

---

# Analyse des Einflusses des Flugverkehrs auf die natürliche Zirkusbewölkung über Europa, Nordafrika und dem Nordatlantik

Waldemar Krebs

---



München 2006

Gutachter der Dissertation:

Erster Gutachter Prof. Dr. U. Schumann  
Zweite Gutachterin Prof. Dr. S. Crewell

Tag der mündlichen Prüfung: 17.05.2006

Manuskript des Forschungsberichtes eingereicht am 28.03.2006

# **Analyse des Einflusses des Flugverkehrs auf die natürliche Zirrusbewölkung über Europa, Nordafrika und dem Nordatlantik**

Dissertation  
der Fakultät für Physik der  
Ludwig-Maximilians-Universität München

Waldemar Krebs

Institut für Physik der Atmosphäre  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) e.V.  
D-82234 Weßling

Oberpfaffenhofen, im Mai 2006

## **Analyse des Einflusses des Flugverkehrs auf die natürliche Zirrusbewölkung über Europa, Nordafrika und dem Nordatlantik.**

### Kurzzusammenfassung

Der Flugverkehr wirkt durch eine Erhöhung des Bedeckungsgrades auf den Strahlungshaushalt der Erde. Zusätzlich kann er die optischen Eigenschaften von bereits vorhandenen Zirren verändern und damit die Strahlungsbilanz beeinflussen. In dieser Arbeit wurde erstmals für das Gebiet Europa, Nordatlantik und Nordafrika und für einen Zeitraum von 11 Monaten des Jahres 2004 der Einfluss des Flugverkehrs auf die Zirrusbedeckung und die Strahlungsbilanz der Erde mit Hilfe eines zeitlich hoch auflösenden Satellitensensors untersucht. Für das Untersuchungsgebiet konnte eine deutliche Korrelation zwischen Zirrusbedeckung und Flugverkehrsdichte gezeigt werden. Die Abschätzung des flugverkehrsinduzierten Bedeckungsgrades beträgt  $0.6 \pm 0.2\%$ . Global ergibt sich daraus eine zusätzliche Bedeckung von  $0.17 \pm 0.06\%$ . Damit lässt sich ein flugverkehrsinduzierter Strahlungsantrieb mit  $34 \frac{mW}{m^2}$  abschätzen. Die direkte Untersuchung des Einflusses des Flugverkehrs auf die ausgehenden Strahlungsflussdichten liefert für das Untersuchungsgebiet einen erwärmenden Effekt von  $1.1 \frac{W}{m^2}$ . Dieser Wert ergibt sich aus der Differenz der mittleren Strahlungsflussdichten ohne Flugverkehr und dem Gesamtgebiet. Global extrapoliert ergibt sich eine Erwärmung von  $290 \frac{mW}{m^2}$ . Dieser Wert ist jedoch mit einer sehr großen Unsicherheit behaftet. Zusätzlich zu der Untersuchung des gesamten Gebietes wurden Teilregionen, sowie die Tages- und Jahreszeitabhängigkeit untersucht. Es zeigt sich eine starke regionale Abhängigkeit der Wirkung des Flugverkehrs und eine sehr starke Abhängigkeit von der Tageszeit, zu der dieser stattfindet.

*Cirrus clouds, contrails, air traffic, cloud coverage, contrail frequency, radiative forcing, climate change, Meteosat Second Generation (MSG)*

## **Analysis of the impact of air traffic on natural cirrus clouds over Europe, North-Atlantic and North-Africa.**

### Short Abstract

Air traffic impacts cirrus cloud cover and consequently the radiation budget of the earth. Additionally air traffic may change the optical properties of already existent cirrus clouds and hence the radiation budget of the atmosphere. For the first time the impact of air traffic was investigated over Europe, North-Atlantic and North-Africa for a period of 11 months of 2004 with a high temporal-resolution satellite sensor. A significant correlation between cirrus cloud cover and air traffic density was shown for the region of interest. The air traffic induced cirrus cloud cover has been estimated with  $0.6 \pm 0.2\%$  for this region. Global extrapolation yields  $0.17 \pm 0.06\%$ . Based on this value an air traffic induced radiative forcing of  $34 \frac{mW}{m^2}$  follows. The direct investigation of the impact of air traffic on outgoing fluxes yields a warming effect of  $1.1 \frac{W}{m^2}$  for the region of interest. This value has been calculated from the difference between outgoing fluxes of air traffic free regions and the whole region. The global extrapolation yields a warming of  $290 \frac{mW}{m^2}$ . However this value is very uncertain. Additionally further aspects have been investigated. As a result, a strong dependency of the impact of air traffic on the geographic location and daytime could be shown.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>v</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>ix</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Stand der Wissenschaft . . . . .	2
1.2 Ziele und Vorgehen . . . . .	6
<b>2 Allgemeine Grundlagen</b>	<b>9</b>
2.1 Strahlungstransport in der Atmosphäre . . . . .	9
2.1.1 Strahlungsgrößen . . . . .	9
2.1.2 Strahlungsgesetze . . . . .	11
2.1.3 Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie . . . . .	12
2.1.4 Wolkeneigenschaften . . . . .	12
2.1.5 Strahlungstransportgleichung . . . . .	14
2.1.6 Strahlungsbilanz und Treibhauseffekt . . . . .	14
2.1.7 Strahlungsantrieb . . . . .	16
2.2 Meteosat-8 (Meteosat Second Generation, MSG) . . . . .	18
2.2.1 Spinning Enhanced Visible and Infra-Red Imager, SEVIRI . . . . .	19
2.2.2 Geostationary Earth Radiation Budget Experiment, GERB . . . . .	21
2.3 SEVIRI Messgrößen . . . . .	23
2.3.1 Umwandlung der gemessenen Strahldichte in äquivalente Helligkeitstemperatur	23
2.3.2 Umrechnung der Strahldichten in bidirektionale Reflektivität . . . . .	25
2.3.3 Gasabsorption in den SEVIRI Spektralbereichen . . . . .	25
<b>3 Methoden zur Ableitung von Zirruseigenschaften</b>	<b>29</b>
3.1 Klassifizierung von Zirren . . . . .	29
3.2 Satellitengestützte Fernerkundung von Zirren . . . . .	31
3.2.1 Schwellwerttechniken . . . . .	31
3.2.2 Falschfarbenbilder . . . . .	34

3.2.3	Mustererkennungsverfahren . . . . .	35
3.2.4	Weitere Möglichkeiten . . . . .	38
3.3	MSG Cirrus Detection Algorithm (MeCiDA) . . . . .	39
3.3.1	Morph&Dilate Zirrustest . . . . .	39
3.3.2	Morphologische Zirrustests . . . . .	43
3.3.3	Zusammenfassung . . . . .	45
3.4	Validierung der Zirrusmaske . . . . .	49
3.4.1	Vergleich mit Einzelszenen . . . . .	49
3.4.2	Vergleich mit Monatsmittelwerten . . . . .	52
3.4.3	Zusammenfassung Validierung . . . . .	54
3.5	Methoden zur Bestimmung der Strahlungsflussdichte . . . . .	55
3.5.1	Parametrisierungsmodell der langwelligen Strahlungsflussdichte . . . . .	55
3.5.2	Parametrisierungsmodelle der kurzwelligen Strahlungsflussdichte . . . . .	56
3.6	Validierung der Strahlungsflussdichten . . . . .	62
3.6.1	CERES Instrument . . . . .	62
3.6.2	Validierung der langwelligen Strahlungsflussdichten . . . . .	62
3.6.3	Validierung der kurzwelligen Strahlungsflussdichten . . . . .	63
3.6.4	Zusammenfassung Validierung der Strahlungsflussdichten . . . . .	65
<b>4</b>	<b>Der Einfluss des Flugverkehrs auf die Zirrusbedeckung</b>	<b>67</b>
4.1	Theoretische Abhängigkeit des Bedeckungsgrades von der Flugverkehrsdichte . . . . .	67
4.2	Grundlagen und Methoden der statistischen Untersuchung . . . . .	69
4.2.1	Verwendete Daten . . . . .	69
4.2.2	Untersuchung der Daten . . . . .	70
4.2.3	Verwendete Methoden . . . . .	74
4.3	Ergebnisse der statistischen Untersuchungen . . . . .	77
4.3.1	Untersuchung des Jahresgangs für das Teilgebiet . . . . .	77
4.3.2	Untersuchung des Tagesgangs . . . . .	84
4.3.3	Untersuchung des gesamten Jahres 2004 für das Teilgebiet . . . . .	87
4.3.4	Untersuchung des Gesamtgebiets . . . . .	91
4.4	Zusammenfassung Einfluss auf die Zirrusbedeckung . . . . .	94
<b>5</b>	<b>Einfluss des Flugverkehrs auf den Strahlungshaushalt</b>	<b>97</b>
5.1	Methoden zur Abschätzung des Strahlungsantriebs . . . . .	97
5.2	Ergebnisse der statistischen Untersuchungen . . . . .	100
5.2.1	Untersuchung des Jahresgangs für die Europa-Nordafrika-Teilregion . . . . .	100
5.2.2	Untersuchung der Europa-Nordafrika-Teilregion für 11 Monate des Jahres 2004	102
5.2.3	Untersuchung des Tagesgangs in der Gesamtregion . . . . .	104
5.2.4	Untersuchung der Gesamtregion für 11 Monate des Jahres 2004 . . . . .	107
5.3	Zusammenfassung Strahlungsantrieb des Flugverkehrs . . . . .	113

<b>6</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick</b>	<b>117</b>
6.1	Zusammenfassung . . . . .	117
6.2	Offene Fragen und Ausblick . . . . .	118
<b>A</b>	<b>Anhang Validierung der Zirrusmaske</b>	<b>121</b>
A.1	Vergleich mit Einzelszenen . . . . .	121
A.1.1	Februar . . . . .	121
A.1.2	März . . . . .	122
A.1.3	April . . . . .	122
A.1.4	Mai . . . . .	123
A.1.5	Juni . . . . .	123
A.1.6	Juli . . . . .	124
A.1.7	August . . . . .	124
A.1.8	September . . . . .	125
A.1.9	Oktober . . . . .	125
A.1.10	November . . . . .	126
A.1.11	Dezember . . . . .	126
A.2	Vergleich mit Monatsmittelwerten . . . . .	127
A.2.1	Februar . . . . .	128
A.2.2	März . . . . .	128
A.2.3	April . . . . .	129
A.2.4	Mai . . . . .	129
A.2.5	Juni . . . . .	130
A.2.6	Juli . . . . .	130
A.2.7	August . . . . .	131
A.2.8	September . . . . .	131
A.2.9	Oktober . . . . .	132
A.2.10	November . . . . .	132
A.2.11	Dezember . . . . .	133
<b>B</b>	<b>Anhang Auswertung</b>	<b>135</b>
B.1	Untersuchung des Jahresgangs der Zirrusbedeckung . . . . .	135
B.2	Untersuchung des Tagesgangs der Zirrusbedeckung . . . . .	142
B.3	Einfluss des Jahresgangs auf die Strahlungsflussdichte . . . . .	146
B.4	Einfluss des Tagesgangs auf die Strahlungsflussdichte . . . . .	147

<b>C</b>	<b>Anhang Statistik</b>	<b>149</b>
C.1	Der Spearmansche Rang-Korrelationskoeffizient . . . . .	149
C.2	Vergleich zweier Mittelwerte . . . . .	150
<b>D</b>	<b>Anhang Simulation von SEVIRI mit SimSat</b>	<b>153</b>
D.1	Der Satelliten Simulator: SimSat . . . . .	153
D.2	Das libRadtran Paket . . . . .	153
D.3	Simulationsparameter . . . . .	154
D.4	Simulationsergebnisse . . . . .	154
D.4.1	Simulation wolkenfreier Fall . . . . .	154
D.4.2	Simulation Zirrus . . . . .	158
D.4.3	Simulation Zirrus über dicker Wasserwolke . . . . .	166
D.4.4	Simulation Zirrus über dünner Wasserwolke . . . . .	173
D.4.5	Simulation von Wasserwolken . . . . .	179
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>183</b>
	<b>Index</b>	<b>191</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>193</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>205</b>

# Zusammenfassung

Der Flugverkehr wirkt durch eine Erhöhung des Bedeckungsgrades von Zirren auf den Strahlungshaushalt der Erde. Zusätzlich kann er die optischen Eigenschaften von bereits vorhandenen Zirren verändern und somit die Strahlungsbilanz beeinflussen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde erstmals für das Gebiet Europa, Nordatlantik und Nordafrika und für einen Zeitraum von 11 Monaten des Jahres 2004 der direkte Einfluss des Flugverkehrs auf die Zirrusbewölkung und die ausgehende Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre untersucht.

