 folgendes Bild (aufgeführt sind hier nur die Änderungen in der Häufigkeitsverteilung für den gesamten Meßzeitraum):

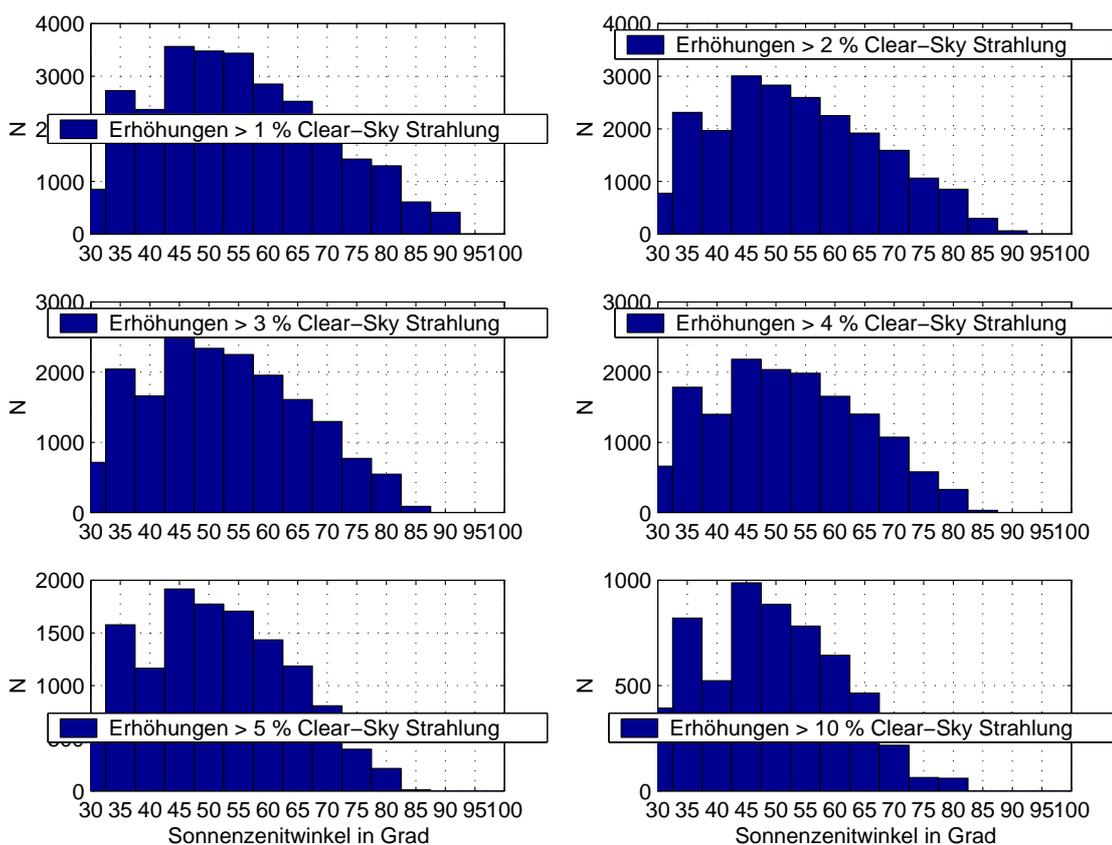


Abbildung 7.16: Änderungen der Häufigkeitsverteilung des Sonnenzenitwinkels bei Strahlungserhöhungen $> 1 - 10\%$ der Referenzkurve für den gesamten Messzeitraum.

Das Maximum bei Zenitwinkeln von ehemals 55° verschiebt sich zu Zenitwinkeln um 45° . Weiterhin erscheint ein weiteres lokales Maximum bei $\Theta = 35^\circ$, wie es auch bei den B.C.-Tagen zu sehen ist. Beide Maxima prägen sich immer weiter aus, je mehr geringere Strahlungserhöhungen herausgefiltert werden. Dies ist auch nicht verwunderlich, da, wie bereits erwähnt (s. B.C.-Tage), an Tagen mit sehr hohen Überschwingern diese bevorzugt um die Mittagszeit aufgetreten sind, und zwar von Ende Juni bis Mitte Juli Mittags ($\Theta \approx 35^\circ$) (siehe Abb.7.12). Dazu zeigt sich das zweite Maximum ($\Theta \approx 45^\circ$) wohl aus den Strahlungserhöhungen, die Vormittags (zwischen 10 und 11 Uhr MESZ) und Nachmittags (zwischen 12 und 15 Uhr MESZ) aufgetreten sind, was aus Abbildung 7.17, Vergleich (a): stärkste Erhöhungen bei $\Theta < 50^\circ$, und (b): stärkste Erhöhungen zwischen 10 und 11 Uhr, bzw.12 und 15 Uhr MESZ, hervorgeht.

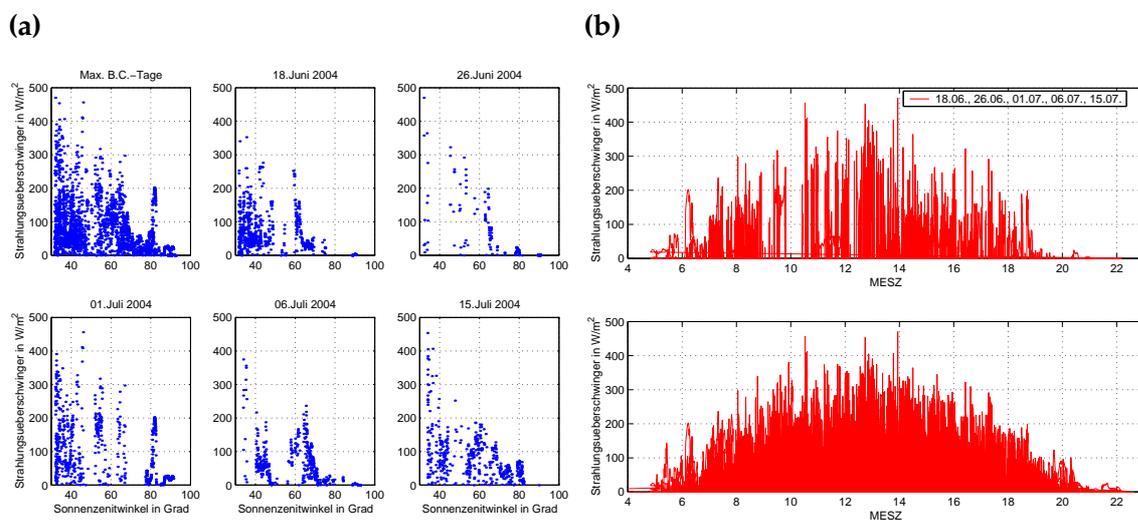


Abbildung 7.17: (a) Strahlungserhöhungen und Zenitwinkel für B.C.-Tage, (b) Strahlungserhöhungen in Abh. von der Tageszeit für B.C.-Tage (oben) und Gesamtmesstime (unten).

Sieht man sich dazu den mittleren Tagesgang des Bedeckungsgrads an (Abb. 7.18, dargestellt sind Stundenmittel), so fällt das lokale Maximum gegen 14 Uhr MESZ auf, also die Zeit, in der die stärksten Strahlungserhöhungen auftreten. Lässt man dabei Bedeckungsgrade von ≤ 0.2 außer Acht⁴ (rote Kurve), ergibt sich ein max. mittlerer Bedeckungsgrad von etwa 0.84, also 84 % und somit ein Wert, der genau in dem von Estupinan et al. (1996) ermittelten Intervall von 80 -90 % Bedeckung für maximale UVB-Strahlungserhöhungen liegt. Das steile Ansteigen in beiden Bedeckungsgradkurven vor 6 Uhr MESZ sowie das Absteigen ab ca. 22 Uhr MESZ sind auf blaustichige Bilder zu diesen Zeitpunkten hinauszuführen. Dieses Phänomen zieht sich als Fehlerquelle durch den gesamten Messzeitraum, jeweils um die Zeit des Sonnenauf- bzw. Untergangs herum. Daher sollten diese

⁴Werte ≤ 0.2 stellen einen wolkenfreien Himmel dar, d.h., sie müssten eigentlich als "0" in die Mittelungen eingehen

Fälle nicht als "Wahrheit" angesehen werden.

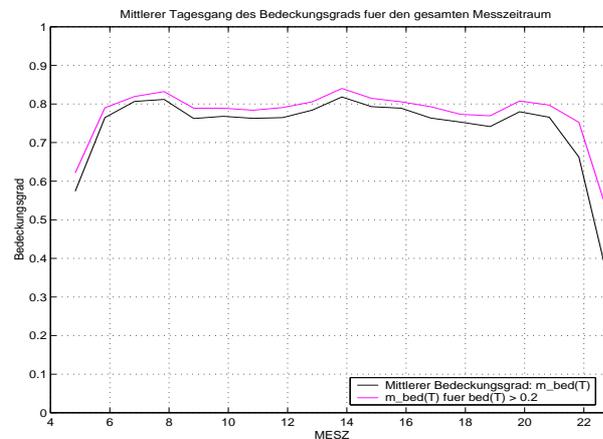


Abbildung 7.18: Mittlerer Tagesgang des Bedeckungsgrads für den gesamten Messzeitraum (Stundenmittel) für alle Bedeckungsgrade (schwarz) und Bedeckungsgrade > 0.2 (magenta).

7.4 Strahlungserhöhungen in Abhängigkeit von der Art der Bewölkung

Schließlich sollen zwei Versuche aufgezeigt werden, die Art der Bewölkung näher zu bestimmen (Cumulus, Stratus, Cirrus) und mit den Strahlungsdaten zu vergleichen.

7.4.1 Wolken/Wolkenränder

Der in Abbildung 7.19a dargestellte Tagesverlauf soll für einen kompletten Messtag den Einfluß des Homogenitätsgrads "HG" auf die solare Einstrahlung zeigen. Deutlich zu erkennen ist der antikorrelierte Verlauf: Strahlungserhöhungen finden sich hauptsächlich dort, wo HG eher gering ist, also eher Cumuluswolken vorherrschen, möglicherweise mit einigen Cirren darüber. Strahlungsabschwächung treten besonders bei hohem HG, also sehr dichter und flächiger Bewölkung aus eher Stratus-artigen Wolken auf. Dazu zeigt Abb. 7.19b den vorherrschenden Bedeckungsgrad, der eine Korrelation von immerhin 0.66 mit dem HG ergibt: Je höher der Bedeckungsgrad wird, desto dichter und flächiger wird die Bewölkung. Je niedriger der Bedeckungsgrad wird, desto durchbrochener wird die Bewölkung.

Bisher könnte man in etwa schlussfolgern: Strahlungserhöhungen treten auf bei mittelmäßiger bis starker Bewölkung mit eher sehr kleinem HG, also Cumuluswolken mit vielleicht einigen Cirren in den oberen Stockwerken. Nach Sabburg und Wong (2000)

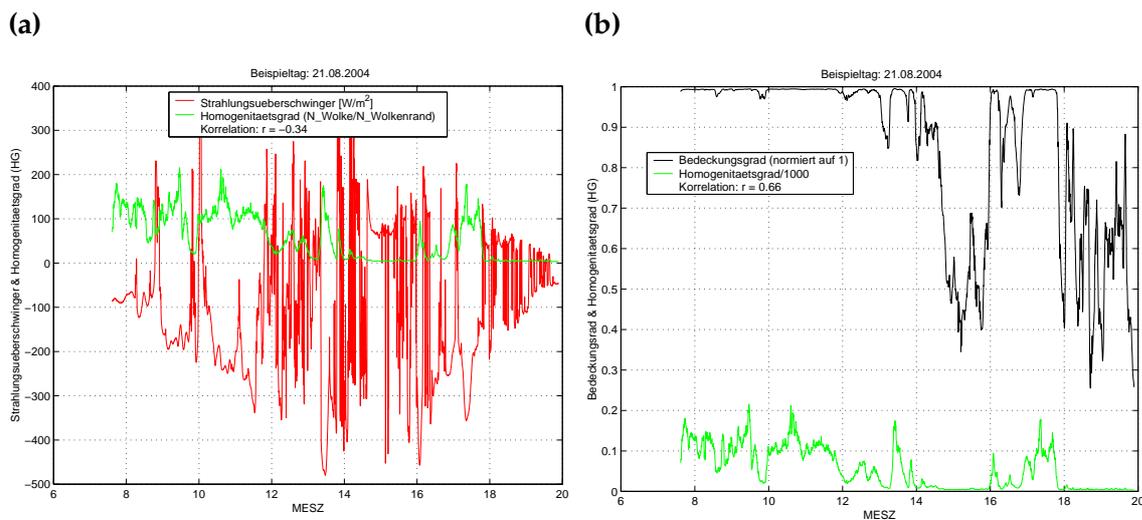


Abbildung 7.19: Tagesgang des "Homogenitätsgrads" mit: (a) Strahlungserhöhungen ($r = -0.34$), (b) Bedeckungsgrad ($r = 0.66$).

führen gerade hohe Cirren zu einer erhöhten diffusen Strahlung und damit zu einer erhöhten Reflexion an den Seiten der tiefen Cumuluswolken. In einer einjährigen Messkampagne (September 1997 bis August 1998) fanden sie heraus, daß 86% der UVB-Strahlungserhöhungen mit dem Auftreten von Cirren einhergingen.

Leider ergeben die weiteren Beispieltage keine aussagekräftigen Korrelationen und unterstützen somit nicht die Ergebnisse. Eine längerfristige Auswertung über mehrere Wochen oder Monate konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden, sollte aber ein Ziel nachfolgender Arbeiten sein, die sich mit diesem Thema beschäftigen.