Aufgrund der hohen zeitlichen Auflösung von SEVIRI, dem Hauptinstrument des geostationären Meteosat Second Generation Satelliten, konnte dabei die zeitliche Variabilität des Flugverkehrs berücksichtigt werden. Eine mögliche Scheinkorrelation durch natürliche Tageszeitabhängigkeit der Zirrusbedeckung bzw. Strahlungsflussdichte und Flugverkehr wurde durch Erweiterung und Verbesserung der statistischen Methode von [MANNSTEIN und SCHUMANN 2005] eliminiert. Für die Untersuchungen notwendige Methoden zur Ableitung von Zirrusbedeckungen und Strahlungsflussdichten wurden entwickelt. Für den Zeitraum des Jahres 2004, für den Daten zur Verfügung standen, wurden Zirrusmasken und die ausgehenden Strahlungsflussdichten berechnet. Die abgeleiteten Produkte wurden mit Daten aus polar umlaufenden Satelliten validiert.

Für das gesamte Untersuchungsgebiet konnte eine deutliche Korrelation zwischen Zirrusbewölkung und Flugverkehrsdichte gezeigt werden. Die Abschätzung des zusätzlichen Bedeckungsgrades beträgt  $0.6 \pm 0.2\%$ . Eine lineare Extrapolation dieser Daten liefert eine globale zusätzliche Bedeckung von  $0.17 \pm 0.06\%$ . Dieser Wert liegt im Bereich des in *Aviation and the Global Atmosphere, A Special Report of IPCC* [FAHEY et al. 1999] berechneten flugverkehrsinduzierten Bedeckungsgrads von 0.2% [FAHEY et al. 1999]. Der Strahlungsantrieb wurde in [FAHEY et al. 1999] mit einer optischen Dicke von 0.3 mit  $40 \frac{mW}{m^2}$  abgeschätzt [SCHUMANN 2005]. Basierend auf diesen Werten lässt sich aus dem globalen Bedeckungsgrad ein flugverkehrsinduzierter Strahlungsantrieb mit  $34 \frac{mW}{m^2}$  abschätzen.

Die direkte Untersuchung des Einflusses des Flugverkehrs auf die ausgehenden Strahlungsflussdichten liefert für das Untersuchungsgebiet einen erwärmenden Effekt von  $1.1 \pm 0.9 \frac{W}{m^2}$ . Dieser Wert ist die Differenz der mittleren ausgehenden Strahlungsflussdichten in Gebieten ohne Flugverkehr und dem Gesamtgebiet. Global extrapoliert ergibt sich eine Erwärmung von  $290 \frac{mW}{m^2}$ . Dieser Wert ist mit einer sehr großen Unsicherheit behaftet. Zum einen kann der gleiche Bedeckungsgrad, je nach Albedo und Tageszeit einen erwärmenden oder kühlenden Effekt verursachen. Bei der Extrapolation auf die gesamte Erde wurde dies jedoch nicht berücksichtigt. Zum anderen lässt sich der Wert  $1.1 \frac{W}{m^2}$  nur bedingt als der Strahlungsantrieb des Flugverkehrs interpretieren. Er ist aufgrund eines natürlichen Nord-Süd-Gradienten der ausgehenden Strahlungsflussdichten wahrscheinlich überschätzt.

Zusätzlich zu der Untersuchung des gesamten Gebietes und des gesamten Jahres wurden Teilregionen, sowie die Tages- und Jahreszeitabhängigkeit untersucht. Es zeigt sich eine sehr starke Abhängigkeit der Wirkung des Flugverkehrs von der Tageszeit, zu der dieser stattfindet.

Vor allem die Verringerung des Flugverkehrs am Abend und in der Nacht würde daher die erwärmende Wirkung des Flugverkehrs reduzieren. Auch die Albedo der Regionen, über denen der Flugverkehr stattfindet, und die Temperatur der jeweiligen Region spielen eine erhebliche Rolle. Diese Faktoren können mit dem Ziel, den Treibhauseffekt des Flugverkehrs zu reduzieren, gesteuert werden.



# Kapitel 1

## Einleitung

Am 16. Februar 2005 trat das Kyoto-Protokoll in Kraft. 141 Länder verpflichteten sich darin, den weltweiten Ausstoß von sechs Treibhausgasen bis 2012 um mindestens 5.2% gegenüber 1990 zu reduzieren. Die EU-Kommission will einen weiteren Schritt im Emissionshandel gehen und ab 2008 auch den gesamten europäischen Flugverkehr einbeziehen (taz: 28. September 2005). Der Flugverkehr ist momentan in den Emissionshandel nicht einbezogen.

In einer zusammenwachsenden und sich vernetzenden Welt steigt die Mobilität der Menschen und damit der Flugverkehr. Dabei wirkt der Flugverkehr in mannigfaltiger Art und Weise auf unsere Umgebung. Lärm und der CO<sub>2</sub> Ausstoß sind vielleicht die bekanntesten negativen Auswirkungen des Flugverkehrs auf die Umwelt und die Atmosphäre. Kondensstreifen gehören zwar in Industrienationen zum alltäglichen Erscheinungsbild am Himmel, ihre Auswirkungen auf das Klima sind jedoch in der Öffentlichkeit weniger bekannt. Zirruswolken, die aus diesen Kondensstreifen entstehen können oder deren optische Eigenschaften durch den Flugverkehr verändert werden können, sind vom Boden aus häufig nicht von natürlichen Zirren zu unterscheiden. Neben weiteren Faktoren können diese jedoch den Strahlungshaushalt des Systems Erde/Atmosphäre stark beeinflussen. In Abb. 1.1 sind die wichtigsten Einflussfaktoren des Flugverkehrs auf die Strahlungsbilanz der Erde dargestellt.

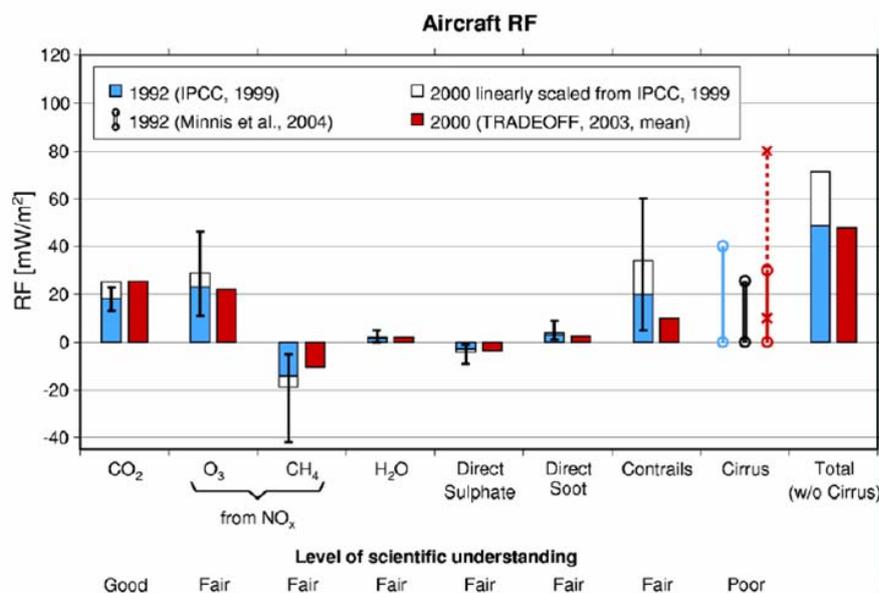


Abbildung 1.1: Strahlungsantrieb des Flugverkehrs. Quelle:[SAUSEN et al. 2005].

Diese Abbildung zeigt, dass der Strahlungsantrieb von flugverkehrsinduzierten Zirren in der Größenordnung des CO<sub>2</sub> oder höher sein könnte. Daher ist es sehr wichtig, diesen Effekt zu kennen und zu berücksichtigen, wenn der Einfluss des Flugverkehrs auf das Klima reduziert werden soll.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Wirkung des Flugverkehrs auf eine Erhöhung der Zirrusbedeckung untersucht und aus dem zusätzlichen Bedeckungsgrad die Wirkung des Flugverkehrs auf den Strahlungsantrieb abgeschätzt. Desweiteren wurde erstmals der Einfluss des Flugverkehrs auf die ausgehende Strahlungsflussdichte direkt untersucht. Die Untersuchungsregion umfasst 8% der Erde und beinhaltet Europa, Nordafrika und große Teile des Nordatlantik. Innerhalb dieser Region befinden sich Gebiete mit einem sehr hohen Flugverkehrsaufkommen.

Diese Arbeit war Teil eines von der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) finanzierten internationalen Forschungsprojektes **CONTRAILS**. Das Projekt wurde von Dr. Hermann Mannstein (DLR) geleitet und von Dr. Simon Pinnock (ESA) koordiniert. Die Projektpartner waren das Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI), Dundee Satellite Receiving Station (DSRS) und das Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Das Projekt war Teil des ESA DUE (Data User Element of the Earth Observation Envelope Programme). Der Nutzer war die Europäische Flugsicherung, European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL), die die im Rahmen dieser Arbeit notwendigen Flugverkehrsdaten für das Jahr 2004 für die Untersuchungsregion zur Verfügung gestellt hat. Ohne diese Daten wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

## 1.1 Stand der Wissenschaft

Kondensstreifen sind seit fast einem Jahrhundert Bestandteil der Forschung. Erste Veröffentlichungen gab es bereits im Jahr 1919 ([ETTENREICH 1919], [WEICKMANN 1919]). Durch ihre Sichtbarkeit gewannen die Kondensstreifen in den 40er Jahren verstärkte Aufmerksamkeit, als es darum ging, Flugzeuge aufzuspüren ([LÖHNER 1940], [RHODE und PEARSON 1942], [WEICKMANN 1945]). Die thermodynamische Theorie, die die Bildung von Kondensstreifen beschreibt, wurde erstmals 1941 publiziert ([SCHMIDT 1941]). Die ausgestoßenen warmen Flugzeugabgase enthalten Aerosolpartikel und Wasserdampf. Die Abgase vermischen sich mit der kalten Umgebungsluft, was einen Anstieg der relativen Feuchte zur Folge hat. Wird eine Übersättigung bezüglich der Flüssigwasserphase erreicht, führt dies zur Kondensation an den Abgas- oder Umgebungsaerosolen und anschließendem Gefrieren der flüssigen Tröpfchen. Kondensstreifen bilden sich beim Unterschreiten einer Grenztemperatur, die vom Druck und relativer Feuchte der Umgebungsluft, sowie von Wasserdampf- und Wärmefreisetzung und dem Wirkungsgrad des Triebwerks abhängt. Dieser Zusammenhang wird mit dem Schmidt-Appleman-Kriterium beschrieben ([SCHMIDT 1941], [APPLEMAN 1953]).