Sieht man sich hingegen nur die besonders starken Strahlungserhöhungen an, beispielsweise alle Erhöhungen $\geq 300\text{W}/\text{m}^2$ vom 1. bis 15. Juli 2004 (Abb. 7.20), so ergibt sich eine schwache Korrelation von 0.206 zwischen HG und Strahlungserhöhung. Das heißt, die maximalen Strahlungswerte sollten bei eher höheren HG auftreten, wobei ein HG von etwa 85 nun nicht bedeutet, das überhaupt keine Wolkenränder mehr zu erkennen sind (siehe Abb 5.13b).

Daraus könnte man schließen, daß zwar bevorzugt bei geringen Homogenitätsgraden Strahlungserhöhungen auftreten. Allerdings sollten die Strahlungsmaxima dann zunehmend bei höheren HG erreicht werden, d.h. bei etwas dichterem Bewölkung. Hier steht man allerdings nicht auf wirklich gesichertem Boden, da Strahlungserhöhungen bei recht unterschiedlichen Bewölkungssituationen auftreten können, wie man an den Fallbeispielen aus Kapitel 7.1 erkennen kann. Hier ergaben sich Homogenitätsgrade von 4.34 (Abb. 7.3) bis 77.93 (Abb. 7.7), wobei diese beiden Spezialfälle bei höchst unterschiedli-

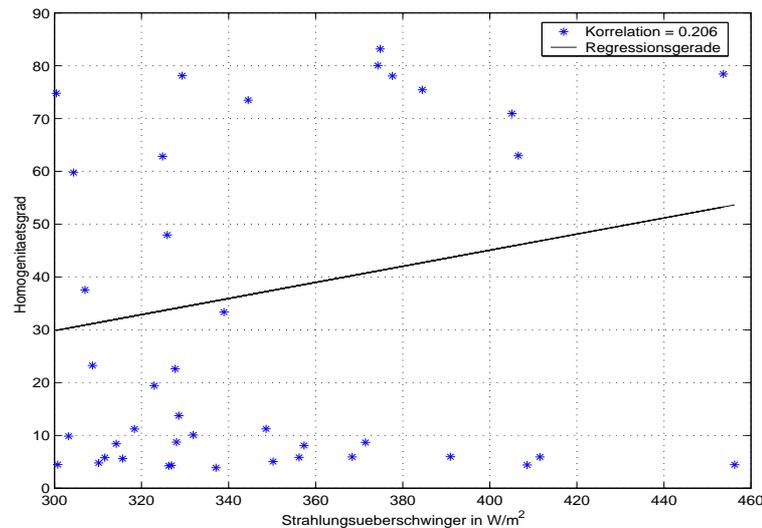


Abbildung 7.20: Korrelation zwischen Strahlungserhöhungen $\geq 300\text{W/m}^2$ und Homogenitätsgrad.

cher Bedeckung die beiden höchsten Strahlungsüberschwinger des Messzeitraumes aufweisen.

7.4.2 Fraktale Box-Dimension der Wolken und Wolkenränder

Für die Box-Dimension der kompletten Wolkenfläche ergibt sich ein ähnliches Bild. Die Beispieltagesgänge ergeben keine aufschlußreichen Ergebnisse. Die Korrelationen zwischen Box-Dimension und Strahlungserhöhungen liegen unter 0.2 und können an anderen Tagen sogar negativ sein. Einzig zwischen Bedeckungsgrad und Box-Dimension ergeben sich recht hohe Korrelationen von 0.7 und mehr. Hier soll Abbildung 7.21 als Beispiel dienen.

Die Box-Dimension korreliert in diesem Beispiel stark mit dem Bedeckungsgrad mit $r \approx 0.82$. Dazu paßt die (wenn auch schlechte) positive Korrelation der Box-Dimension der kompletten Wolkenfläche mit den Strahlungserhöhungen von 0.2. Eine Betrachtung der Strahlungserhöhungen $\geq 300\text{W/m}^2$ (s.o.) zeigt eine Korrelation von ≈ 0.16 (Abbildung 7.22).

Zur Vervollständigung sei schließlich noch für den Beispieltag 1. Juli 2004 die Bestimmung der Box-Dimension der Wolkenränder gezeigt. Größere Box-Dimension bedeutet nun mehr Wolkenrand und demzufolge ergibt sich eine Korrelation von -0.57 mit dem Bedeckungsgrad (Abb. 7.23 oben). Wie gehabt läßt sich für die Strahlungserhöhungen hingegen keine nennenswerte Korrelation mit der Box-Dimension der Wolkenränder erkennen (Abb. 7.23 unten). Strahlungserhöhungen $\geq 300\text{W/m}^2$ (s.o.) korrelieren mit ≈ -0.14 (Abbildung 7.24) so gut wie gar nicht mit der Box-Dimension der Wolkenränder.

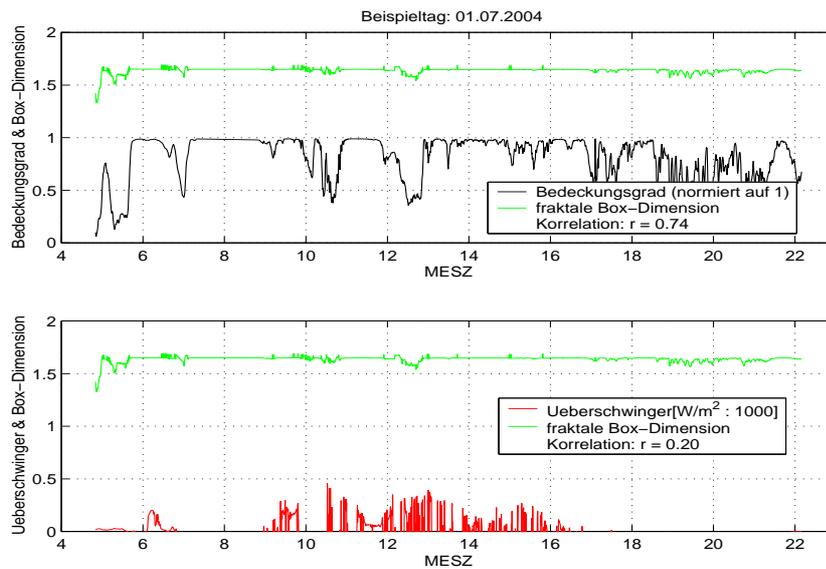


Abbildung 7.21: Tagesgang der Strahlungserhöhungen und der Boxdimension der Wolkenfläche (unten) bzw. des Bedeckungsgrads (oben) für den 01.07.2004.

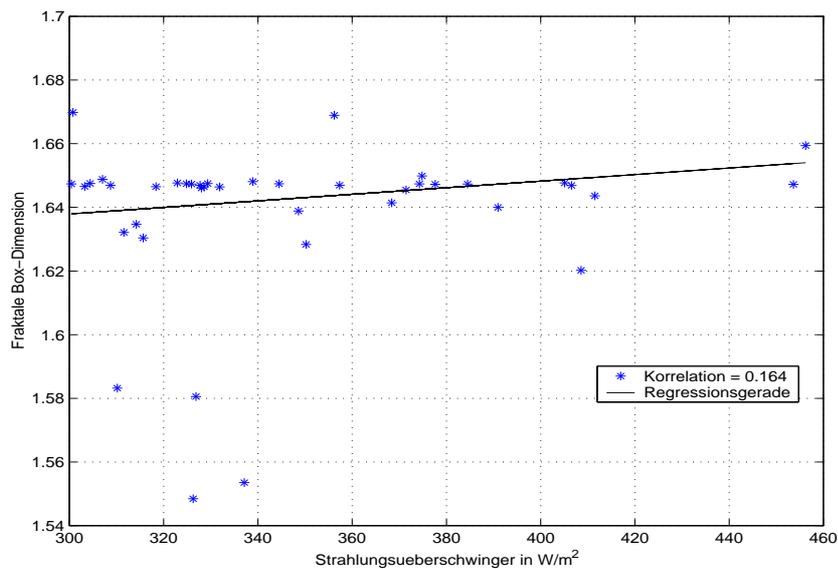


Abbildung 7.22: Korrelation zwischen Strahlungserhöhungen $\geq 300\text{W}/\text{m}^2$ und der Box-Dimension der kompletten Wolkenfläche.

In folgenden Arbeiten sollten hierzu längere Zeiträume betrachtet werden, aus denen möglicherweise deutliche Ergebnisse zustandekommen. Außerdem scheint die Bestimmung der Box-Dimension noch fehlerbehaftet zu sein. Zumindest sollten die bisherigen Ergebnisse weitere Untersuchungen anregen, um die Rolle der verschiedenen Wolkenar-

ten auf die solare Einstrahlung besser zu dokumentieren und zu verstehen.

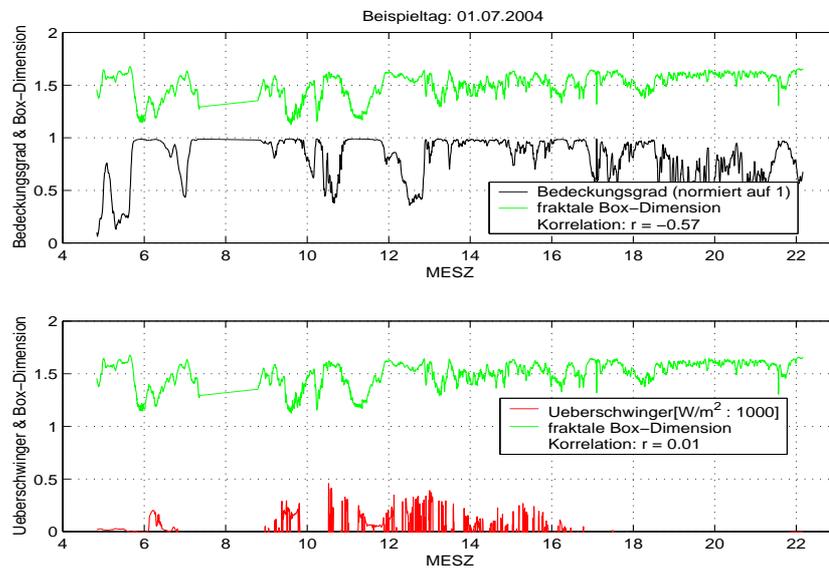


Abbildung 7.23: Tagesgang der Strahlungserhöhungen und der Box-Dimension der Wolkenränder (unten) bzw. des Bedeckungsgrad (oben) für den 01.07.2004.

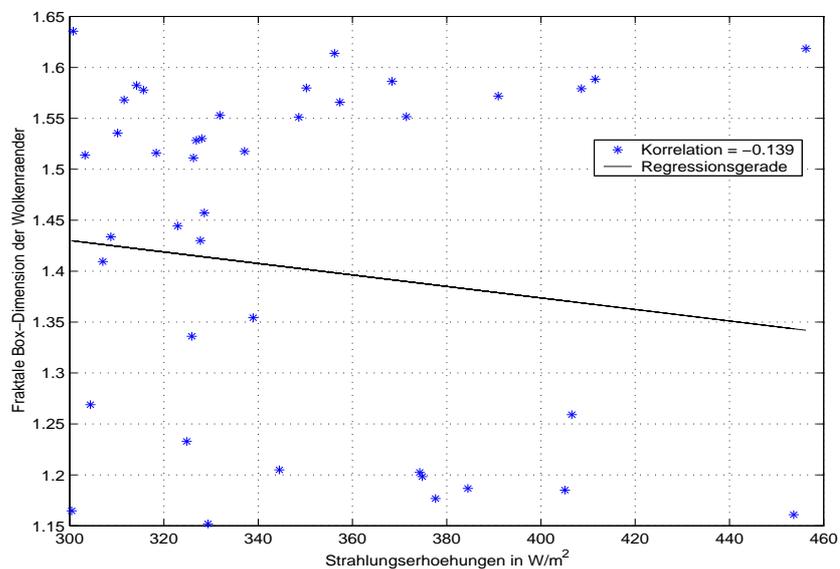


Abbildung 7.24: Korrelation zwischen Strahlungserhöhungen $\geq 300W/m^2$ und der Box-Dimension der Wolkenränder.

8. Schlußbetrachtung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde gezeigt, daß Strahlungserhöhungen bei verschiedenartiger Bewölkungssituation auftreten können, sei es bei fast bedecktem, oder bei relativ freiem Himmel. Dabei traten maximale Werte von beinahe 500 W/m^2 auf, die allein Dank der zeitlich hochaufgelösten Strahlungsmessungen erfaßt werden konnten. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, daß, über längere Zeiträume gesehen, die Stärke der Strahlungserhöhungen mit den Bedeckungsgraden zunimmt (mit einer Korrelation von 0.40) und bei 80 bis 90 % mittlerer Bedeckung ein Maximum aufweist (Estupinan et al., 1996). So dürfte eine Kombination diffuser Streuung der solaren Strahlung beim Durchgang durch die Wolken (insbesondere hohe Cirren) und Reflexion der diffusen und direkten Strahlung an Wolkenseiten (insbesondere Cumuluswolken) für die starken Strahlungserhöhungen verantwortlich sein (Sabburg und Wong, 2000). Auch eine erhöhte Gegenstrahlung bei hoher Bodenalbedo und hoher Bedeckung könnte ein Grund sein. Demzufolge ist eine Beschreibung durch Reflexion der Strahlung an Wolkenrändern allein nicht ausreichend, um diese hohen Strahlungswerte zu erklären.