Die Übersättigung bezüglich der Eisphase ist kein hinreichendes Kriterium zur Bildung von Kondensstreifen ([JENSEN et al. 1998], [KÄRCHER et al. 1998], [SCHUMANN et al. 2000]). Für die Entstehung persistenter Kondensstreifen ist Eisübersättigung jedoch notwendig ([BREWER 1946], [SCHUMANN 1996], [JENSEN et al. 1998]). Wenn die Umgebungsluft trocken und die Luft nicht eisübersättigt ist, verdunsten die Eispartikel des Kondensstreifens nach wenigen Sekunden oder Minuten, ein bis einige zehn Kilometer hinter dem Flugzeug ([SCHUMANN 2005]). In eisübersättigter Luft wachsen die Eispartikel durch Anlagerung der Wasserdampf-moleküle aus der Umgebung.

Eisübersättigte Regionen können durch das Anwachsen absinkender Zirrusfallstreifen in übersättigten Atmosphärenschichten ([LUDLAM 1980]) und durch persistente Kondensstreifen ([BREWER 1946]) nachgewiesen werden. Obwohl Kondensstreifenentstehung sich häufig in oder in der Nähe von Zirren beobachten lässt ([SASSEN 1997], [SCHRÖDER et al. 2000]), können Kondensstreifen sich auch in Regionen ohne Zirruswolken bilden und in diesen Regionen existieren ([SCHUMANN 2002]).

Eisübersättigte Luftmassen entstehen in Gebieten, in denen Luft aufsteigt und sind oft mit Zirren bedeckt (siehe z.B. [SPICHTINGER et al. 2005]). Es wurden Regionen mit einer horizontalen Ausbreitung von ca. 150 km gefunden ([GIERENS et al. 2000]). Die vertikale Ausdehnung beträgt im Mittel ca. 500 m ([SPICHTINGER et al. 2003a]). Die Größe der Regionen, in denen Eisübersättigung herrscht, bestimmt den **potentiellen Kondensstreifenbedeckungsgrad**, d.h. den Kondensstreifenbedeckungsgrad der sich ergeben würde, wenn Flugzeuge überall und zu jeder Zeit fliegen würden ([SCHUMANN 2005]). Globale Verteilungen der eisübersättigten Gebiete wurden aus Satellitendaten abgeleitet ([SPICHTINGER et al. 2003b]) bzw. aus der Analyse meteorologischer Daten

([SAUSEN et al. 1998]). Die Analysen zeigen, dass der globale Kondensstreifenbedeckungsgrad 16% erreichen kann ([SAUSEN et al. 1998]). Über Europa ist der potentielle Kondensstreifenbedeckungsgrad 12%. Dies ist konsistent mit Schätzungen der Größe der Regionen mit Anhäufungen von persistenten Kondensstreifen, die aus Satellitendaten abgeleitet wurden ([MANNSTEIN et al. 1999]) und in-situ Messungen der Feuchte ([GIERENS et al. 1999b], [GIERENS und SPICHTINGER 2000]).

In eisübersättigten Regionen können Kondensstreifen über mehrere Stunden existieren und sich durch Turbulenz und Windscherung über sehr große Gebiete ausbreiten. Dabei nähert sich das Aussehen der Kondensstreifen dem der natürlichen Zirren an. Es ist daher oft schwierig zu entscheiden, ob ein Zirrus natürlich entstanden ist oder ob dieser ursprünglich aus einem Kondensstreifen entstand ([SCHUMANN und WENDLING 1990], [MINNIS et al. 1998], [SCREEN und MACKENZIE 2004]). Daher wurden **linienförmige Kondensstreifen** in Satellitenbildern aufgrund ihrer linienförmigen Struktur von natürlichen Zirren unterschieden. Der Bedeckungsgrad von persistenten Kondensstreifen wurde erstmals von [BAKAN et al. 1994] auf der Basis von manuellen Auswertungen von Satellitenbildern über dem östlichen Teil des Nordatlantik und Westeuropa ( $30^{\circ}W - 30^{\circ}O$ ,  $35^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ) abgeleitet. Die Kondensstreifenbedeckungsgrad betrug 0.5% während des Tages und ca. 0.37% im Gesamttagesmittel. Spätere automatisierte Analysen über Zentraleuropa (mit einer höheren Flugverkehrsdichte) zeigten kleinere Bedeckungsgrade ([MANNSTEIN et al. 1999], [MEYER et al. 2002b]).

[MANNSTEIN et al. 1999] entwickelten ein **automatisches Kondensstreifenerkennungssystem** zur Erkennung linienförmiger Kondensstreifen. Mit Hilfe der entwickelten Methoden wurden verschiedene Regionen untersucht: Zentraleuropa ([MEYER et al. 2002b], [MEYER et al. 2002c]), Süd- und Ostasien ([MEYER et al. 2002a]), Nordamerika ([PALIKONDA et al. 2005]) und der östliche Nordpazifik ([MINNIS et al. 2005b]).

[SAUSEN et al. 1998] schätzten den globalen Bedeckungsgrad linienförmiger Kondensstreifen auf 0.09%. Die Schätzungen wurden auf der Basis von Temperatur und Feuchtedaten aus numerischen Wetteranalysedaten und Flugverkehrsdaten (Treibstoffverbrauch bzw. geflogene Flugstrecke pro Modelbox) aus den Jahren 1991/1992 gerechnet und mit den Ergebnissen von [BAKAN et al. 1994] kalibriert. [MARQUART et al. 2003] schätzten, mit neueren Satellitendaten und der Annahme eines niedrigeren Bedeckungsgrad in der Nacht, den Bedeckungsgrad linienförmiger Kondensstreifen auf 0.07%. [GIERENS et al. 1999a] berechnete für Zukunftsszenarien einen Bedeckungsgrad für das Jahr 2015 von 0.25% und für das Jahr 2050 zwischen 0.26% und 0.75%.

Die durch den Flugverkehr verursachte Änderung der Bewölkung ist jedoch größer als die zusätzliche Bewölkung durch linienförmige Kondensstreifen.

Kondensstreifen können sich bei eisübersättigter umgebender Luft zu weit größeren **flugverkehrsinduzierten Zirruswolken** (*engl. contrail-cirrus*) ausbreiten. Diese Wolken werden im Rahmen dieser Arbeit über Europa, Nordafrika und dem Nordatlantik ausführlich untersucht. Abb. 1.2 veranschaulicht die Größenordnung der Gebiete, die flugverkehrsinduzierte Zirruswolken bedecken können. Man sieht große Teile Spaniens und Frankreichs mit flugverkehrsinduzierten Zirren bedeckt. Die Wolken können über mehrere Stunden existieren. [MINNIS et al. 1998] nutzten Messungen eines geostationären Satelliten, um Kondensstreifen über mehrere Stunden zu verfolgen. Die Kondensstreifensysteme konnten dabei bis zu 17h beobachtet werden.

Desweiteren können die durch den Flugverkehr ausgestoßenen Partikel die Konzentration der Aerosolpartikel in der Atmosphäre verändern und somit Einfluss auf die Bildung von Zirren nehmen ([SCHUMANN 2005]). Die Verweildauer solcher Partikel in der oberen Troposphäre kann, abhängig von der Jahreszeit und Atmosphärensicht, mehrere Wochen betragen. Die von Flugzeugen ausgestoßenen Partikel können als Kondensationskerne wirken ([KÄRCHER et al. 1996], [SAUSEN et al. 1998]). Die Partikel können die mikrophysikalischen Eigenschaften von Wolken, z.B. Partikelgröße, Form oder Anzahl der Wolkenpartikel verändern ([KRISTENSSON et al. 2000], [WYSER und STRÖM 1999]). Die heterogenen Kristallbildungsprozesse sind jedoch sehr komplex und noch nicht vollständig verstanden ([SCHUMANN 2005], [KÄRCHER 1999], [KÄRCHER 2000],[KÄRCHER und LOHMANN 2002], [JENSEN und TOON 1997],



Abbildung 1.2: Kondensstreifen und flugverkehrsinduzierte Zirren über Spanien. MSG-SEVIRI 2004/05/28 10:00 UTC.

[HAAG et al. 2003]). Die Veränderung der Konzentration der Kondensationskerne (z.B. durch Ausstoß von Ruß) können sowohl einen Anstieg der Zirrusbedeckung als auch eine Verringerung der Zirrusbedeckung zur Folge haben ([HAAG und KÄRCHER 2004]).

Einige auf Bodenmessungen und Satellitendaten basierende Zeitreihenstudien deuten auf einen Anstieg des Bedeckungsgrades hin, der mit einem Anstieg des Flugverkehrs korreliert ([BOUCHER 1999], [MINNIS et al. 2005a], [ZEREFOS et al. 2003], [STORDAL et al. 2004], [STUBENRAUCH und SCHUMANN 2005]). [BOUCHER 1999] benutzte Bodenbeobachtungsdaten (über Land und von Schiffen) und fand einen Anstieg der Beobachtungen von Zirren (nicht Zirrusbedeckung), der mit dem Treibstoffverbrauch von Flugzeugen korreliert. Die Studien von [MINNIS et al. 2005a], [ZEREFOS et al. 2003], [STORDAL et al. 2004] basieren auf Daten des Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) ([ROSSOW und SCHIFFER 1999]). Daten aus 16 Jahren wurden unter unterschiedlichen statistischen Annahmen (teilweise in Verbindung mit anderen Daten) untersucht. Die Trends über Europa betragen zwischen 1.3% und 2% zusätzliche Bedeckung pro Dekade und sind möglicherweise durch den Flugverkehr verursacht. [STUBENRAUCH und SCHUMANN 2005] benutzen neun Jahre Infrarot- und Mikrowellendaten des TOVS Sensors. Aus den Daten wurden Feuchteprofile und Wolkenbedeckungen abgeleitet. Für Regionen mit hohen Flugverkehrsdichten und gleichzeitig geeigneten Bedingungen für Kondensstreifenbildung wurde ein signifikant höherer Anstieg des effektiven Bedeckungsgrades hoher Wolken gefunden. Solche Bedingungen fanden sich in 5% bis 10% der Fälle. Der Bedeckungsgrad über Europa und dem Nordatlantikflugkorridor stieg um 5% pro Dekade für solche Bedingungen. Die Zunahme der Bedeckung über alle Situationen gemittelt, betrug für Regionen mit hoher Flugverkehrsdichte wie Europa und dem Nordatlantikkorridor 0.2-0.25% bzw. 0.08-0.24% pro Dekade.

Aus allen diesen Studien lässt sich über eine Periode von ca. zwei Dekaden eine Zunahme der Bedeckung zwischen 0.4% und 4% abschätzen ([SCHUMANN 2005]), was bis zu 8 mal größer ist als die Bedeckung mit linienförmigen Kondensstreifen ([MEYER et al. 2002b]). Die Untersuchungen legen

nahe, dass der Flugverkehr für die beobachteten Änderungen der Bedeckungsgrade verantwortlich ist, jedoch kann dies keine dieser Studien beweisen.

[MANNSTEIN und SCHUMANN 2005] untersuchten die Korrelation mit Satellitenbeobachtungen und simultanen Flugverkehrsdaten. Sie konnten zeigen, dass die Zirkusbedeckung in Regionen mit hoher Flugverkehrsdichte systematisch höher ist als in Regionen mit niedriger Flugverkehrsdichte. Diese Studie bildet die Grundlage dieser Arbeit. Die Studie zeigte, dass der Bedeckungsgrad flugverkehrsinduzierter Zirren zehnmal höher ist als der linienförmiger Kondensstreifen. Desweiteren zeigte die Studie eine Korrelation zwischen der Flugverkehrsdichte und der Abnahme des ausgehenden langwelligen Strahlungsflusses am Oberrand der Atmosphäre.

Durch die Veränderung des Bedeckungsgrades und der optischen Eigenschaften von Zirren beeinflusst der Flugverkehr den Strahlungshaushalt des System Erde/Atmosphäre. Kondensstreifen und flugverkehrsinduzierte Zirren verringern zum einen die kurzwellige Einstrahlung, die den Erdboden erreicht (**Albedoeffekt**). Auf der anderen Seite verringern sie auch die langwellige Strahlung, welche die Erde in den Weltraum verlässt (**Treibhauseffekt**). Welcher der beiden Effekte überwiegt bestimmt, ob die Kondensstreifen und Zirren erwärmend wirken, d.h. einen positiven **Strahlungsantrieb** haben, oder kühlen, d.h. einen negativen Strahlungsantrieb haben. Dies hängt wesentlich von der Temperatur und Albedo des Untergrunds der Wolken und von den Eigenschaften der Wolken selbst ab wie der optischen Dicke, Effektivradius sowie Emissionsvermögen und Temperatur. Die optische Dicke hängt von Partikeleigenschaften und Eis-Wasser-Gehalt ab.

Die mittlere optische Dicke  $\tau$  (bei einer Wellenlänge von 550 nm) persistenter linienförmiger Kondensstreifen liegt nach [MINNIS et al. 2005a] zwischen 0.15 und 0.25. Schätzungen aus Lidarmessungen ([SASSEN 1997], [FREUDENTHALER et al. 1996], [JÄGER et al. 1998]) liegen zwischen 0.05 und 0.5, mit bestmöglicher Schätzung 0.3 ([MEERKÖTTER et al. 1999], [MINNIS et al. 1999], [FAHEY et al. 1999]). Neuere Satellitendatenanalysen und Modellstudien zeigen  $\tau$  bei 0.1 ([MEYER et al. 2002b], [PONATER et al. 2002]) über Europa und 0.2 bis 0.26 über den USA ([MINNIS et al. 2005a]). [PONATER et al. 2002] berechneten einen globalen Mittelwert der optischen Dicke mit 0.15.

Der Strahlungsantrieb ([PENNER et al. 1999]) von Kondensstreifen am Oberrand der Atmosphäre wurde unter der Annahme berechnet, dass Kondensstreifen geometrisch und optisch dünne planparallele und homogenen Zirren in einer statischen Atmosphäre darstellen ([STRAUSS et al. 1997], [MEERKÖTTER et al. 1999], [MINNIS et al. 1999]). Die Berechnungen zeigen in vielen Fällen einen positiven, d.h. (instantan) erwärmenden Strahlungsantrieb für dünne Zirren ([MEERKÖTTER et al. 1999]). Ein negativer, d.h. (instantan) kühlender Strahlungsantrieb zeigte sich für optisch dicke Zirren ( $\tau = 10$ ) ([FORTUIN et al. 1995], [ZHANG et al. 1999]). Der Strahlungsantrieb von Kondensstreifen und flugverkehrsinduzierten Zirren ist sehr stark von der Oberflächentemperatur und der Albedo unter ihnen abhängig. Auch dünne Zirren wirken kühlend über sehr dunklen und kalten Gebieten, wie z.B. über dem Nordatlantik im Winter ([MEERKÖTTER et al. 1999], [MEYER et al. 2002b]).

Hauptsächlich bedingt durch die unterschiedlich angenommenen Bedeckungsgrade und optischen Dicken variiert der globale Strahlungsantrieb von linienförmigen Kondensstreifen zwischen  $3.5 \frac{mW}{m^2}$  ([MARQUART et al. 2003]),  $9 \frac{mW}{m^2}$  ([MYHRE und STORDAL 2001]) und  $17 \frac{mW}{m^2}$  ([MINNIS et al. 1999]). Diese Werte wurden für das Jahr 1992 berechnet und können aufgrund des Anstieges des Flugverkehrs für das Jahr 2004 wahrscheinlich als höher angenommen werden. Die große Unsicherheit der Abschätzungen (siehe Abb. 1.1) ist im wesentlichen eine Folge der Addition zweier großer Zahlen mit unterschiedlichen Vorzeichen. Fehler des positiven, kühlenden kurzwelligen Anteil des Strahlungsantriebs und des negativen langwelligen, erwärmenden Anteils bewirken einen großen relativen Fehler des Nettoeffekts.

Die Abschätzung des Strahlungsantriebs flugverkehrsinduzierter Zirren im IPCC basiert auf der Annahme einer zusätzlichen globalen Bedeckung bis zu 0.2% und einer optischen Dicke von 0.3 ([PENNER et al. 1999], [SCHUMANN 2005]). Diese Annahmen haben eine große Unsicherheit

([PENNER et al. 1999], [FAHEY et al. 1999], [STORDAL et al. 2004]). Der Strahlungsantrieb flugverkehrsinduzierter Zirren beträgt danach  $40 \frac{mW}{m^2}$ . [MANNSTEIN und SCHUMANN 2005] fanden einen zehnfach höheren Bedeckungsgrad flugverkehrsinduzierter Zirren, als für linienförmige Kondensstreifen angenommen. Der Strahlungsantrieb würde für die gleichen optischen Eigenschaften, wie für die linienförmigen Kondensstreifen ebenfalls zehnfach höher sein. D.h. er würde für das Jahr 1992 zwischen  $35$  und  $170 \frac{mW}{m^2}$  und für das Jahr 2004 aufgrund der höheren Flugverkehrsdichte wahrscheinlich noch höher liegen. Aufgrund der nichtlinearen Abhängigkeit des Strahlungsantriebs von der optischen Dicke sind die optischen Eigenschaften flugverkehrsinduzierter Zirren jedoch anders, als die der linienförmigen Kondensstreifen ([SCHUMANN 2005]).

Der Strahlungsantrieb steigt für kleine optische Dicken zuerst an, bis er ein Maximum erreicht, und sinkt dann wieder ab einer optischen Dicke 2 bis 5 ([MEERKÖTTER et al. 1999]). Es ist möglich, dass Kondensstreifen in Zirren die optische Dicke erhöhen (durch kleinere Teilchen) und dann (instantan) entweder noch mehr erwärmen oder für optisch sehr dicke Zirren bei Tag kühlend wirken ([SCHUMANN 2005]).

Während der Zeit von 11.-14. September 2001, als der US-Amerikanische Flugverkehr eingestellt war, zeigten [TRAVIS et al. 2002] eine 1 K Erhöhung der Tagestemperaturschwankungen im Vergleich zu dem 30-Jahres Mittelwert in den USA. [TRAVIS et al. 2002] interpretierten dies als Beweis, dass Flugverkehr den Strahlungshaushalt über den USA beeinflusst. Jedoch war im Jahr 1982 die Tagestemperaturschwankung ebenfalls bei 1 K über dem Mittelwert ([TRAVIS et al. 2002]), was andere Gründe haben muss ([SCHUMANN 2005]).

Die Klimawirkung flugverkehrsinduzierter Zirren ist nicht genügend bekannt. Neben dem Strahlungsantrieb von Kondensstreifen, flugverkehrsinduzierten Zirren und der Änderung der optischen Eigenschaften von Zirren könnte das Klima durch Veränderung der Luftzusammensetzung durch Reaktionen an der Oberfläche oder innerhalb der induzierten Wolken und durch Veränderung des hydrologischen Zyklus beeinträchtigt werden, z.B. durch Sedimentation von Wasserpartikeln in der oberen Troposphäre und Veränderungen des Niederschlags. Es existieren bis jetzt nur vorläufige Schätzungen einiger dieser Aspekte, hauptsächlich den Strahlungsantrieb linienförmiger Kondensstreifen betreffend ([SCHUMANN 2005]).

[STRAUSS et al. 1997] erwarten bei einer einprozentigen zusätzliche Zirusbedeckung (regional,  $\tau = 0.28$ ) regional eine Erhöhung der Temperatur um 0.1 K. [RIND et al. 2000] berechneten mit einem globalen Zirkulationsmodell bei einer einprozentigen globalen Erhöhung der Zirusbedeckung ( $\tau = 0.33$ ) eine globale Erwärmung von 0.47 K. Für  $CO_2$  fanden [PONATER et al. 2005] einen höheren Strahlungsantrieb von  $0.73 \frac{W}{m^2}$  als für Kondensstreifen mit  $0.43 \frac{W}{m^2}$ . Danach betrug der globale Strahlungsantrieb (Kondensstreifenbedeckungsgrad 0.06%)  $3.5 \frac{mW}{m^2}$  für das Jahr 1992 und wurde mit  $9.8 \frac{mW}{m^2}$  für das Jahr 2015 geschätzt (Kondensstreifenbedeckungsgrad 0.15%,  $\tau$  zwischen 0.05 und 0.2 abhängig von der Region und Jahreszeit) ([MEYER et al. 2002a]). Die berechnete globale Erhöhung der Bodentemperatur beträgt danach bis zum Jahr 2000 ca. 0.005 K ([PONATER et al. 2005]). [MINNIS et al. 2005a] leiteten einen höheren Wert von 0.2 K bis 0.3 K pro Dekade für die Regionen ab, in denen Flugverkehr stattfindet. [SHINE 2005] und [PONATER et al. 2005] betonten einige Vereinfachungen dieser Studie und berechneten einen Wert, der um zwei Größenordnungen niedriger angesetzt ist.

All dies zeigt, dass die Unsicherheiten über die Wirkung des Flugverkehrs auf die zusätzliche Bedeckung mit Kondensstreifen und flugverkehrsinduzierte Zirren und damit vor allem auf den Strahlungshaushalt sehr hoch sind, bzw. dass verlässliche Abschätzungen fehlen.

## 1.2 Ziele und Vorgehen

Ziel dieser Arbeit war es, den Einfluss des Flugverkehrs auf die natürliche Zirusbedeckung und die Wirkung auf den Strahlungshaushalt über Europa, Nordatlantik und Nordafrika zu untersuchen.

Um diese Ziele zu erreichen wurden Flugverkehrsdaten, Zirkusbedeckungen und Strahlungsflussdichten in einer hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung benötigt. Da der Flugverkehr im Laufe eines Jahres unterschiedlich auf die Zirkusbedeckung und den Strahlungshaushalt wirkt, wurden diese Daten für den gesamten Zeitraum des Jahres 2004 berechnet, für den Messdaten zur Verfügung standen.

Das Instrument, welches räumlich wie zeitlich dieses Gebiet umfasst, und auf Basis dessen Daten die Möglichkeit bestand, Zirkusbedeckungen und Strahlungsflussdichten abzuleiten, war der **Spinning Enhanced Visible and Infra-Red Imager (SEVIRI)**. SEVIRI ist ein Instrument des geostationären Wettersatelliten **Meteosat Second Generation (MSG)**.