Leider ist den Bedeckungsgradberechnungen nicht uneingeschränkt zu trauen, da aufgrund der Fehlerquellen in der Erfassung und Auswertung der Kameradaten (schwache Auflösung der Kamera, Streulichteffekte durch die Acrylkuppel und demzufolge Mißinterpretationen der Bedeckung, besonders bei klarem wolkenlosen Himmel) immer eine gesonderte Nachbetrachtung notwendig war. Mit der verwendeten Kamera sind daher wohl kaum bessere Ergebnisse zu erhalten, auch wenn man das Ausleseprogramm sicherlich noch verbessern kann (Stichwort "Pixelabhängiger Schwellwert" für die Definition Wolke oder keine Wolke). Im Rahmen dieser Arbeit war eine derartige Verbesserung nicht mehr möglich. Immerhin wurden die hohen Bedeckungsgrade akkurat wiedergegeben und scheinen auch insbesondere wichtig für extreme Strahlungserhöhungen zu sein.

Es soll nicht verschwiegen werden, daß bei der Archivierung die Wolkenkameradaten eines ganzen Monats gelöscht wurde, deren Hinzunahme möglicherweise zu etwas anderen Ergebnissen geführt hätte. Da die vorliegende Arbeit auch zum Ziel hatte, die Problematiken einer Eigenbau-Wolkenkamera sowie der Verarbeitung sehr großer Datensätze aufzuzeigen, kann man dieses Ziel als erreicht ansehen.

Desweiteren ist eine Anhäufung der maximalen Strahlungserhöhungen bei Zenitwinkeln von $35 - 40^\circ$ und $45 - 50^\circ$ festzustellen, wobei die maximalen Werte jeweils um den Mittagszeitpunkt, sowie kurz davor auftraten. Dies hängt zum einen mit dem gewählten Messzeitraum und zum anderen mit dem Messort Westerland/Sylt zusammen (Jahresgang des solaren Zenitwinkels). Dieses Ergebnis der Tendenz zu kleineren Zenitwinkeln deckt sich weitestgehend mit dem von Heise (2004). Die geringfügigen Abweichungen (2. Maximum bei $50-55^\circ$) sind auf die unterschiedlichen Messzeiträume (Juni bis September 2004 gegenüber März 1997 bis Oktober 2003) sowie insbesondere auf die hohe zeitliche Auflösung der letztjährigen Strahlungsmessungen hinauszuführen.

Schließlich wurden drei Versuche aufgezeigt, die Art der Bedeckung aus den Kameradaten näher zu bestimmen: Aus der fraktalen Box-Dimension der kompletten Wolkenfläche und der fraktalen Box-Dimension der Wolkenränder sowie dem Homogenitätsgrad *HG* der Wolken. Dabei ergaben sich keine eindeutigen Ergebnisse. Sowohl die Betrachtung der fraktalen Box-Dimension als auch des *HG* bedürfen noch näheren Untersuchungen. Zumindest könnte man vermuten, daß starke Strahlungserhöhungen eher bei geringerem, aber ansteigendem *HG* auftreten, d.h. Wolkenränder müssen noch deutlich erkennbar sein, was auf cumulusartige Bedeckung hinweist. Auch Cirren in den oberen Stockwerken, die für eine erhöhte Streustrahlung und damit auch erhöhte Reflexion der Strahlung an den Wolkenrändern der tieferen Wolken sorgen, können in diesem *HG*-Bereich liegen. Die Korrelationen mit den Strahlungserhöhungen sind aber in keinem Fall als signifikant anzusehen, da sie viel zu geringe, teilweise sogar im Vorzeichen wechselnde Werte ergaben. Zudem scheinen die Berechnungen der Box-Dimensionen noch fehlerbehaftet und bedürfen näheren Untersuchungen.

In folgenden Arbeiten muß auf die angesprochenen Probleme besonders geachtet werden. Den Vorteilen der verwendeten Kamera, hohe zeitliche Auflösung der Messungen und niedrige Kosten, stehen die Nachteile der schlechten Pixelauflösung (8 Bit), des Streulichts der Acrylkuppel und des manuell zu verstellenden Schattenringes gegenüber. So ist bereits eine verbesserte Wolkenkamera mit höherer Pixelauflösung und Quatzkuppel in Planung. Mit diesen Verbesserungen sollten auch die Ergebnisse aussagekräftiger und somit die Kamera eine echte Alternative zu den viel teureren Konkurrenzmodellen des ARM-Programms werden. Bereits im Frühling 2005 soll sie im Rahmen eines interdisziplinären Forschungsvorhabens des Leibniz-Institut für Meereswissenschaften und des Instituts für Medizinische Klimatologie der Universität Kiel ihre Arbeit aufnehmen. Dabei soll auch die Belastung für den Menschen im Rahmen einer Doktorarbeit besonders untersucht werden.

Schon die hier gezeigten Ergebnisse dieser Arbeit verdeutlichen die Gefahren, die sich für den Menschen ergeben, sollte er sich auch bei hohem Bedeckungsgrad ungeschützt der Strahlung aussetzen.

A.2 Zum Kapitel 5.3.1

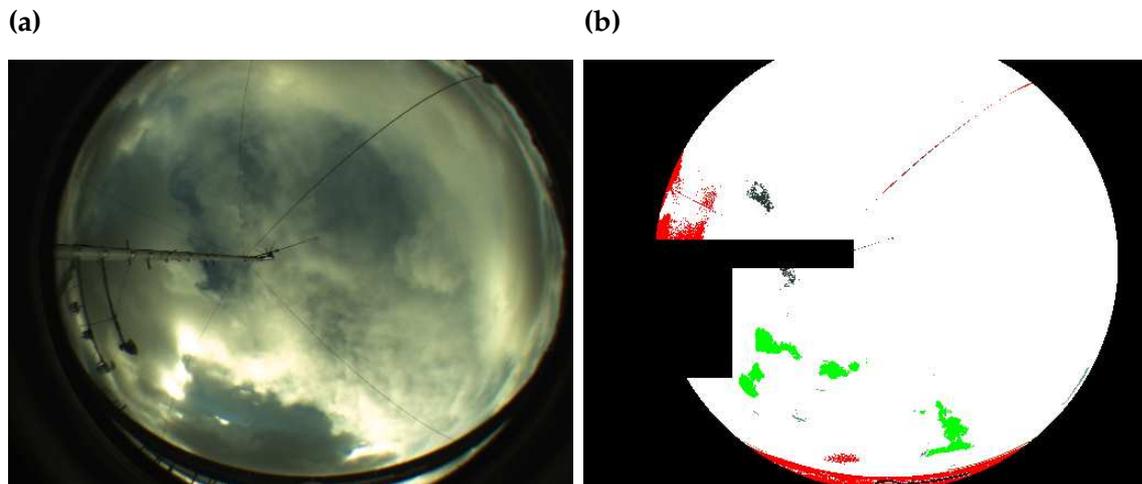


Abbildung A.1: (a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Berechneter Bed.-Grad = $8/8$ (0,994),
vergl. geschätzter Bed.-Grad (aus dem Originalbild) = $7/8$.

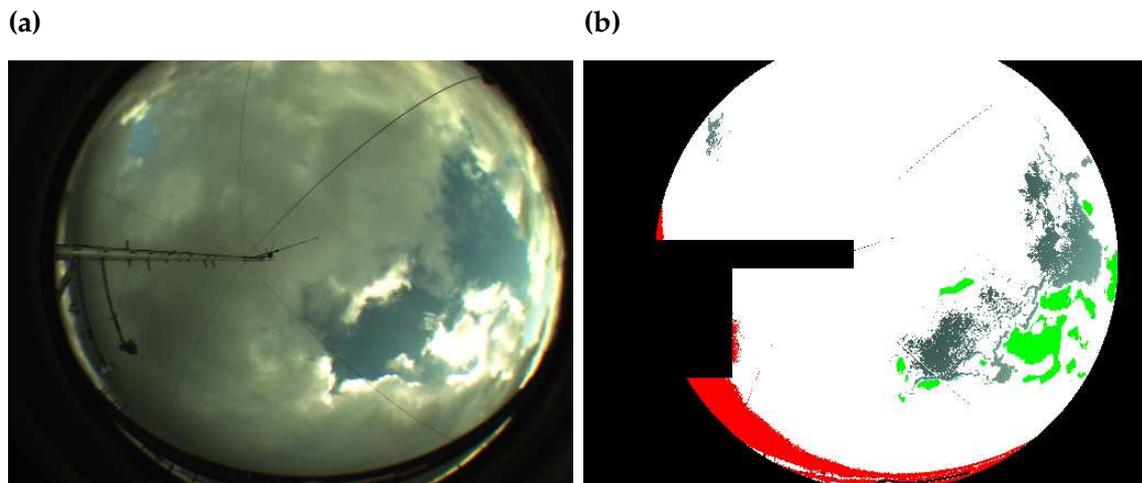


Abbildung A.2: (a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Berechneter Bed.-Grad = $7/8$ (0,932),
vergl. geschätzter Bed.-Grad (aus dem Originalbild) = $6/8$.

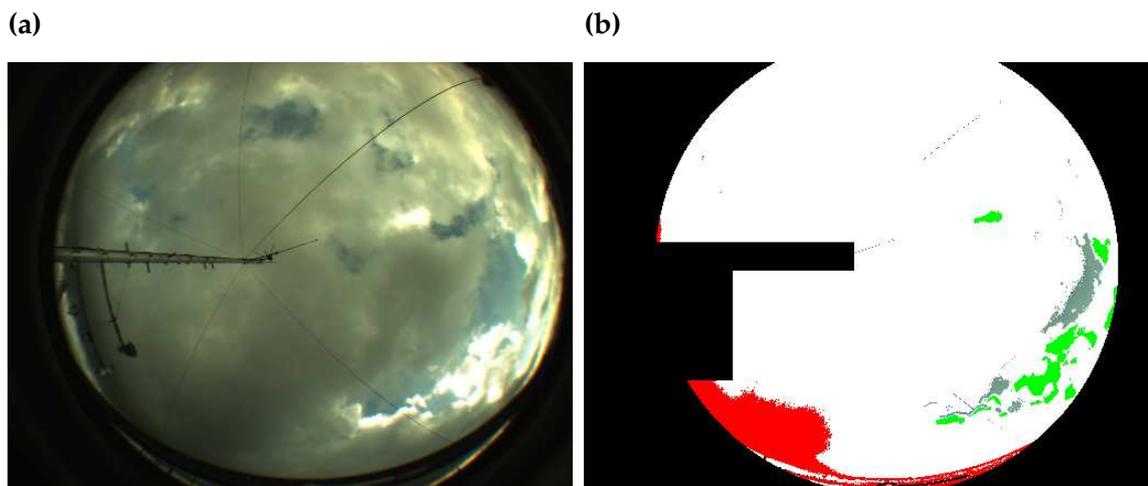


Abbildung A.3: (a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Berechneter Bed.-Grad = $8/8$ (0,981),
vergl. geschätzter Bed.-Grad (aus dem Originalbild) = $7/8$.

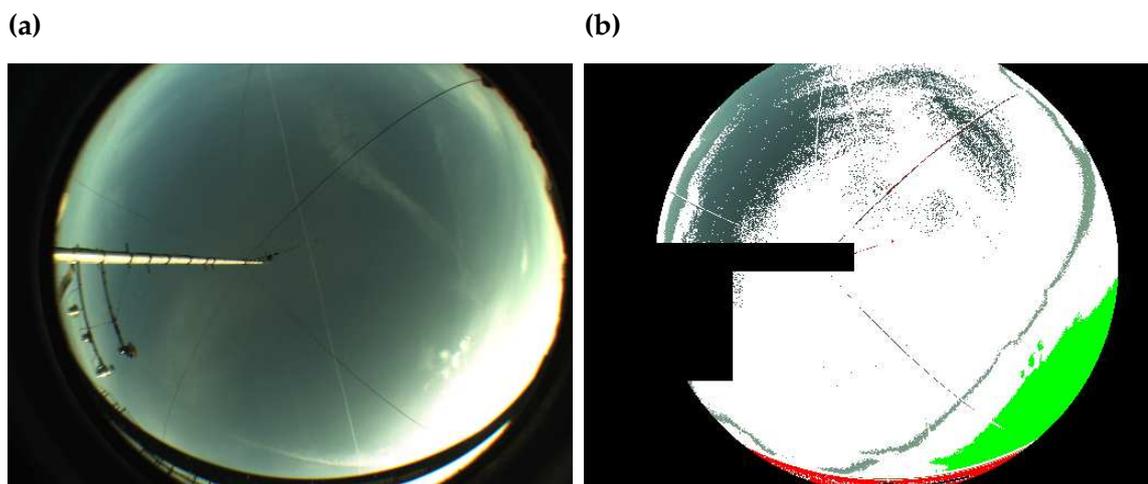


Abbildung A.4: (a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Berechneter Bed.-Grad = $7/8$ (0,819),
vergl. geschätzter Bed.-Grad (aus dem Originalbild) = $3/8$.