Um die benötigten Größen berechnen zu können, wurden im Rahmen dieser Arbeit Methoden zur Zirkuserkennung entwickelt. In Zusammenarbeit mit Dr. Bernhard Mayer und Dr. Hermann Mannstein wurden Methoden zur Ableitung von Strahlungsflussdichten entwickelt und implementiert. Zur Bewertung der Qualität der berechneten Zirkusbedeckungen und Strahlungsflussdichten wurden diese mit Daten aus polarumlaufenden Satelliten verglichen und validiert.

Mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Daten wurden die Zusammenhänge zwischen dem Flugverkehr und der Zirkusbedeckung, sowie Strahlungsflussdichten untersucht. Die Ergebnisse werden in dieser Arbeit vorgestellt und erläutert. Die vorliegende Arbeit ist dabei wie folgt aufgebaut:

Als erstes werden in **Kapitel 2** die grundlegenden Strahlungsgrößen und Strahlungsgesetze vorgestellt. Der Strahlungstransport in der Atmosphäre wird besprochen und der Strahlungsantrieb definiert. Der MSG-Satellit und die installierten Instrumente werden vorgestellt. Das in dieser Arbeit hauptsächlich verwendete Instrument SEVIRI wird näher erläutert. Die aus SEVIRI Messungen abgeleiteten, in dieser Arbeit verwendeten physikalischen Größen, werden vorgestellt.

In **Kapitel 3** wird der Begriff Zirkus eingeführt und diskutiert. Es werden unterschiedliche Möglichkeiten einer Zirkuserkennung mit Hilfe von Satellitenbildern gezeigt. Anschließend wird der für die Abschätzung des flugverkehrsinduzierten Bedeckungsgrades benötigte und im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Zirkuserkennungsalgorithmus vorgestellt. Die Validierung der abgeleiteten Zirkusmasken wird gezeigt und diskutiert.

Um die Wirkung des Flugverkehrs auf den Strahlungshaushalt abzuschätzen, wurden im Rahmen dieser Arbeit Strahlungsflussdichten in Zusammenhang mit dem Flugverkehr untersucht. Die notwendigen Methoden zur Berechnung von Strahlungsflussdichtedaten werden erläutert und die Ergebnisse der Validierung der Strahlungsflussdichten vorgestellt.

In **Kapitel 4** wird der Zusammenhang zwischen Flugverkehrsdichte und einer Erhöhung des Zirkusbedeckungsgrads untersucht. Die statistischen Methoden zur Abschätzung der flugverkehrsinduzierten Zirkusbedeckung werden vorgestellt und diskutiert. Anschließend werden die Ergebnisse der statistischen Untersuchungen für die Region  $80^{\circ}W - 50^{\circ}O$ ,  $20^{\circ}N - 75^{\circ}N$  sowie für Teilgebiete für das Jahr 2004 gezeigt und diskutiert.

In **Kapitel 5** wird der Einfluss des Flugverkehrs auf den Strahlungshaushalt untersucht. Die Untersuchungen basieren auf den gleichen Methoden, die für die Untersuchung des Zusammenhangs der Zirkusbedeckung mit dem Flugverkehr verwendet wurden. Der Einfluss des Flugverkehrs auf den Strahlungshaushalt wird aus der Änderung der ausgehenden Strahlungsflussdichten abgeschätzt. Das Verfahren wird vorgestellt und diskutiert. Anschließend werden die Ergebnisse der statistischen Untersuchungen für die Region  $80^{\circ}W - 50^{\circ}O$ ,  $20^{\circ}N - 75^{\circ}N$  sowie für Teilgebiete gezeigt und erläutert.

Abschließend werden die Hauptergebnisse dieser Arbeit in **Kapitel 6** zusammengefasst und diskutiert. Unsicherheiten und offene Fragen werden im Hinblick auf zukünftige Forschungsvorhaben erläutert.

In **Anhang A** werden die Ergebnisse der Validierung der Zirkuserkennung dargestellt. In **Anhang B** werden einige Ergebnisse der Auswertung gelistet. In **Anhang C** werden einige statistische Größen beschrieben und Tabellen, die zur Signifikanzprüfung dienen, gelistet. In **Anhang D** werden die Ergebnisse einer theoretischen Studie einer Zirkuserkennung mit SEVIRI dargestellt. Diese Untersuchungen waren wichtig für das Verständnis der SEVIRI Messungen und für die Entwicklung der Zirkuserkennung.



# Kapitel 2

## Allgemeine Grundlagen

In diesem Kapitel werden die grundlegenden Strahlungsgrößen und Strahlungsgesetze vorgestellt. Der Strahlungstransport in der Atmosphäre wird besprochen und der Strahlungsantrieb definiert. Die Instrumente Spinning Enhanced Visible and Infra-Red Imager (SEVIRI) und Geostationary Earth Radiation Budget (GERB) des europäischen Wettersatelliten Meteosat Second Generation (MSG) werden vorgestellt. Die verwendeten Messgrößen des Spinning Enhanced Visible and Infra-Red Imager (SEVIRI) werden erläutert.

### 2.1 Strahlungstransport in der Atmosphäre

#### 2.1.1 Strahlungsgrößen

Die Ausbreitung elektromagnetischer Strahlung wird durch die Theorie der Strahlungsübertragung quantitativ beschrieben. Dabei gilt der Welle-Teilchen-Dualismus, da ein Teil der Phänomene sich wellenmechanisch (z.B. Rayleigh-, Mie-Streuung), ein anderer Teil nur quantenmechanisch (z.B. Absorption, Planck-Funktion) vollständig beschreiben lässt.

Elektromagnetische Wellen werden häufig nach ihrer **Wellenlänge**  $\lambda$  oder **Frequenz**  $f$  charakterisiert, wobei diese Größen mit:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [m]$$

zusammenhängen.  $c$  ist die Lichtgeschwindigkeit und beträgt im Vakuum  $299.792.458 \frac{m}{s}$ . In der Atmosphäre breitet sich Licht bedingt durch die Wechselwirkung mit den Molekülen langsamer aus. Der **Brechungsindex**  $n$  beschreibt das Verhältnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts in einem Medium zur Lichtgeschwindigkeit im Vakuum. Eine weitere häufig verwendete Größe ist die **Wellenzahl**  $\nu$ , die Reziproke der Wellenlänge. Sie wird traditionell in  $[\frac{1}{cm}]$  angegeben.

Eine fundamentale Eigenschaft der elektromagnetischen Strahlung ist, dass sie Energie transportieren kann. Die Energiemenge  $W$ , die pro Zeit durch eine beliebige Fläche tritt, bezeichnet man als **Strahlungsleistung** oder **Strahlungsfluss** :

$$\Phi = \frac{dW}{dt} \quad [W]. \quad (2.1)$$

Der Fluss pro Einheitsfläche  $dA$  ergibt die Leistungsdichte bzw. **Strahlungsflussdichte**  $F$ :

$$F = \frac{d\Phi}{dA} \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right]. \quad (2.2)$$

Diese lässt sich unterscheiden zwischen der auf eine Oberfläche **eingestrahnten Flussdichte**, **Bestrahlungsstärke**  $E$  genannt:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right], \quad (2.3)$$

und der von einer Oberfläche **abgestrahlten Flussdichte**, als **spezifische Ausstrahlung** bezeichnet:

$$M = \frac{d\Phi}{dA} \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right]. \quad (2.4)$$

Im Rahmen dieser Arbeit wird meist der Begriff Strahlungsflussdichte ohne diese Unterscheidung verwendet.

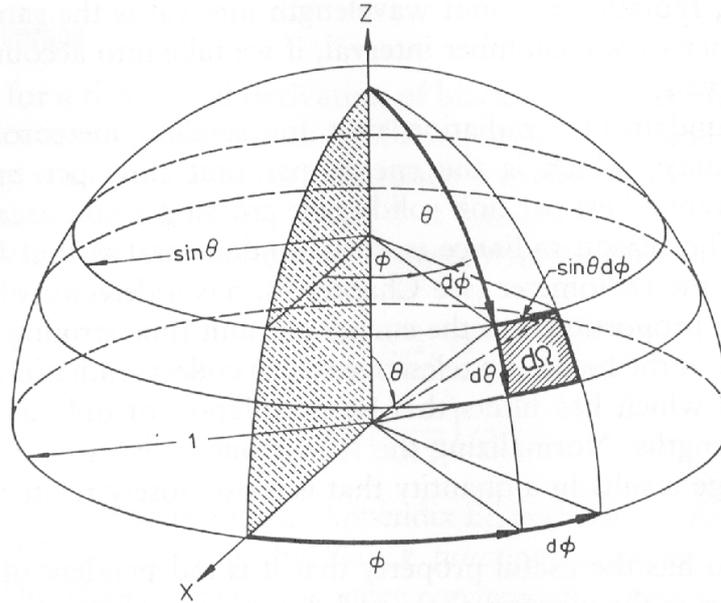


Abbildung 2.1: Definition der Geometrie, Raumrichtungen und des Raumwinkелеlementes  $d\Omega$ . Quelle: [KIDDER und VONDER HAAR 1995].

Strahlung ist richtungsabhängig. Die **Strahldichte**  $L$  ist die Energie, die pro Raumwinkel  $d\Omega = \sin(\theta)d\phi d\theta$  (siehe Abb. 2.1) und pro Zeiteinheit eine Einheitsfläche  $\cos(\theta)dA$  senkrecht zur Ausbreitungsrichtung durchströmt:

$$L = \frac{d^2\Phi}{\cos(\theta)dA d\Omega} \quad \left[ \frac{W}{m^2 sr} \right]. \quad (2.5)$$

Dabei wird  $\theta = 0$  meist in Richtung zum Zenit angenommen und  $\theta$  als **Zenitwinkel** bezeichnet. Häufig wird nicht  $\theta$  selbst sondern  $\mu = \cos(\theta)$  zur Beschreibung der Zenitwinkelabhängigkeit benutzt.  $\phi$  ist der **Azimut**.

Die Strahlungsflussdichte auf eine horizontale Fläche, deren Normale in Richtung  $\theta = 0$  zeigt, ist z.B. gegeben durch:

$$\begin{aligned} F &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L(\theta, \phi) \cos(\theta) d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L(\theta, \phi) \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^1 L(\mu, \phi) \mu d\mu d\phi. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Für eine richtungsunabhängige (*isotrope*) Strahlung ergibt sich:

$$F = L \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi = \pi L. \quad (2.7)$$

Die Strahldichte ist wellenlängenabhängig. Die **spektrale Strahldichte** ist mit:

$$L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda} \quad \left[ \frac{W}{m^3 sr} \right] \quad (2.8)$$

gegeben.

### 2.1.2 Strahlungsgesetze

Alle Körper mit einer Temperatur größer als 0K emittieren Strahlung. Ein **schwarzer Strahler** nimmt auftreffende elektromagnetische Strahlung vollständig auf (**Absorption**). Andererseits gibt er aufgrund seiner thermischen Energie (Temperatur) Strahlung einer bestimmten spektralen Verteilung ab (**Emission**). Er lässt weder Strahlung durch sich hindurch (**Transmission**), noch spiegelt (**Reflexion**) oder streut er sie zurück (**Diffusion, Streuung**).