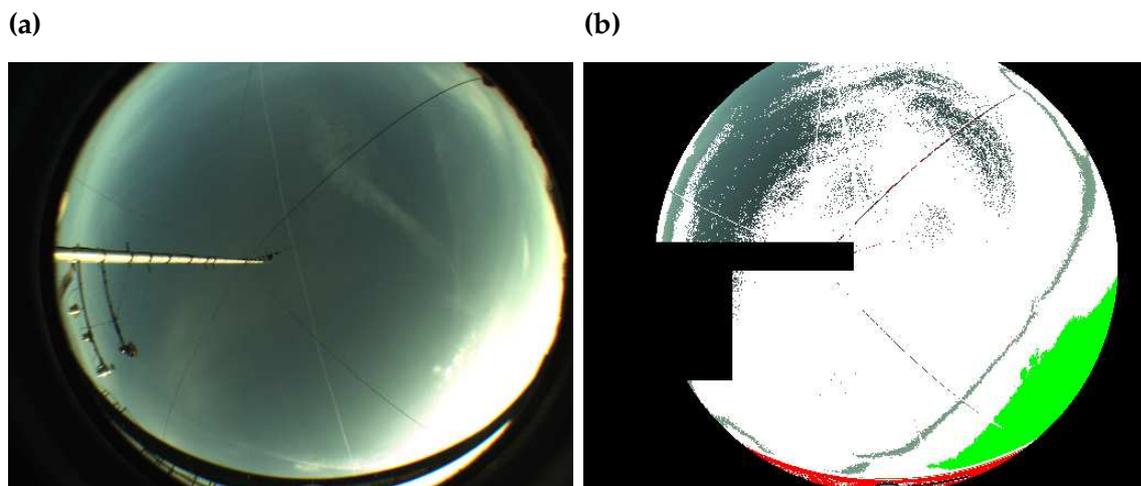


Abbildung A.5: (a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Berechneter Bed.Grad = $7/8$ (0,826),
vergl. geschätzter Bed.-Grad (aus dem Originalbild) = $3/8$.

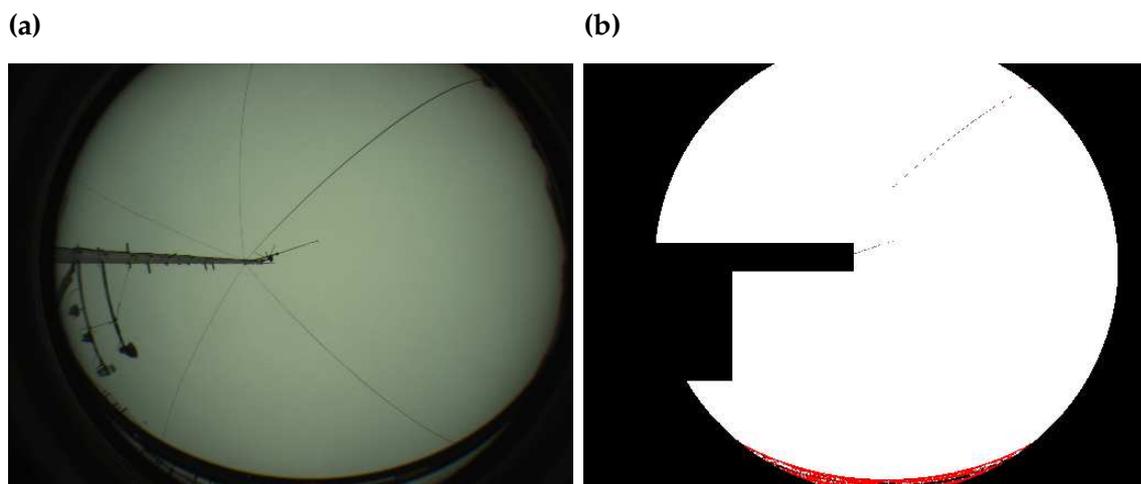


Abbildung A.6: (a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Berechneter Bed.-Grad = $8/8$ (0,997),
vergl. geschätzter Bed.-Grad (aus dem Originalbild) = $8/8$.

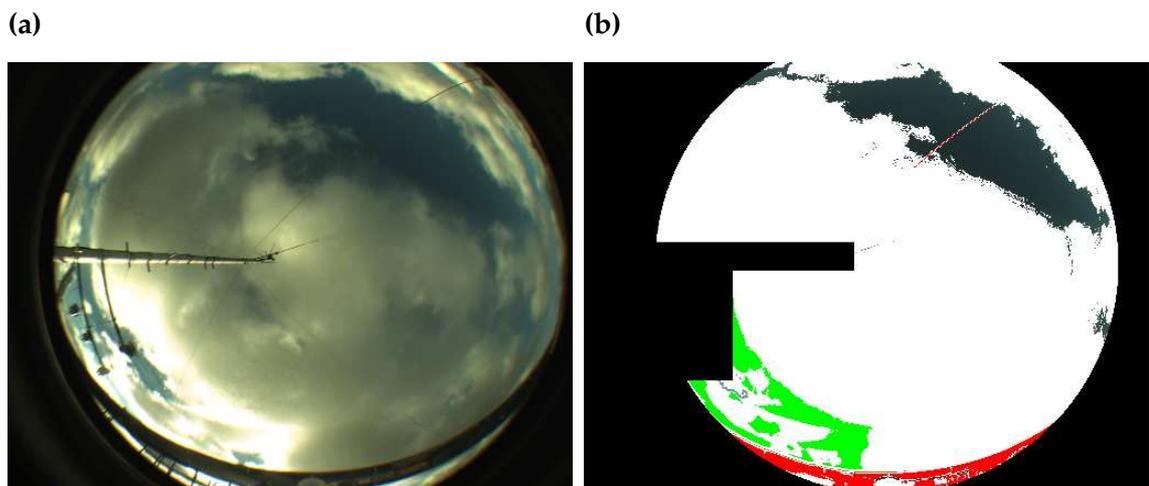


Abbildung A.7: (a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Berechneter Bed.-Grad = $7/8$ (0,874),
vergl. geschätzter Bed.-Grad (aus dem Originalbild) = $7/8$.

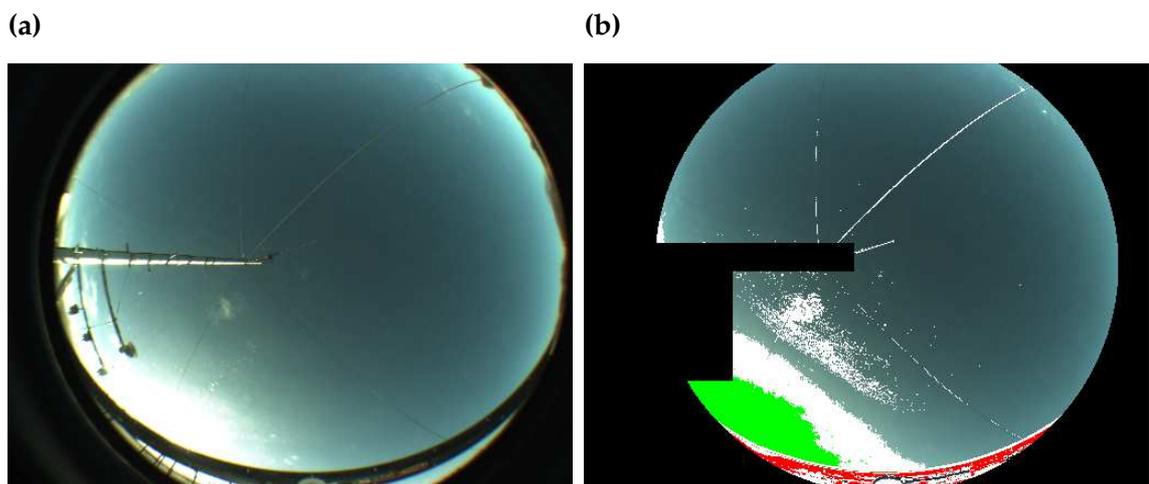


Abbildung A.8: (a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Berechneter Bed.-Grad = $1/8$ (0,099),
vergl. geschätzter Bed.-Grad (aus dem Originalbild) = $1/8$.

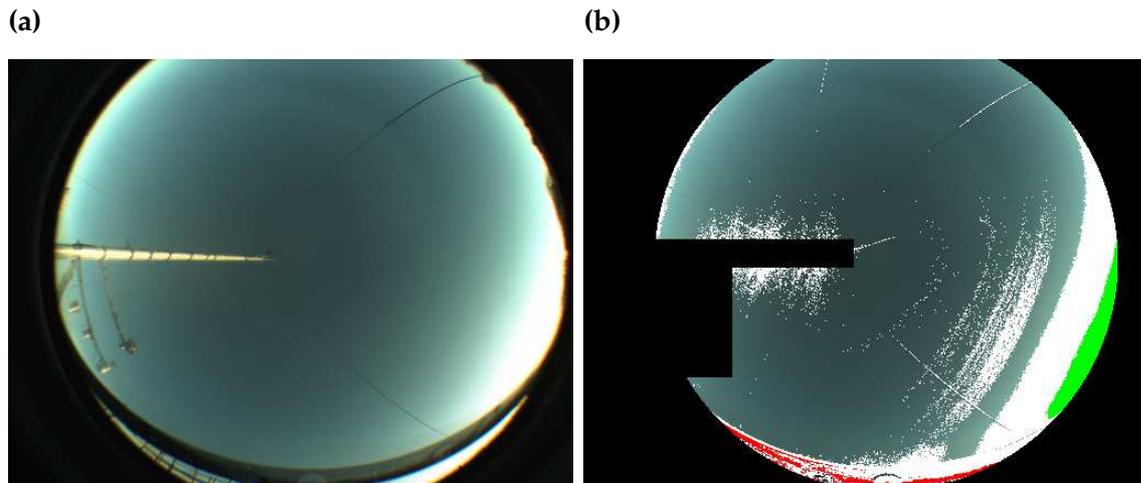


Abbildung A.9: (a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Berechneter Bed.-Grad = $1/8$ (0,161),
vergl. geschätzter Bed.-Grad (aus dem Originalbild) = $0/8$.

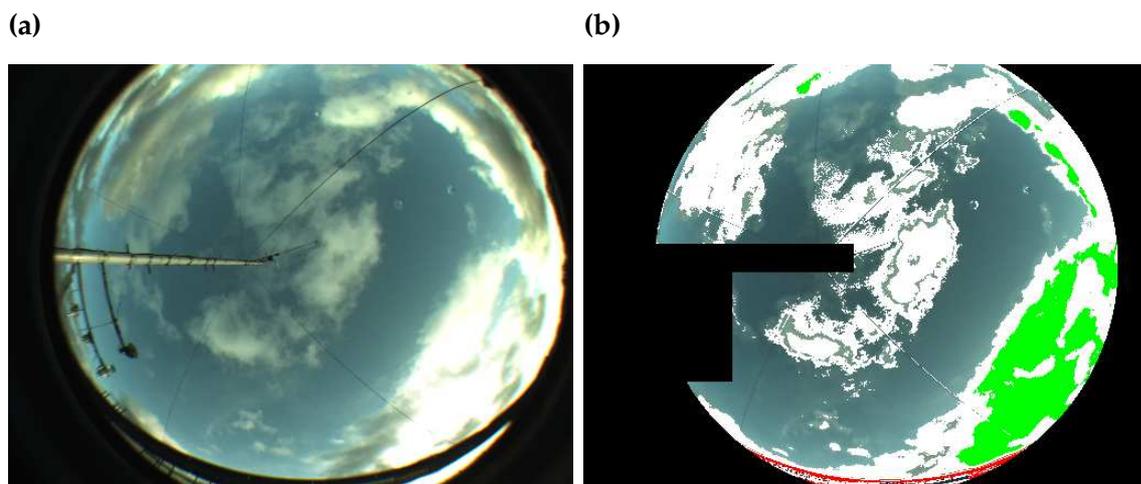


Abbildung A.10: (a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Berechneter Bed.-Grad = $3/8$ (0,389),
vergl. geschätzter Bed.-Grad (aus dem Originalbild) = $3/8$.

A.3 Zum Kapitel 5.4.2

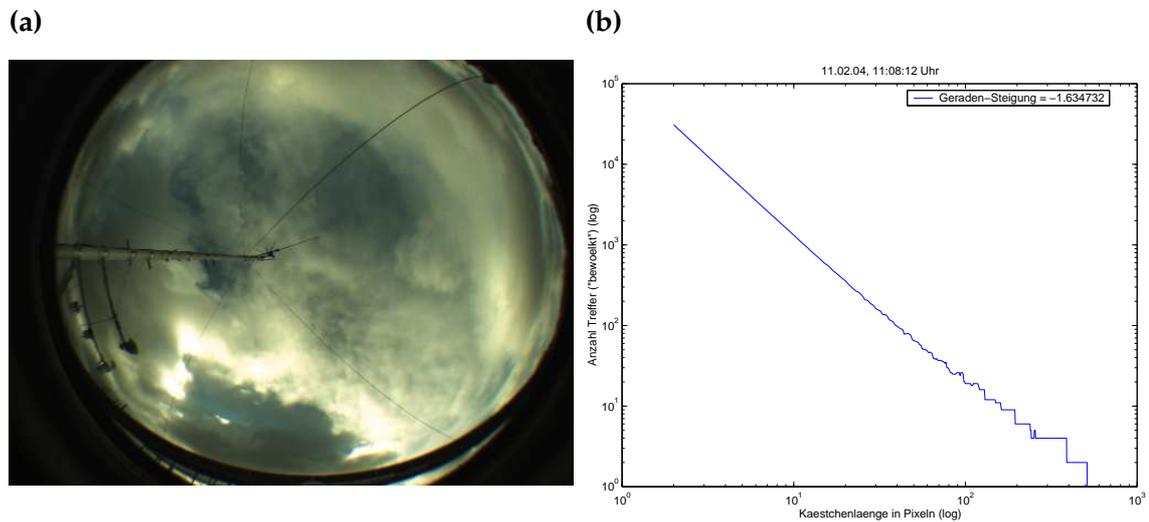


Abbildung A.11: (a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit daraus berechneter Box-Dimension der Wolkenfläche = 1.6347.

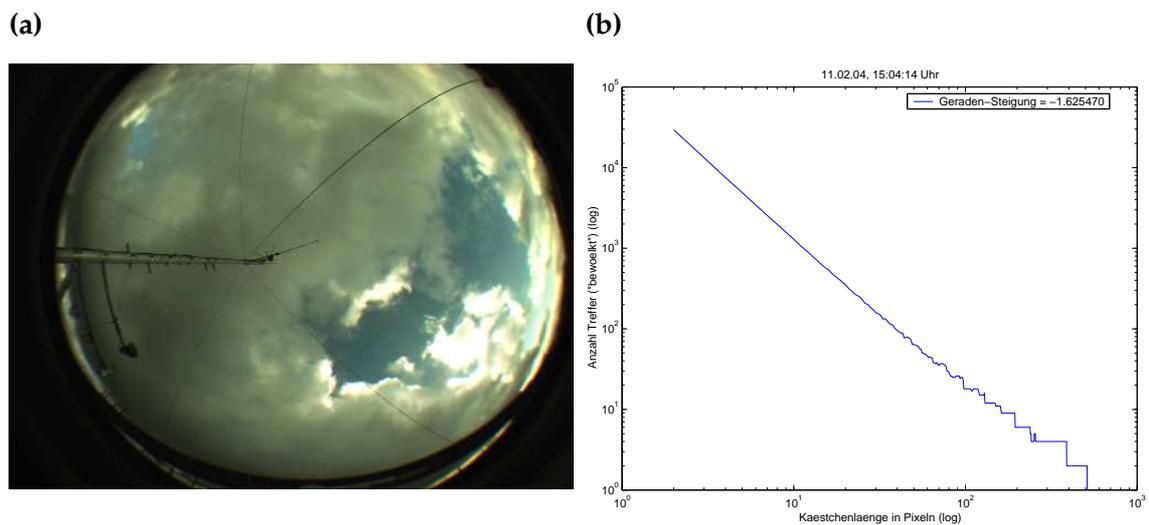


Abbildung A.12: (a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit daraus berechneter Box-Dimension der Wolkenfläche = 1.6255.

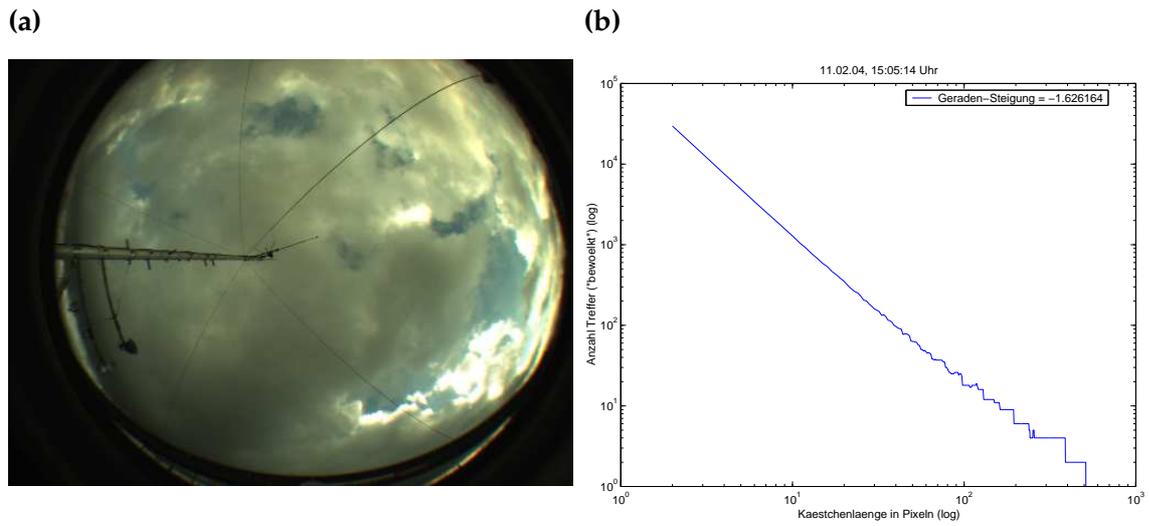


Abbildung A.13: (a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit daraus berechneter Box-Dimension der Wolkenfläche = 1.6262.

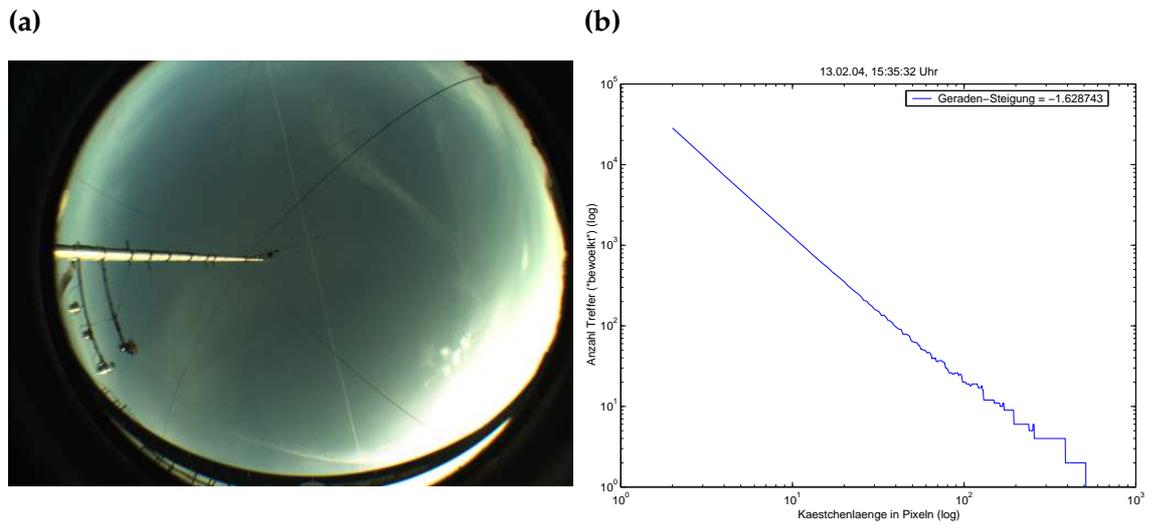


Abbildung A.14: (a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit daraus berechneter Box-Dimension der Wolkenfläche = 1.6287.

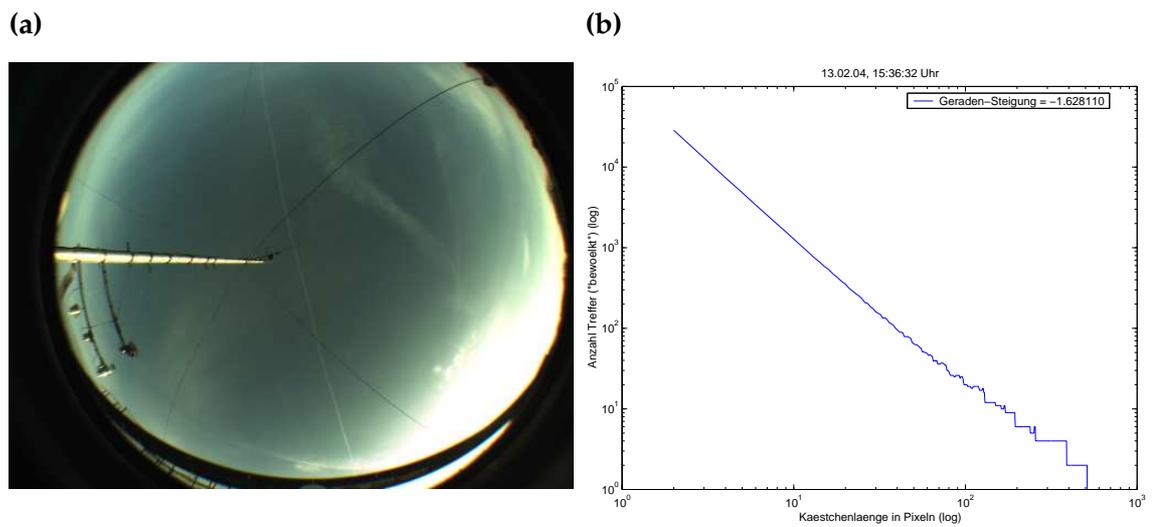


Abbildung A.15: (a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit daraus berechneter Box-Dimension der Wolkenfläche = 1.6281.

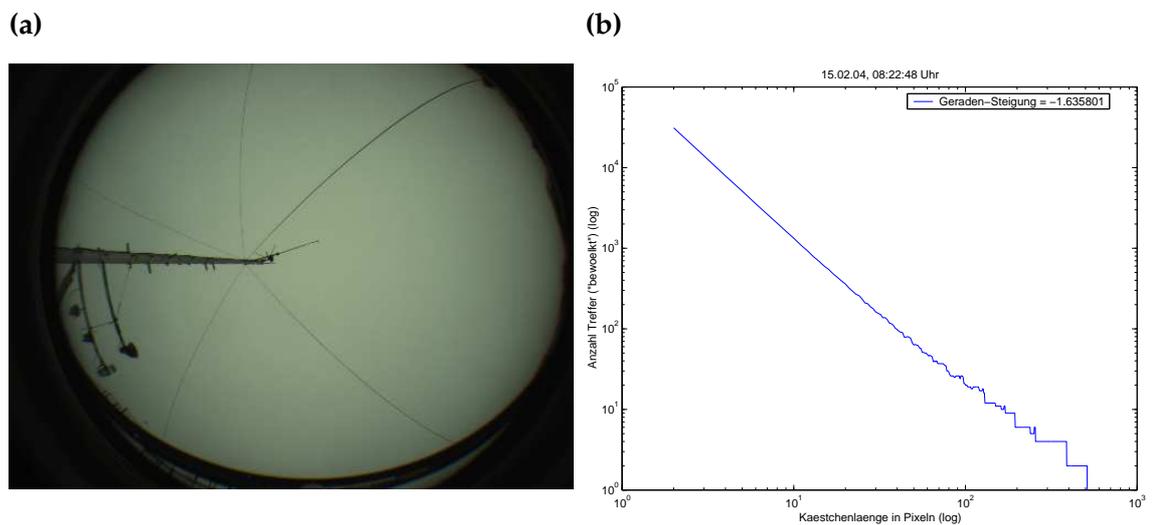


Abbildung A.16: (a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit daraus berechneter Box-Dimension der Wolkenfläche = 1.6358.

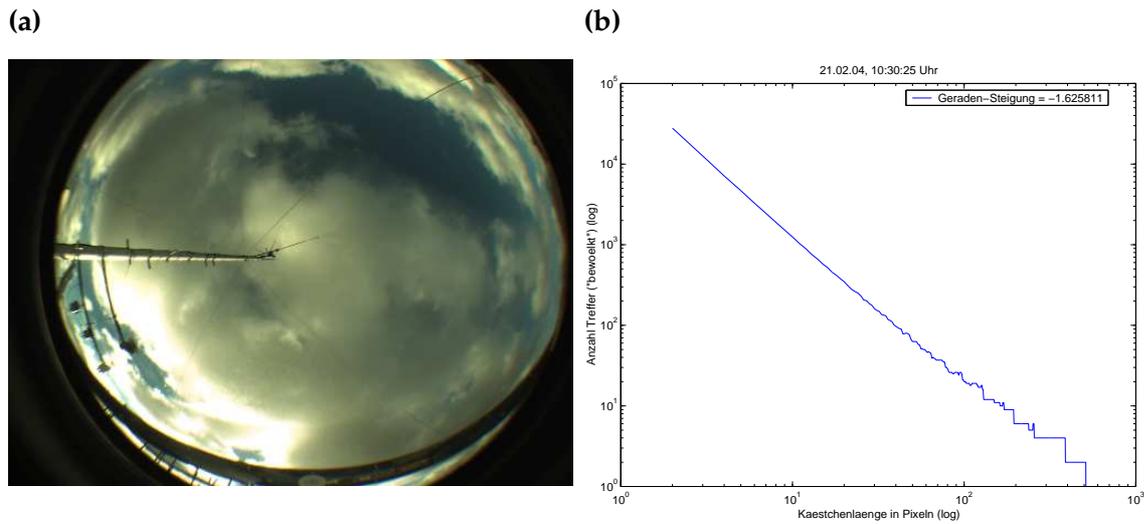


Abbildung A.17: (a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit daraus berechneter Box-Dimension der Wolkenfläche = 1.6258.

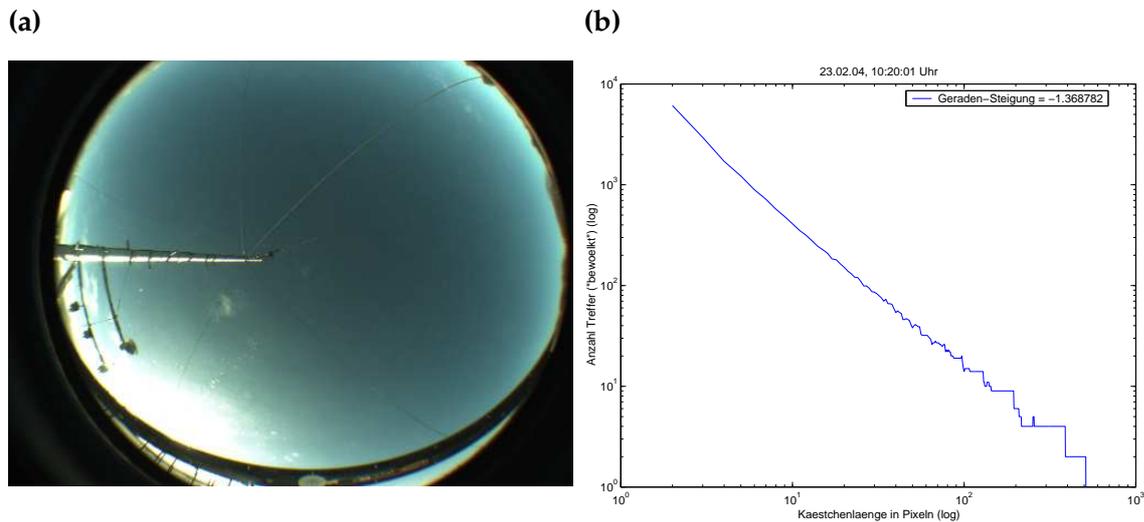


Abbildung A.18: (a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit daraus berechneter Box-Dimension der Wolkenfläche= 1.3688.