Diese Eigenschaften gelten für einen idealen schwarzen Körper. In der Praxis hängt die Strahlung vom **Emissionsvermögen** ab. Das Emissionsvermögen  $\epsilon$  hängt von den Material- und Oberflächeneigenschaften ab und liegt zwischen  $0 < \epsilon < 1$ . Für einen idealen schwarzen Strahler ist  $\epsilon = 1$ . Planck fand heraus, dass dessen spektrale Strahlungsflussdichteverteilung  $M_\lambda$  eine eindeutige Funktion der Temperatur  $T$  [K] ist. Dieser Zusammenhang wird mit der **Planckschen Strahlungsformel** beschrieben:

$$M_\lambda(T)d\lambda = 2h\lambda^{-5}c^2 \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} d\lambda, \quad (2.9)$$

bzw. als Funktion von der Wellenzahl ausgedrückt:

$$M_\nu(T)d\nu = 2h\nu^3c^2 \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu. \quad (2.10)$$

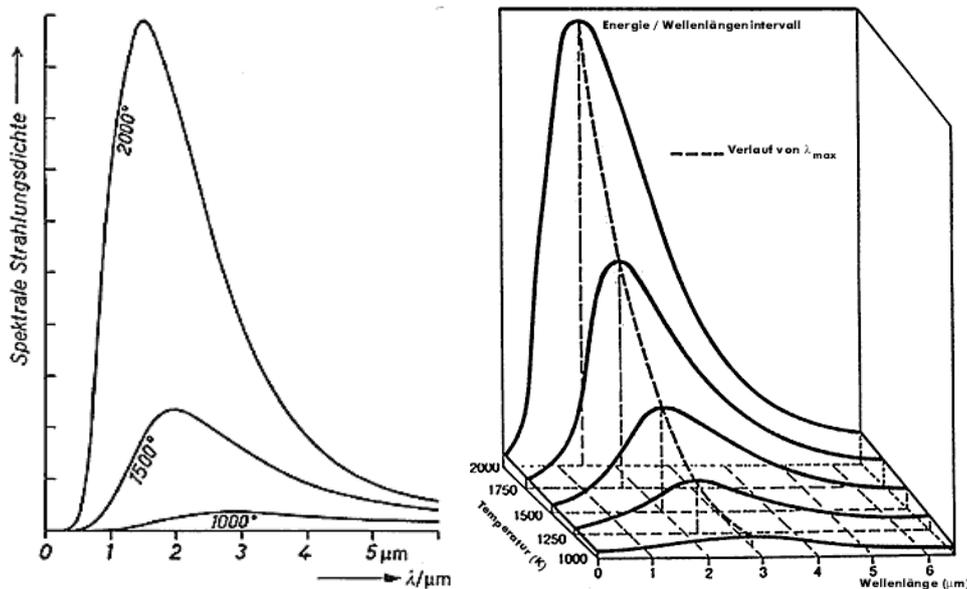


Abbildung 2.2: **Links:** Die spektrale Intensitätsverteilung der schwarzen Strahlung nach dem Planckschen Strahlungsgesetz. Quelle: [GERTHSEN und VOGEL 1993], S. 543. **Rechts:** Bei steigender Temperatur verschiebt sich das Maximum der abgestrahlten Energie zu kürzeren Wellenlängen hin (Wiensches Verschiebungsgesetz). Quelle: <http://www.geographie.rub.de/agklima/vorlesung/strahlung/gesetze.html>

Mit abnehmender Temperatur verschiebt sich das Maximum der spektralen Strahlungsflussdichteverteilung zu größeren Wellenlängen, wobei das Produkt aus der Wellenlänge des Maximums  $\lambda_{max}$  und der zugehörigen Temperatur  $T$  eine Konstante ist. Dieser Zusammenhang folgt aus der Differentiation der Planckfunktion und ist das **Wien'sches Verschiebungsgesetz**:

$$\lambda_{max}T = const. = 2897[\mu mK]. \quad (2.11)$$

Die Integration der Planckfunktion über alle Wellenlängen liefert die von einem schwarzen Strahler abgestrahlte bzw. absorbierte Strahlung als Funktion der Temperatur, das **Stefan Boltzmann Gesetz** :

$$M_s(T) = \int_0^\infty M_{s\lambda}d\lambda = \sigma T^4. \quad (2.12)$$

### 2.1.3 Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie

Die Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie erfolgt über Reflexion, Streuung, Emission und Absorption. Bei der Emission sendet ein angeregtes Teilchen ein Photon aus. Das Teilchen gibt dabei die Energie des Photons ab. Bei der Absorption wird ein Photon vernichtet. Seine Energie wird dabei in andere Energieformen, z.B. Wärme umgewandelt. Bei der elastischen Streuung, z.B. Rayleigh-Streuung wird die Energie des Photons vollständig wieder ausgestrahlt. Dabei kann die Ausbreitungsrichtung des Photons verändert werden. Die winkelabhängige Verteilung der Streuintensitäten wird durch die **Phasenfunktion**  $P(\vartheta)$  in Abhängigkeit vom Streuwinkel  $\vartheta$ , dem Winkel zwischen einfallendem und gestreutem Strahl beschrieben. Die Phasenfunktion für die Rayleigh-Streuung ist gegeben durch

$$P_{Ray}(\vartheta) = \frac{3}{4}(1 + \cos^2(\vartheta)). \quad (2.13)$$

Bei der inelastischen Streuung, z.B. Raman-Streuung wird die Energie teilweise umgewandelt. Im Fall von Streuung an Flächen spricht man meist von Reflexion.

Die Änderung der Strahldichte beim Durchgang durch eine Schicht mit der Dicke  $dz$  durch Absorption und Streuung lässt sich mit

$$dL = -\sigma n_0 L dz, \quad (2.14)$$

oder integriert mit dem Lambert'schen Gesetz:

$$L = L_0 e^{-\int \beta dz} \quad (2.15)$$

beschreiben. Dabei ist  $\sigma$  die Summe aus Absorptions- und Streuquerschnitt.  $n_0$  ist die Teilchendichte.  $\beta = \sigma n_0$  ist der Streu- und Absorptionskoeffizient und wird auch als **Extinktionskoeffizient**  $\beta_{ext}$  bezeichnet:

$$\beta_{ext} = \beta_{streu} + \beta_{abs}. \quad (2.16)$$

Den Anteil der Streuung an der Extinktion nennt man die **Einfachstreualbedo** (engl. single scattering albedo) :

$$\omega_0 = \frac{\beta_{streu}}{\beta_{ext}}. \quad (2.17)$$

Die Schwächung der Strahlung entlang eines Weges von  $S_1$  nach  $S_2$  wird oft mit der **dimensionslosen optischen Dicke** beschrieben:

$$\tau = \int_{S_1}^{S_2} \beta_{ext} dz. \quad (2.18)$$

Eingesetzt in 2.15 schreibt sich das Lambert'sche Gesetz dann:

$$L = L_0 e^{-\tau} \quad (2.19)$$

Die optische Dicke ist wie die meisten Strahlungsgrößen wellenlängenabhängig. In dieser Arbeit wird üblicherweise die optische Dicke bei  $0.55 \mu m$  angegeben. Die optische Dicke nimmt für andere Wellenlängen davon abweichende Werte an. Wenn das Teilchen klein gegenüber der Wellenlänge ist, gilt die Abhängigkeit des Streukoeffizienten für Rayleigh-Streuung:  $\beta_{Ray} \sim \frac{1}{\lambda^4}$ .

### 2.1.4 Wolkeneigenschaften

Wolken bestehen aus Wassertröpfchen und Eisteilchen. Streuung und Absorption hängen ab vom Wasser- bzw. Eisgehalt, Größenverteilung der Tröpfchen und effektiven Teilchenradius. Weitere Größen sind der Bedeckungsgrad, die Temperaturverteilung und die Phase der Wolken.

Der **Effektivradius**  $r_{\text{eff}}$  ist definiert als der mittlere Radius der Teilchenflächenhäufigkeit  $A(r) = \pi r^2 n(r)$

$$r_{\text{eff}} = \frac{\int_0^{\infty} r A(r) dr}{\int_0^{\infty} A(r) dr} = \frac{\int_0^{\infty} n(r) r^3 dr}{\int_0^{\infty} n(r) r^2 dr} \quad (2.20)$$

Zusammen mit dem **Flüssig-** bzw. **Eiswassergehalt** lassen sich die optischen Eigenschaften einer Wolke nach [HANSEN und TRAVIS 1974] damit beschreiben. Details der Größenverteilung, wie die genaue Form, spielen dabei eine untergeordnete Rolle. Die Streueigenschaften von Eisteilchen sind jedoch von der Form abhängig, die üblicherweise stark von der Kugelform abweicht (siehe z.B. [KEY et al. 2002]). Im Rahmen dieser Arbeit wurden hexagonale Eisteilchen angenommen.

Der Flüssigwassergehalt (*engl. Liquid Water Content LWC*) ist die Masse der Wassertröpfchen pro Volumen [ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ]

$$LWC = \frac{4}{3} \pi \rho_w \int_0^{\infty} r^3 n(r) dr, \quad (2.21)$$

wobei  $\rho_w$  die Dichte des Wassers ist. Die optische Dicke einer Wolkensäule ist gegeben durch:

$$\tau_\lambda = \int_0^h \int_0^{\infty} \xi(\lambda, r) n(r) dr dh' = \int_0^h \int_0^{\infty} Q(\lambda, r) \pi r^2 n(r) dr dh' \quad (2.22)$$

Hierbei ist  $n(r)$  die Häufigkeitsverteilung der Partikel mit Radius  $r$  und  $\xi(\lambda, r) = Q(\lambda, r) \pi r^2$  der Extinktionsquerschnitt [ $\text{m}^2$ ]. Integriert wird über alle Partikelgrößen und entlang der Vertikalen.

Die Extinktionseffizienz  $Q(\lambda, r)$  wird mittels Streutheorien, z.B. Mie-Theorie, für sphärische Partikel bestimmt. Für Teilchen die groß sind im Vergleich zur Wellenlänge  $r_{\text{eff}} \gg \lambda$ , gilt näherungsweise  $Q \approx 2$ . Eingesetzt folgt

$$\tau_\lambda \approx 2\pi \int_0^h \int_0^{\infty} r^2 n(r) dr dh'. \quad (2.23)$$

Damit folgt der Zusammenhang zwischen Flüssigwassergehalt  $LWC$  und optischer Dicke  $\tau$

$$\tau_\lambda \approx \frac{3}{2} \frac{1}{\rho_w} \int_0^h \frac{LWC(h')}{r_{\text{eff}}(h')} dh', \quad (2.24)$$

und dem Volumenextinktionskoeffizient  $\beta_{\text{ext}} = \frac{d\tau}{dh}$  [ $\text{m}^{-1}$ ]:

$$\beta_{\text{ext}} \approx \frac{3}{2} \frac{LWC}{\rho_w r_{\text{eff}}}. \quad (2.25)$$

Der **Flüssigwasserpfad**  $LWP$  ist der vertikal integrierte Flüssigwassergehalt. Damit folgt

$$\tau_\lambda \approx \frac{3}{2} \frac{LWP}{\rho_w r_{\text{eff}}} \quad (2.26)$$

eine approximative Beziehung zur Abschätzung der optischen Dicke für sichtbare und nahe infrarote Strahlung ([STEPHENS 1994], S. 219). Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Streukoeffizienten und die Beziehungen zwischen der optischen Dicke und dem Flüssigwasserpfad für Wasserwolken mit Hilfe der Mie-Theorie ([MIE 1908], [VORTISCH 2002]) mit dem Strahlungstransferpakets **libRadtran** berechnet ([MAYER und KYLLING 2005]).