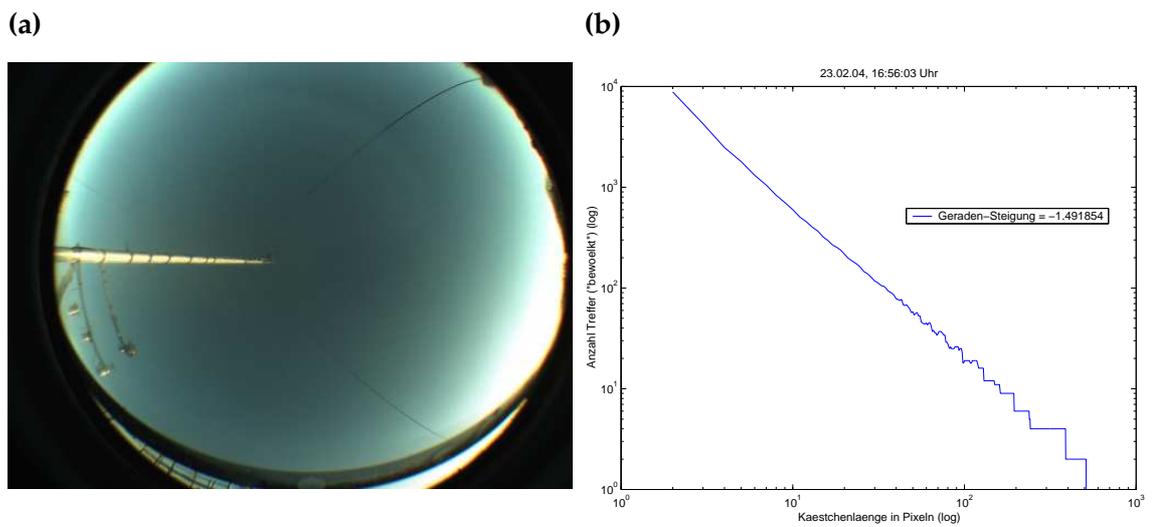


Abbildung A.19: (a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit daraus berechneter Box-Dimension der Wolkenfläche = 1.4919.

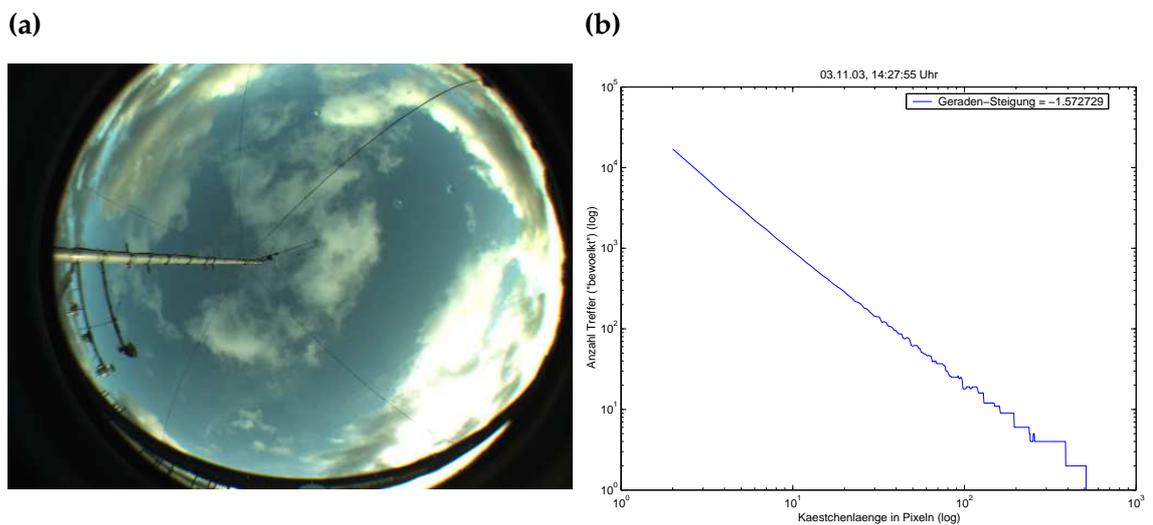


Abbildung A.20: (a) Original-Bild der Wolkenkamera, (b) Doppelt-Logarithmisches Diagramm mit daraus berechneter Box-Dimension der Wolkenfläche = 1.5727.

A.4 Zum Kapitel 7

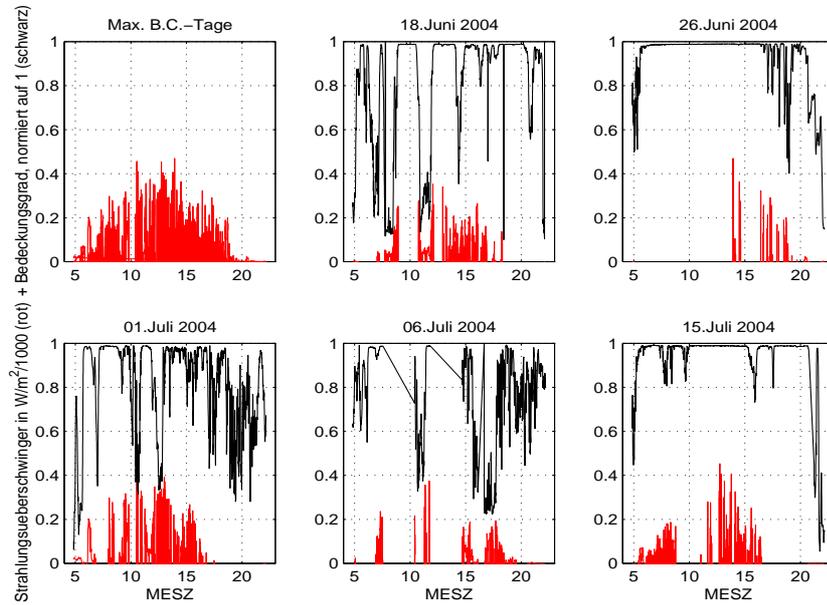


Abbildung A.21: Tagesgänge der B.C.-Tage mit maximalen Strahlungserhöhungen (rot) und den dazugehörigen Bedeckungsgraden (schwarz).

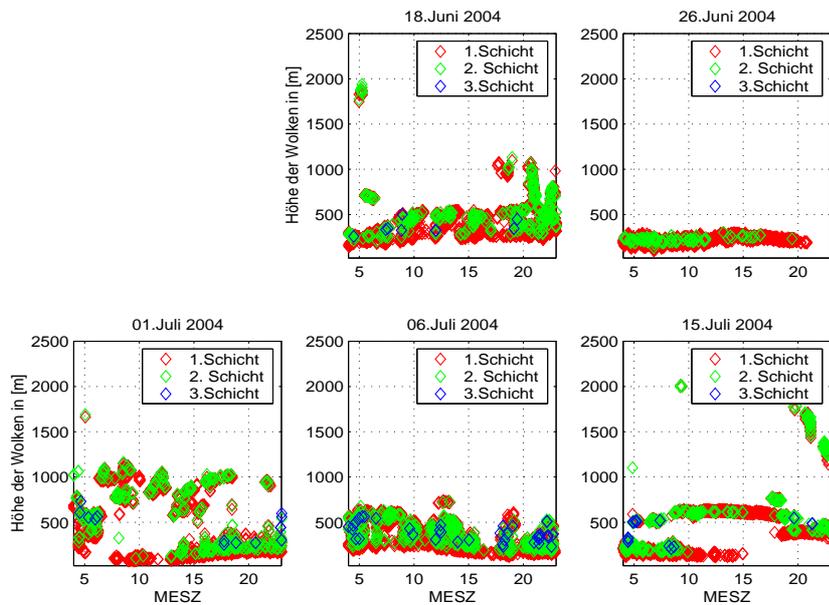


Abbildung A.22: Ceilometerdaten für B.C.-Tage mit maximalen Strahlungserhöhungen.

A.5 Zum Kapitel 7.3.1

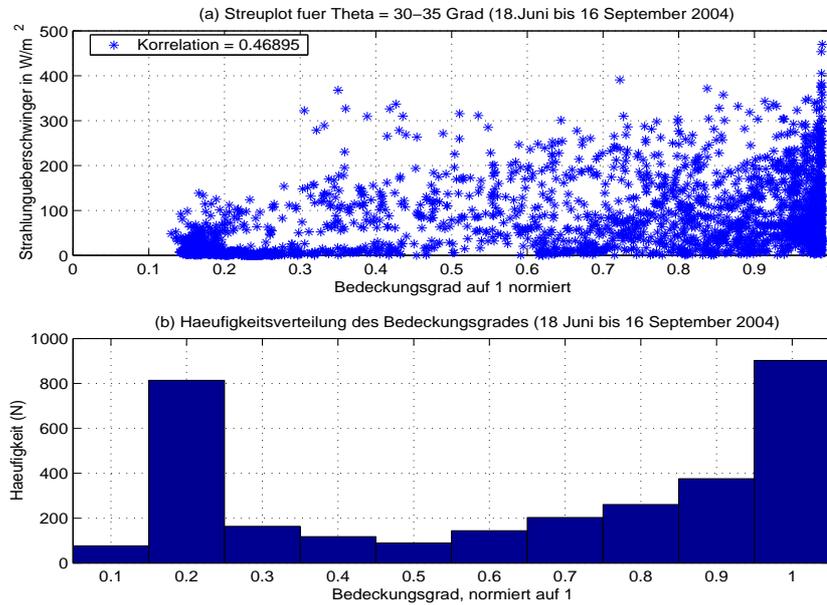


Abbildung A.23: Bedeckungsgrade und Strahlungserhöhungen für $\Theta = 30 - 35^\circ$: (a) Streuplot und Korrelation, (b) Häufigkeitsverteilung.

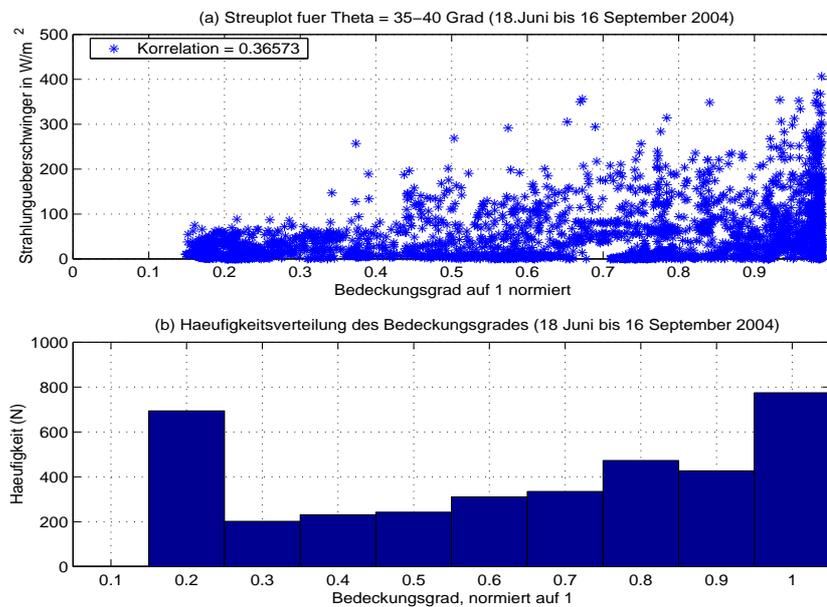


Abbildung A.24: Bedeckungsgrade und Strahlungserhöhungen für $\Theta = 35 - 40^\circ$: (a) Streuplot und Korrelation, (b) Häufigkeitsverteilung.

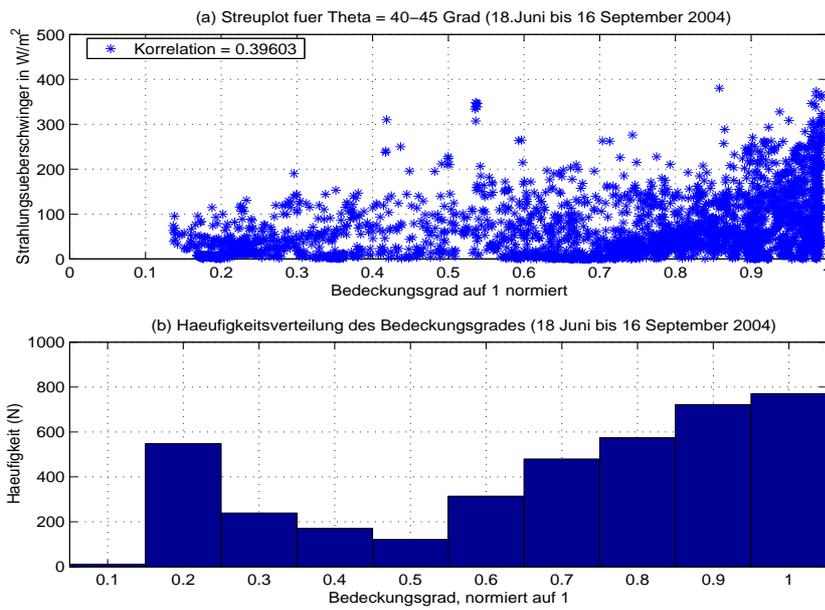


Abbildung A.25: Bedeckungsgrade und Strahlungserhöhungen für $\Theta = 40 - 45^\circ$: (a) Streuplot und Korrelation, (b) Häufigkeitsverteilung.