Zur Bestimmung der Streukoeffizienten für Eis-Teilchen werden die in libRadtran implementierten Parametrisierungen von Ping Yang und Fu verwendet (siehe [KEY et al. 2002], [FU 1996], [FU et al. 1998]). Der Zusammenhang zwischen Eiswassergehalt und optischer Dicke wird für Eisteilchen mittels libRadtran, basierend auf den Parametrisierungen von [KEY et al. 2002] bestimmt. Danach ist

$$\frac{\beta_{\text{ext}}}{LWC} = \sum_{n=0}^3 a_n \frac{1}{r_{\text{eff}}^n} \quad (2.27)$$

mit  $a_n$  als Fitkoeffizienten einer nichtlinearen Regression. Damit folgt der Zusammenhang

$$\tau = \Delta z IWC \sum_{n=0}^3 a_n \frac{1}{r_{\text{eff}}^n}. \quad (2.28)$$

### 2.1.5 Strahlungstransportgleichung

Der Transport der elektromagnetischen Strahlung durch ein Volumenelement wird mit der **Strahlungstransportgleichung** bzw. **Strahlungsübertragungsgleichung** beschrieben ([CHANDRASEKHAR 1950]). Die Strahldichte wird durch Absorption und Streuung vermindert (Extinktion), andererseits durch Streuung und thermische Emission in den Strahlengang erhöht.

$$\frac{1}{\beta_{\text{ext}}} \frac{dL_{\lambda}(\theta, \Phi)}{ds} = -L_{\lambda}(\theta', \Phi') + \frac{\omega_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} P_{\lambda}(\theta', \Phi', \theta, \Phi) L(\theta', \Phi') \sin(\theta') d\theta' d\Phi' + (1 - \omega_0) B_{\lambda}(T) \quad (2.29)$$

Der erste Term der rechten Gleichungsseite beschreibt dabei die Verringerung der Strahlung nach dem Lambert-Beer'schen Gesetz. Der zweite Term beschreibt die Streuung in den Strahlengang und der dritte Term die Emission in den Strahlengang.  $B_{\lambda}(T)$  ist die Emission eines schwarzen Strahlers mit der Temperatur der Atmosphärenschicht. Das Emissionsvermögen ist dabei  $\beta_{\text{ext}}(1 - \omega_0) = \beta_{\text{abs}}$ .  $\theta', \Phi'$  und  $\theta, \Phi$  kennzeichnen die Richtung der gestreuten Photonen vor bzw. nach der Streuung.  $P(\theta', \Phi', \theta, \Phi)$  ist die Phasenfunktion. Für nichtorientierte Teilchen gilt  $P(\vartheta) = P(\theta', \Phi', \theta, \Phi)$ . Für die Gleichung 2.29 gibt es mit Ausnahmen von Spezialfällen nur numerische Lösungsverfahren (siehe z.B. [CHANDRASEKHAR 1950], [THOMAS und STAMNES 1999]). Diese Verfahren sind in zahlreichen Programmen implementiert (<http://atol.ucsd.edu/~pflatau/rtelib/>). Im Rahmen dieser Arbeit wird das Strahlungstransferpaket **libRadtran** verwendet ([MAYER und KYLLING 2005]).

### 2.1.6 Strahlungsbilanz und Treibhauseffekt

Die von der Sonne emittierte Strahlung kann auf der Erde in guter Näherung als parallel einfallend angenommen werden und wird als **direkte Strahlung** bezeichnet. Die von Luftmolekülen, Aerosolen, Wolken und am Erdboden gestreute Strahlung und reflektierte Strahlung wird als **diffuse Strahlung** bezeichnet. Die nach unten zur Erde gerichtete Strahlung wird positiv definiert (dem System Erde-Atmosphäre zugeführt), die nach oben in den Weltraum gerichtete Strahlung negativ (dem System Erde-Atmosphäre entzogen).<sup>1</sup> Die Differenz wird als **Nettostrahlungsflussdichte**

$$F_{\text{Netto}} = F_{\downarrow} - F_{\uparrow} \quad (2.30)$$

bezeichnet und beschreibt die Bilanz zwischen einfallender und ausgehender Strahlungsflussdichte.

Es ist häufig sinnvoll zwischen der langwelligen thermischen und der kurzwelligen solaren Strahlung zu unterscheiden. In Abb. 2.3 sind die normalisierten Verteilungen der solaren und terrestrischen Strahlung aufgetragen.

Die langfristige Bilanz zwischen einfallender solarer und abgestrahlter thermischer Strahlung bestimmt das Klimasystem der Erde. Die vertikale Verteilung der Strahlungsbilanz verursacht u.a. den Schichtaufbau der Atmosphäre. Die horizontale Verteilung hat wesentlichen Einfluss auf das globale Temperatur- und Feuchtefeld und damit die verschiedenen Klimate der Erde (siehe [BAKAN und RASCHKE 2002]). Strahlungsvorgänge in der Atmosphäre führen zu der in Abb. 2.4 dargestellten global und über das Jahr gemittelten Strahlungsbilanz der Erde.

<sup>1</sup>Im Rahmen dieser Arbeit wird in Kap. 5 die Veränderung der ausgehenden langwelligen und kurzwelligen Strahlung am Oberrand der Atmosphäre in Abhängigkeit vom Flugverkehr diskutiert. Dabei wird die ausgehende Strahlungsflussdichte einfachheitshalber positiv gezählt.

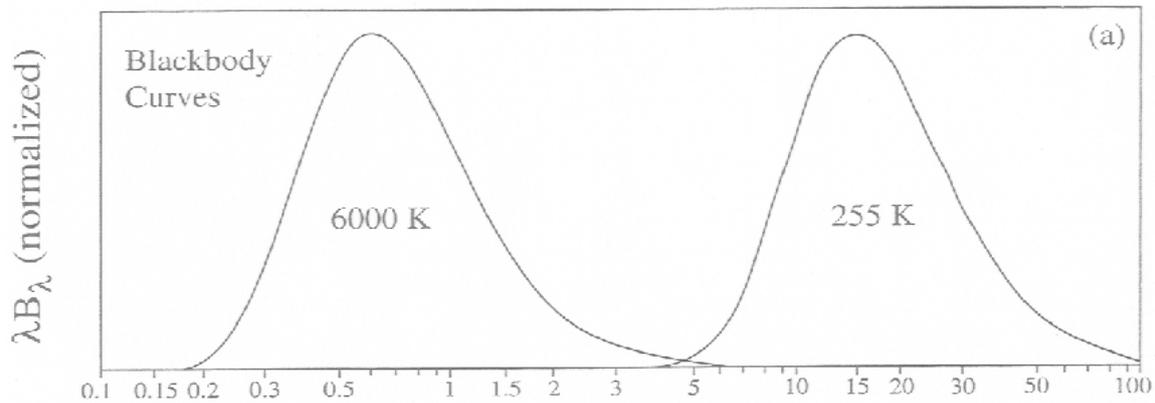


Abbildung 2.3: Normalisierte Schwarzkörperkurven für die solare und terrestrische Strahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge  $\lambda[\mu\text{m}]$ . Quelle: [TJEMKES und SCHMETZ 1998].

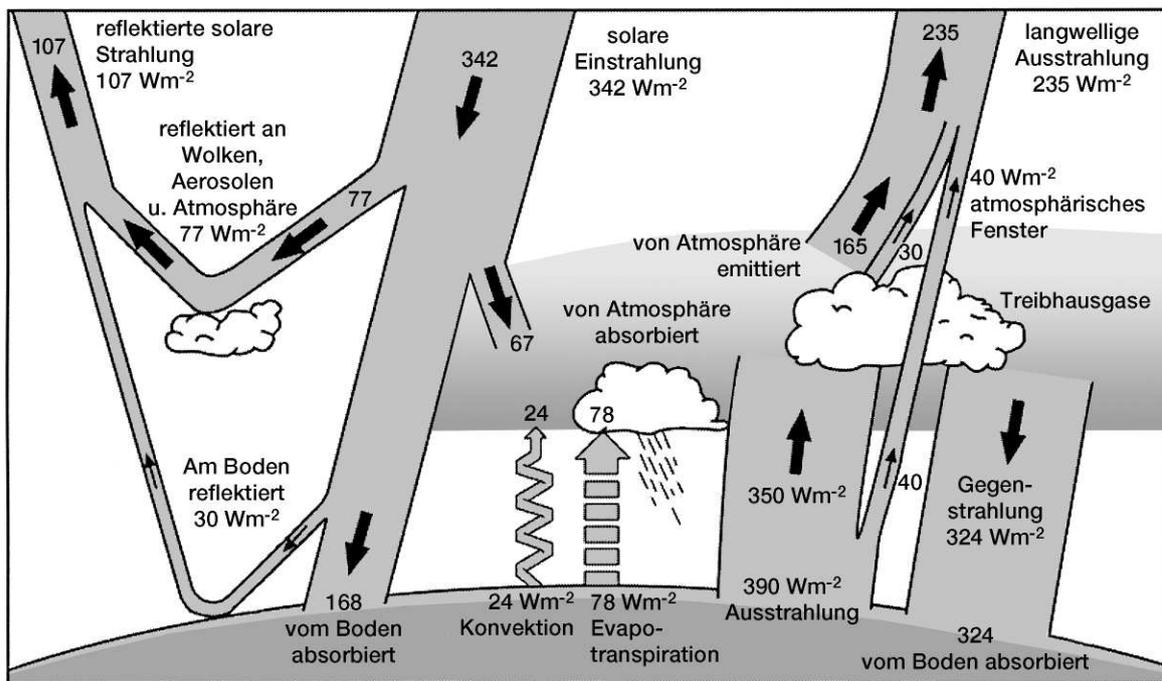


Abbildung 2.4: Global und über das Jahr gemittelte Energiebilanz der Erde. Quelle: [BAKAN und RASCHKE 2002].

Nach [BAKAN und RASCHKE 2002] und [KIEHL und TRENBERTH 1997] beträgt die global über das Jahr gemittelte einfallende Sonnenenergie  $342 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ . Zu 31% wird sie von der Atmosphäre und vom Erdboden zurückreflektiert. 20% wird von der Atmosphäre und 49% vom Erdboden absorbiert. Die ausgehende langwellige Strahlung muss zum Ausgleich der Strahlungsenergiebilanz demnach  $235 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  betragen. Dies entspricht einer effektiven Strahlungstemperatur von etwa  $-19^\circ\text{C}$ . Die mittlere Temperatur in Bodennähe beträgt aber  $14^\circ\text{C}$ . Die Ursachen hierfür sind die Absorption der atmosphärischen Spurengase und die die Emission der langwelligigen Strahlung von der Atmosphäre zurück zum Boden. Die wichtigsten Spurengase sind Wasserdampf,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  und  $\text{CH}_4$ . Durch die zusätzliche Einstrahlung wird die Bodentemperatur erhöht. Dies ist der **natürliche Treibhauseffekt**. Auch Aerosole und vor allem Wolken haben wesentlichen Einfluss auf die globale Strahlungsbilanz (siehe Abb. 2.4).

Die durch den Menschen verursachte Veränderung der Konzentration der Treibhausgase (siehe [IPCC 2001]) führt zur einer weiteren Erhöhung der Temperatur des Erdbodens und der unteren

Atmosphäre. Diese Änderung gegenüber dem natürlichen Treibhauseffekt wird als **anthropogener Treibhauseffekt** bezeichnet.