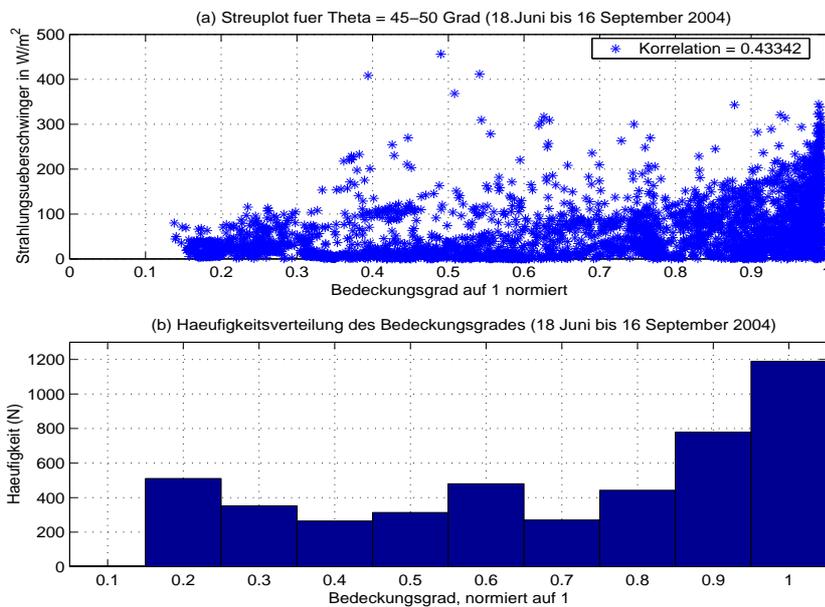


Abbildung A.26: Bedeckungsgrade und Strahlungserhöhungen für $\Theta = 45 - 50^\circ$: (a) Streuplot und Korrelation, (b) Häufigkeitsverteilung.

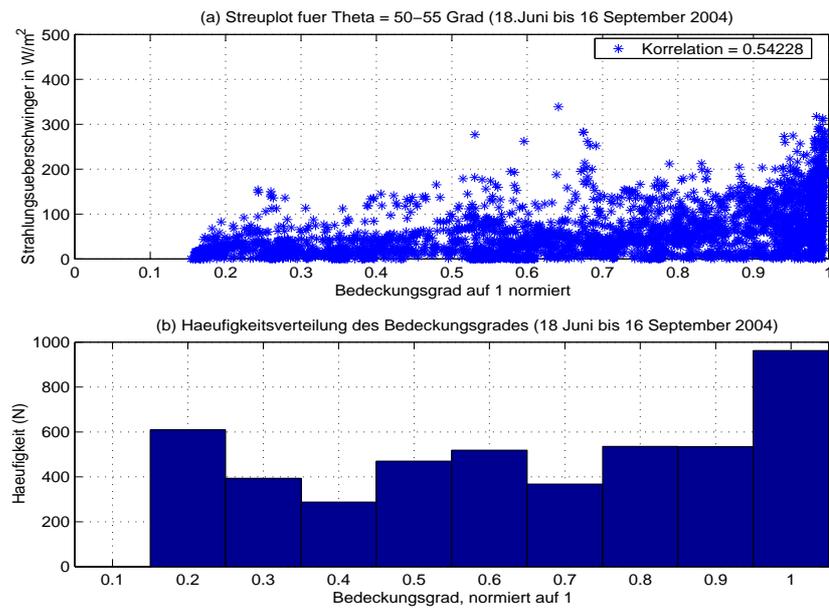


Abbildung A.27: Bedeckungsgrade und Strahlungserhöhungen für $\Theta = 50 - 55^\circ$: (a) Streuplot und Korrelation, (b) Häufigkeitsverteilung.

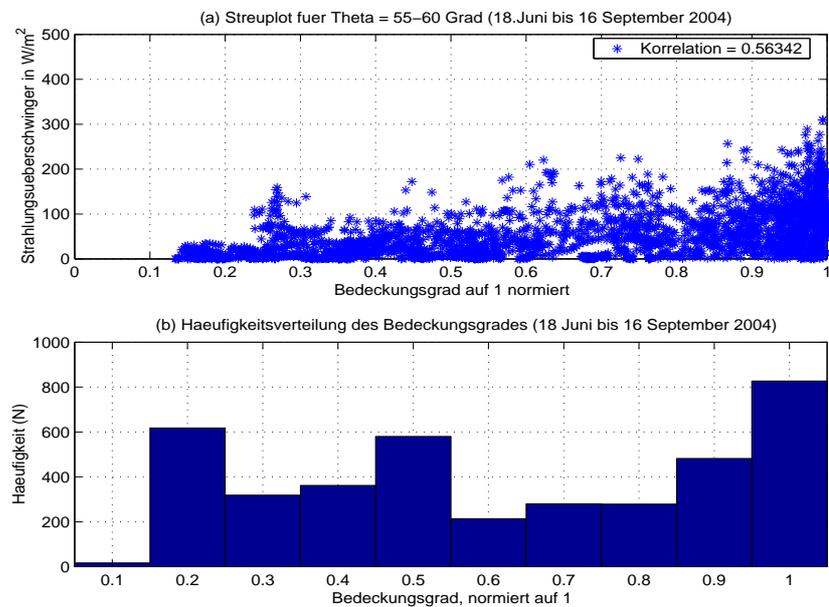


Abbildung A.28: Bedeckungsgrade und Strahlungserhöhungen für $\Theta = 55 - 60^\circ$: (a) Streuplot und Korrelation, (b) Häufigkeitsverteilung.

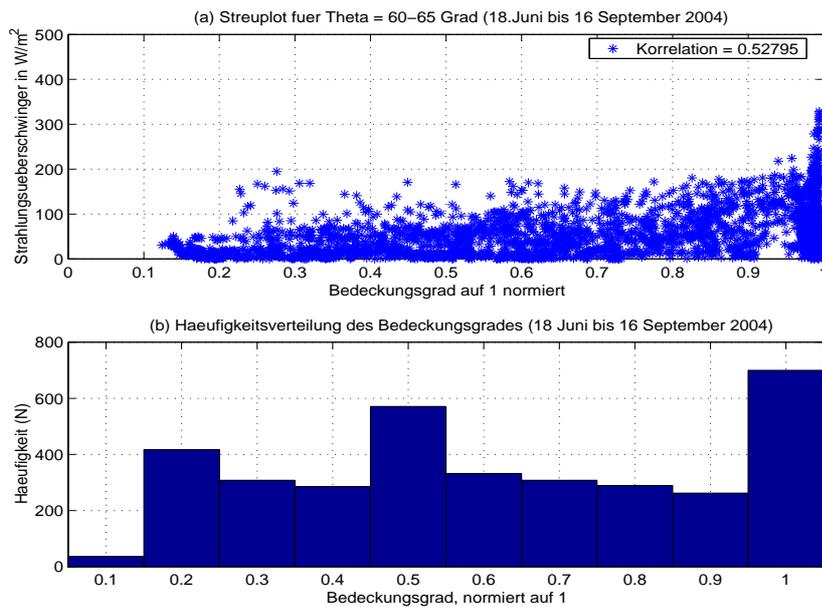


Abbildung A.29: Bedeckungsgrade und Strahlungserhöhungen für $\Theta = 60 - 65^\circ$: (a) Streuplot und Korrelation, (b) Häufigkeitsverteilung.

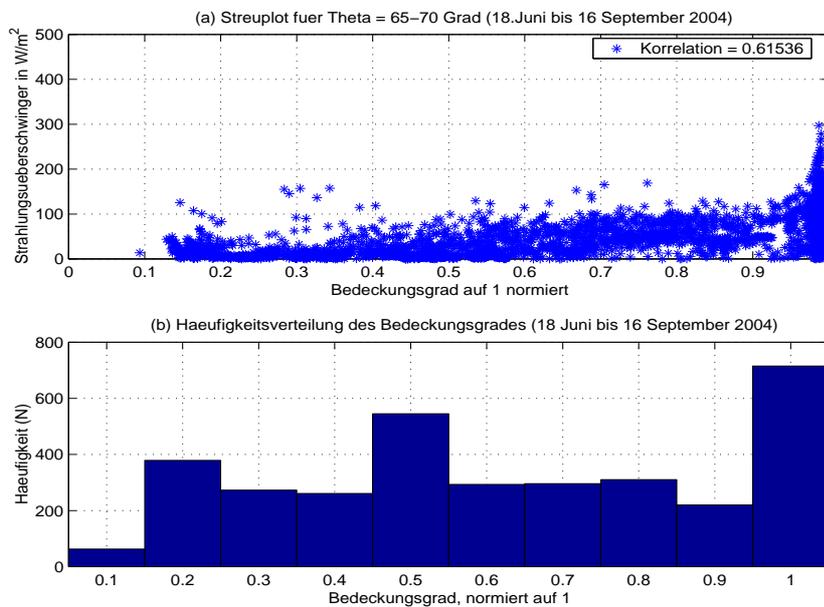


Abbildung A.30: Bedeckungsgrade und Strahlungserhöhungen für $\Theta = 65 - 70^\circ$: (a) Streuplot und Korrelation, (b) Häufigkeitsverteilung.

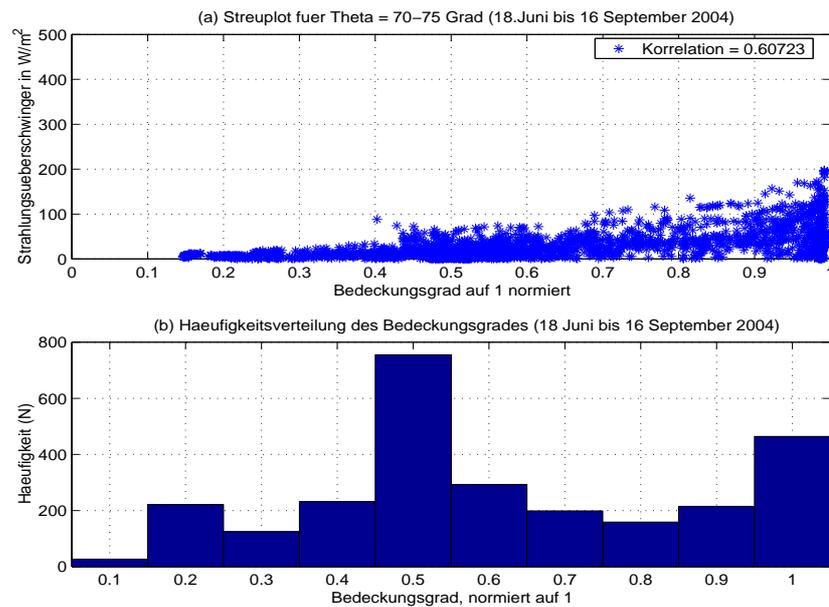


Abbildung A.31: Bedeckungsgrade und Strahlungserhöhungen für $\Theta = 70 - 75^\circ$: (a) Streuplot und Korrelation, (b) Häufigkeitsverteilung.

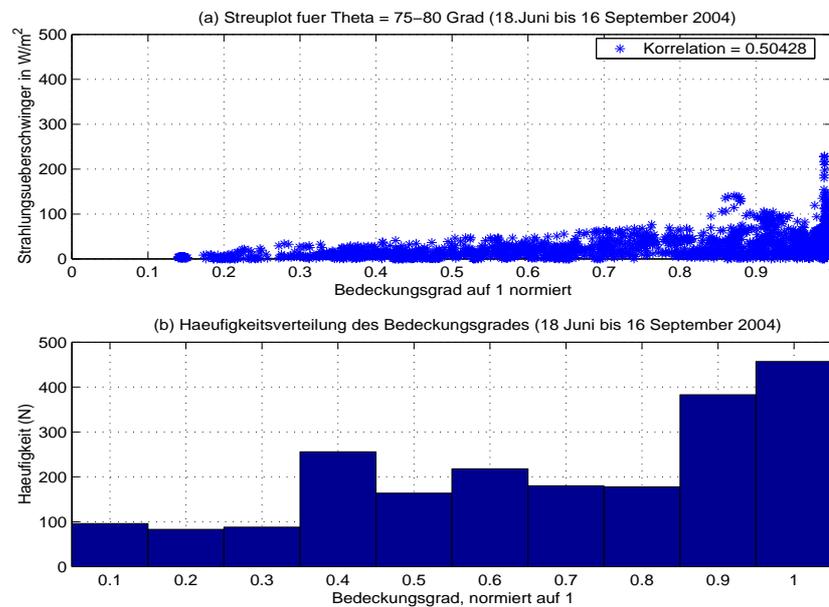


Abbildung A.32: Bedeckungsgrade und Strahlungserhöhungen für $\Theta = 75 - 80^\circ$: (a) Streuplot und Korrelation, (b) Häufigkeitsverteilung.

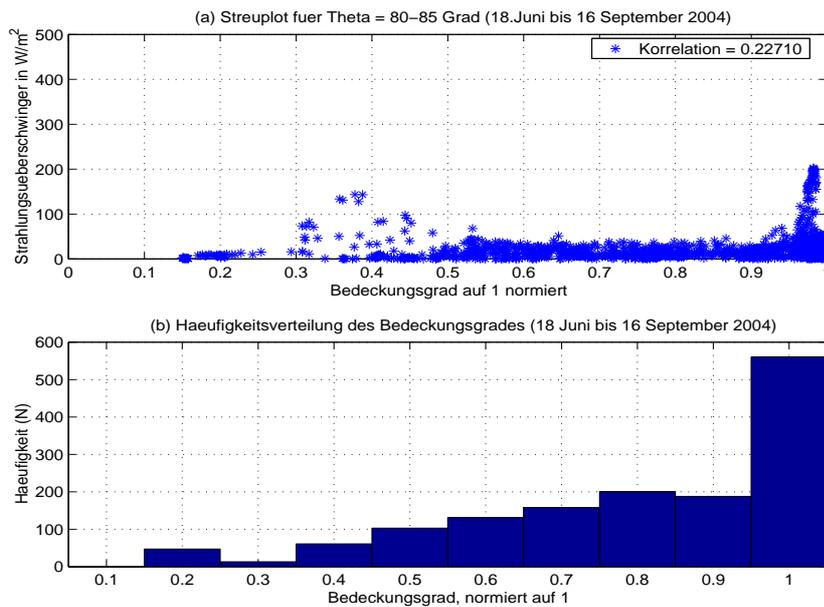


Abbildung A.33: Bedeckungsgrade und Strahlungserhöhungen für $\Theta = 80 - 85^\circ$: (a) Streuplot und Korrelation, (b) Häufigkeitsverteilung.

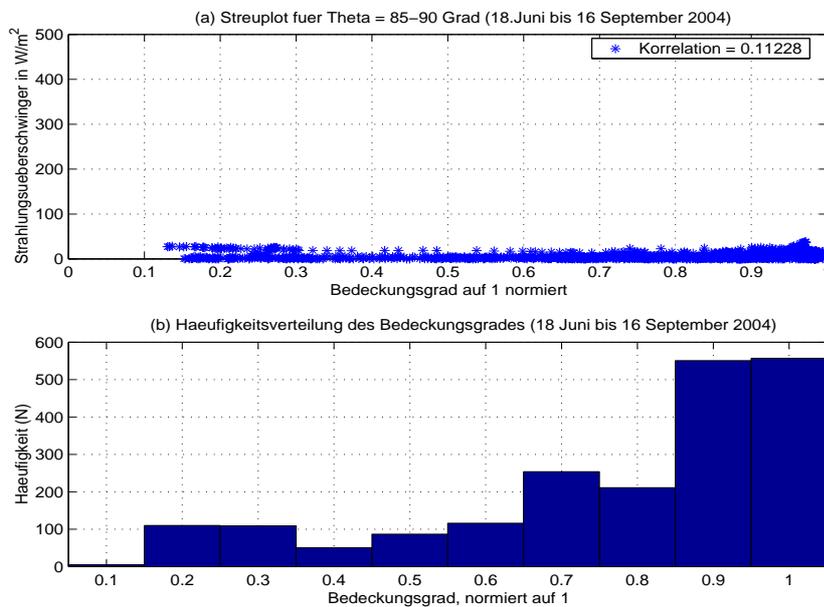


Abbildung A.34: Bedeckungsgrade und Strahlungserhöhungen für $\Theta = 85 - 90^\circ$: (a) Streuplot und Korrelation, (b) Häufigkeitsverteilung.

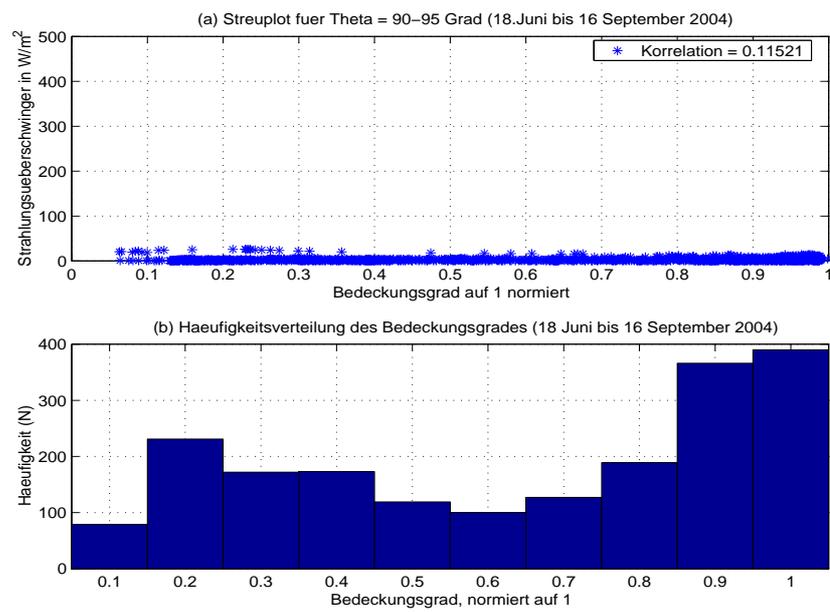


Abbildung A.35: Bedeckungsgrade und Strahlungserhöhungen für $\Theta = 90 - 95^\circ$: (a) Streuplot und Korrelation, (b) Häufigkeitsverteilung.

Literaturverzeichnis

- Barker, H. W., Morcrette, J. J., und Alexander, G. D., 1998. Broadband solar Fluxes and Heating Rates for Atmospheres with 3D Broken Clouds. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 124, 1245–1271.
- 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>. 10.01.2005.
- BTU-Cottbus, 2004. Nichtklassische Modelle / Fraktale. http://www-gs.informatik.tu-cottbus.de/wwwgs/cg2_v10a.pdf. 18.11.2004.
- Burtscher, L., 2001. Aufbau und Funktionsweise einer CCD-Kamera und ihre Anwendung in der Astronomie. <http://www.ileo.de/physics/facharbeit/>. 16.03.2004.
- Coley, P. F. und Jonas, P. R., 2001. Effects of Cloud Inhomogenities on the Sensitivity of Cloud Field Albedo to Droplet Concentration. *Proceedings of the International Radiation Symposium*, Seiten 1243–1246.
- Dürr, B. und Philipona, R., 2004. Automatic cloud amount detection by surface longwave downward radiation measurements. *Journal of Geophysical Research*, 109, 1–9.
- DWD, 1987. *Leitfäden ..., Nr.1: Allgemeine Meteorologie*. Deutscher Wetterdienst, Offenbach.
- Estupinan, J. G., Raman, S., Grescenti, G. H., Streicher, J. J., und Barnard, W. F., 1996. Effects of clouds and haze on UV-B radiation. *Journal of Geophysical Research*, 101, 16 807–16 816.
- Frerichs, W., 1999. Einfluss unterschiedlicher Strahlungsparametrisierungen in Meereis-simulationen der Arktis. Diplomarbeit, Institut für Meereskunde an der Christian - Albrechts-Universität Kiel.
- Hansen, J. E. und Travis, L. D., 1974. Light scattering in planetary atmospheres. *Space Science Reviews*, 16, 527–610.
- Hastings, H. M. und Sugihara, G., 1996. *Fraktale: Ein Leitfaden für Anwender*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg · Berlin · Oxford.

- Heise, C., 2004. Der Einfluss durchbrochener Bewölkung auf die solare Einstrahlung: Eine Studie für Kiel. Diplomarbeit, Institut für Meereskunde an der Christian -Albrechts-Universität Kiel.
- Hignett, P. und Taylor, J. P., 1996. The radiative Properties of inhomogeneous Boundary Layer Clouds: Observations and Modelling. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 122, 1341–1364.
- Kipp & Zonen, Herausgeber, 2004. *Instruction Manual: CM21 Precision Pyranometer, Version 0304*. Kipp & Zonen B.V., Röntgenweg 1, 2624 BD Delft, Holland.
- Kraft, R., 1995. Fractals and Dimensions. <http://www.wzw.tum.de/ane/dimensions.html>. 25.11.2004.
- Lane, D. E., Goris, K., und Sommerville, R. C. J., 2002. Radiative Transfer through Broken Clouds: Observations and Model Validation. *Journal of Climate*, 15(20), 2921–2933.
- Liou, K.-N., 1980. *Introduction to Atmospheric Radiation*. Academic Press, New York.
- Long, C. N. und Ackermann, T. P., 2000. Identification of clear skies from broadband pyranometer measurements and calculation of downwelling shortwave cloud effects. *Journal of Geophysical Research*, 105, 15 609–15 626.
- Long, C. N. und DeLuisi, J. J., 1998. Development of an Automated Hemispheric Sky Imager for Cloud Fraction Retrievals. *10th Symp. on Meteorological Observations and Instrumentation*. 11.-16. Januar 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.
- Macke, A., Mitchell, D. L., und Bremen, L. v., 1999. Monte Carlo radiative transfer calculations for inhomogeneous mixed phase clouds. *Phys. Chem. Earth (B)*, 24(3), 237–241.
- Macke, A. und Stick, C., 2004. Einfluss durchbrochener Bewölkung auf die solare Einstrahlung am Boden: Strahlungshaushalt und menschliche Belastung. DFG-Antrag, Institut für Meereskunde und Institut für Medizinische Klimatologie an der Christian -Albrechts-Universität Kiel.
- Med.Klim., 2004. UV-Strahlung. <http://www.uni-kiel.de/med-klimatologie/uvinfo.html>. 03.03.2004.
- Meyer, S., 2001. Einfluss dreidimensionaler inhomogener Bewölkung auf die reflektierte solare Strahldichte. Diplomarbeit, Institut für Meereskunde an der Christian -Albrechts-Universität Kiel.
- Morris, V., 2004. Total Sky Imager (TSI). <http://www.arm.gov/docs/instruments/static/tsi.html>. 12.02.2004.

- Nave, R., 2004. Rayleigh and Mie Scattering. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/blusky.html>. 11.11.2004.
- Oznovitch, I., Yee, R., Schiffler, A., McEwen, D. J., und Sofko, G. J., 1994. The all-sky camera revitalized. *Applied Optics*, 33(30), 7141–7150.
- Pfister, G., McKenzie, R. L., Liley, J. B., und Thomas, A., 2003. Cloud Coverage based on all-sky imaging and its impact on surface solar irradiance. *Journal of Applied Meteorology*, 42(10), 1421–1434.
- Sabburg, J. und Wong, J., 2000. The effect of clouds on enhancing UVB irradiance at the earth's surface: a one year study. *Geophysical Research Letters*, 27(20), 3337–3340.
- Sachs, L., 1992. *Angewandte Statistik*. Springer Verlag, Berlin [u.a.].
- Sandmann, H., 2001. Über die ultraviolette Sonnenstrahlung. *MNU*, 54(5), 260–265.
- Sandmann, H., 2002. Über die Verteilung der diffusen, im Himmelsgewölbe gestreuten ultravioletten Strahlung: Spektrale Messungen und Szenarien für eine medizinische Bewertung. Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät der Christian-Albrechts-Universität Kiel.
- Scheirer, R. und Macke, A., 2000. Influence of the gaseous atmosphere on solar fluxes of inhomogeneous clouds. *Phys. Chem. Earth (B)*, 25(2), 73–76.
- Schlüter, M. H., 2004. Modellierung der spektralen diffusen UV-Strahldichtefelder in Bodennähe für eine unbewölkte Atmosphäre. Diplomarbeit, Institut für Meereskunde an der Christian-Albrechts-Universität Kiel.
- Schönwiese, C. D., 2000. *Praktische Statistik*. Borntraeger, Berlin · Stuttgart.
- Shields, J., Black, K., und Tooman, T., 2004. Whole-Sky Imager (WSI). <http://www.arm.gov/docs/instruments/static/wsi.html>. 12.02.2004.
- Shields, J. E., Karr, M. E., Tooman, T. P., Sowle, D. H., und Moore, S. T., 1998. The Whole-Sky Imager - A year of Progress. http://www.arm.gov/docs/documents/technical/conf_9803/shields_98.pdf. 12.02.2004.
- Stick, C., 2001. Die Beiträge von direkter und indirekt diffuser Sonnenstrahlung im UV-Spektrum. *Akt Dermatol*, 27, 7–12.
- Stick, C., Harms, V., und Pielke, L., 1997a. Auf den Menschen beziehbare Messungen der ultravioletten Sonnenstrahlung. *Phys Rehab Kur Med*, 7, 55–59.
- Stick, C. und Pielke, L., 1998. Die Zusammensetzung der solaren UV-Strahlung im Tagesverlauf. *Akt Dermatol*, 24, 159–163.

Stick, C., Pielke, L., Hundhausen, E., und Harms, H., 1997b. *Public On-Line Information on Solar UV Irradiance Based on Spectrometric Measurements in a Sea Resort..* Springer, Berlin.

Tipler, P. A., 1994. *Physik.* Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.

Danksagung

Herrn Prof. Dr. Andreas Macke danke ich für die Betreuung der Arbeit und sehr hilfreichen Kommentare während meines gesamten Studiums, wie auch der gesamten Wolken- und Strahlungsgruppe für ihre Hilfe bei programmiertechnischen und sonstigen Problemen.

Dr. Klaus Uhlig danke ich für seine Arbeiten an der Kamera und ihrem Rechner sowie Jörg Wegener für Einarbeitung und Hilfestellung in das Ausleseprogramm der Kamera.

Herrn Prof. Dr. Carsten Stick und Dr. Henner Sandmann danke ich für die Zusammenarbeit und Hilfestellung bei der Datenerfassung und der Verbesserung/Verschönerung div. Kapitel, sowie Kurzweil und die Sorge um mein Wohlergehen (Kuchen, Tee nach dem 2-Kannen-Prinzip) bei meinen zahlreichen Besuchen auf Sylt.

Meinen Eltern danke ich, dass sie mir das Studium ermöglicht haben, ebenso meinen Großeltern und "unserer Aui" für ihre fortwährend aufmunternden Worte und vieles mehr.

Die Arbeit wurde mit der Textverarbeitung \LaTeX angefertigt.

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, 28 Januar 2005

(Nils Schade)