### 2.1.7 Strahlungsantrieb

Im Rahmen dieser Arbeit wird der durch den Flugverkehr induzierte erhöhte Bedeckungsgrad von hohen Eiswolken betrachtet. Dieser führt zu einer Veränderung der Strahlungsbilanz. Der **Strahlungsantrieb** ([IPCC 2001]) ist die Veränderung in der vertikalen Nettostrahlungsflussdichte  $\Delta F_{Netto}$ . Er ist ein Maß für den Einfluss, den ein einzelner Faktor auf die Veränderung des Strahlungshaushalts der Atmosphäre hat und wird in  $[\frac{W}{m^2}]$  gemessen. Ein positiver Strahlungsantrieb, z.B. hervorgerufen durch die zunehmende Konzentration langlebiger Treibhausgase, führt zu einer Erwärmung, ein negativer Strahlungsantrieb, z.B. durch die Zunahme von Aerosolen in der Atmosphäre, zu einer Abkühlung der Troposphäre.

Der Strahlungsantrieb wird in dieser Arbeit für den Oberrand der Atmosphäre und damit für das Gesamtsystem Erde-Atmosphäre angegeben. Im IPCC Bericht ist der Strahlungsantrieb als die Veränderung in der vertikalen Nettoeinstrahlung an der Tropopause aufgrund einer internen Veränderung oder einer Veränderung im externen Antrieb des Klimasystem definiert. Der **stratosphären-adjustierte Strahlungsantrieb** (siehe z.B. [MARQUART 2003]) wird nach Angleichung der stratosphärischen Temperaturen an das Strahlungsgleichgewicht berechnet, während alle troposphärischen Eigenschaften auf ihren ungestörten Werten konstant gehalten werden. Der **instantane Strahlungsantrieb** stellt das durch die strahlungsaktive Substanz hervorgerufene Ungleichgewicht in der Strahlungsbilanz in einem bestimmten Niveau (Tropopause oder Oberrand der Atmosphäre) dar. Man kann auch den Wert am Erdboden angeben.

Die in dieser Arbeit verwendete Definition bezieht sich auf den Wert am **Oberrand der Atmosphäre** und ist der **instantane Strahlungsantrieb**. D.h. der Strahlungsantrieb ist die Änderung der Nettostrahlungsflussdichte  $\Delta F_{Netto}$  (bzw. vereinfacht  $\Delta F$ ). Der Strahlungsantrieb hoher Eiswolken ist damit:

$$\Delta F_{Netto, Zir.} = F_{Netto, mit Zir.} - F_{Netto, ohne Zir.} \quad (2.31)$$

Zusätzlich lässt sich der langwellige ( $\Delta F_{LW, Zir.}$ ) und der kurzwellige ( $\Delta F_{SW, Zir.}$ ) Strahlungsantrieb unterscheiden.

$$\begin{aligned} \Delta F_{LW, Zir.} &= F_{LW, mit Zir.} - F_{LW, ohne Zir.} \\ \Delta F_{SW, Zir.} &= F_{SW, mit Zir.} - F_{SW, ohne Zir.} \end{aligned} \quad (2.32)$$

Der Strahlungsantrieb der hohen Eiswolken ist die Summe des langwelligigen und kurzwelligigen Strahlungsantriebs.

$$\Delta F_{Zir.} = \Delta F_{LW, Zir.} + \Delta F_{SW, Zir.} \quad (2.33)$$

Ebenso lässt sich der Strahlungsantrieb des Flugverkehrs definieren

$$\begin{aligned} \Delta F_{LW, Flugv.} &= F_{LW, mit Flugv.} - F_{LW, ohne Flugv.} \\ \Delta F_{SW, Flugv.} &= F_{SW, mit Flugv.} - F_{SW, ohne Flugv.} \end{aligned} \quad (2.34)$$

Der Strahlungsantrieb des Flugverkehrs ist die Summe des langwelligigen ( $\Delta F_{LW, Flugv.}$ ) und kurzwelligigen ( $\Delta F_{SW, Flugv.}$ ) Strahlungsantriebs.

$$\Delta F_{Flugv.} = \Delta F_{LW, Flugv.} + \Delta F_{SW, Flugv.} \quad (2.35)$$

Ist die einfallende Strahlungsflussdichte konstant, kann aus der Änderung der nach oben gerichteten ausgehenden Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre, der Strahlungsantrieb des Flugverkehrs bestimmt werden. Im Rahmen dieser Arbeit ist der **Strahlungsantrieb des Flugverkehrs**

definiert als Differenz der ausgehenden Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre mit Flugverkehr und ohne Flugverkehr.

$$\Delta F_{Flugv.}^{\uparrow} = F_{mit\ Flugv.}^{\uparrow} - F_{ohne\ Flugv.}^{\uparrow} \quad (2.36)$$

Getrennt nach langwelliger und kurzwelliger Strahlung ergibt sich:

$$\begin{aligned} \Delta F_{LW, Flugv.}^{\uparrow} &= F_{LW, mit\ Flugv.}^{\uparrow} - F_{LW, ohne\ Flugv.}^{\uparrow} \\ \Delta F_{SW, Flugv.}^{\uparrow} &= F_{SW, mit\ Flugv.}^{\uparrow} - F_{SW, ohne\ Flugv.}^{\uparrow} \end{aligned} \quad (2.37)$$

$F_{LW, mit\ Flugv.}^{\uparrow}$  ist der langwellige Anteil der nach oben gerichteten Strahlung am Oberrand der Atmosphäre mit Flugverkehr,  $F_{LW, ohne\ Flugv.}^{\uparrow}$  ist der langwellige Anteil ohne Flugverkehr.  $F_{SW, mit\ Flugv.}^{\uparrow}$  ist der kurzwellige Anteil mit Flugverkehr und  $F_{SW, ohne\ Flugv.}^{\uparrow}$  ohne Flugverkehr.

Die Verringerung des ausgehenden langwelligen Strahlungsflusses am Oberrand der Atmosphäre bewirkt eine Erwärmung der Atmosphäre, die Erhöhung der kurzwelligen reflektierten Strahlung eine Abkühlung.

Verringert sich die Summe des kurzwelligen und langwelligen ausgehenden Strahlungsflusses in Abhängigkeit vom Flugverkehr, bewirkt dieser eine Erwärmung der Atmosphäre. Erhöht sich die Summe des kurzwelligen und langwelligen ausgehenden Strahlungsflusses in Abhängigkeit vom Flugverkehr, kühlt der Flugverkehr.

## 2.2 Meteosat-8 (Meteosat Second Generation, MSG)

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurden Erdbeobachtungsdaten benötigt, die das Untersuchungsgebiet Europa und Nordatlantik umfassen. Da der Flugverkehr zeitlich und räumlich sehr variabel ist, wurden diese Daten in einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung benötigt. Der Flugverkehr wirkt bei unterschiedlichen atmosphärischen Bedingungen, die sich im Laufe eines Jahres verändern, unterschiedlich auf den Bedeckungsgrad und den Strahlungshaushalt. Aus diesem Grund wurden die Daten für den Zeitraum eines Jahres benötigt. Ein System dessen Instrumente alle diese Anforderungen erfüllen, ist der geostationäre europäische Wettersatellit **Meteosat Second Generation 1 (MSG-1)**.

MSG-1 ist der erste von drei geostationären europäischen Wettersatelliten, der als Nachfolger der Meteosat 1-7 Reihe im August 2002 gestartet wurde. MSG-1 wurde von der **Europäischen Weltraumorganisation (ESA)** (<http://www.esa.int>) im Auftrag von **EUMETSAT**, der Europäischen Organisation für die Nutzung meteorologischer Satelliten (<http://www.eumetsat.int>), entwickelt und von der Firma Alcatel Space Industries unter Mitwirkung eines aus über 50 europäischen Unternehmen bestehenden Konsortiums gebaut. Basierend auf diesen Satelliten soll das MSG Programm mindestens 12 Jahre operationelle Dienste anbieten.

MSG-1 ist seit Januar 2004 im operationellen Betrieb. Seit dieser Zeit wird der MSG-1 als **METEOSAT-8** bezeichnet.



Abbildung 2.5: Meteosat-8 bzw. Meteosat Second Generation 1 (MSG-1). Quelle: <http://www.zdf.de>

Die MSG-Satelliten stabilisieren ihre Lage mit Hilfe ihrer eigenen Drehbewegung. Sie drehen sich 100mal pro Minute entgegen dem Uhrzeigersinn um ihre Längsachse, die parallel zur Erdachse ausgerichtet ist.

Die Instrumentierung der MSG-Satelliten umfasst folgende Geräte:

- **Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI)**  
SEVIRI ist ein abbildendes Radiometer und der wichtigste Sensor an Bord des MSG. Er erlaubt eine Bildwiederholrate von 15 min.
- **Geostationary Earth Radiation Budget (GERB)**  
GERB ist ein Instrument zur Beobachtung des Strahlungshaushalts der Erde am Oberrand der Atmosphäre
- **Mission Communication Payload (MCP)**  
MCP umfasst alle für die Kommunikationszwecke der Mission wesentlichen Antennen und Transponder
- **Search and Rescue transponder (S&R)**  
S&R ist ein Gerät zum Empfang von Notsignalen (Transponder) aus dem gesamten Beobachtungsbereich von MSG, ausgesandt von See-, Luft- und Landfahrzeugen, die mit einer Bake des internationalen Such- und Rettungssystems COSPAS-SARSAT ausgerüstet sind.

Die Position des MSG-1 ist  $3.4^{\circ}W, 0^{\circ}N$ . Die Daten werden vor der Versendung an die Nutzer auf eine Satellitenposition  $0^{\circ}W, 0^{\circ}N$  von EUMETSAT umprojiziert.

Bedingt durch den Ausfall eines Verstärkers an Bord von MSG-1 werden die Daten anstelle des vorgesehenen direkten Versands an High Resolution User Stations (HRUS) über das **EUMETSAT Multicast Distribution System, EUMETCast**, zur Verfügung gestellt. Dies hat den Vorteil, dass die Daten mit handelsüblichen Anlagen zum Empfang von Satellitenfernsehen empfangen werden können. Der Datenversand erfolgt mit Hilfe des **Hotbird-6** Satelliten. Das Signal kann im Ku- und C-Band empfangen werden. Um den Empfang aller Daten zu gewährleisten wurden am DLR zwei komplementäre Empfangsstationen aufgebaut. Bei einem Ausfall beider Systeme können archivierte Daten über das **Eumetsat Online Archive** bestellt werden:

<http://archive.eumetsat.org>

Es werden meteorologische Daten und Level 1.5 Rohdaten empfangen. Das empfangene Rohdatenformat ist **High Rate Information Transmission (HRIT)** (siehe [EUMETSAT 2005a], [EUMETSAT 2005b]). Die HRIT komprimierten und kodierte Daten können mit Hilfe einer im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Konvertierungsroutine **xrit2bin** in Binärdaten umgewandelt werden.

### 2.2.1 Spinning Enhanced Visible and Infra-Red Imager, SEVIRI

Das für diese Arbeit wichtigste Instrument an Bord von MSG-1 ist der abbildende Radiometer: **Spinning Enhanced Visible and Infra-Red Imager (SEVIRI)**. Das Instrument wurde von EADS Astrium entwickelt und gebaut. Die Arbeitsweise von SEVIRI wird in diesem Abschnitt kurz erläutert und die Spektralkanäle aufgelistet.

Das Instrument dreht sich, wie der MSG-Satellit, mit 100 Umdrehungen pro Minute gegen den Uhrzeigersinn. Während jeder Umdrehung trifft die Strahlung der Erde durch eine  $50\text{cm} \times 80\text{cm}$  große Öffnung auf ein Spiegelteleskop und wird auf 12 Spektralkanäle verteilt (siehe Abb. 2.6).

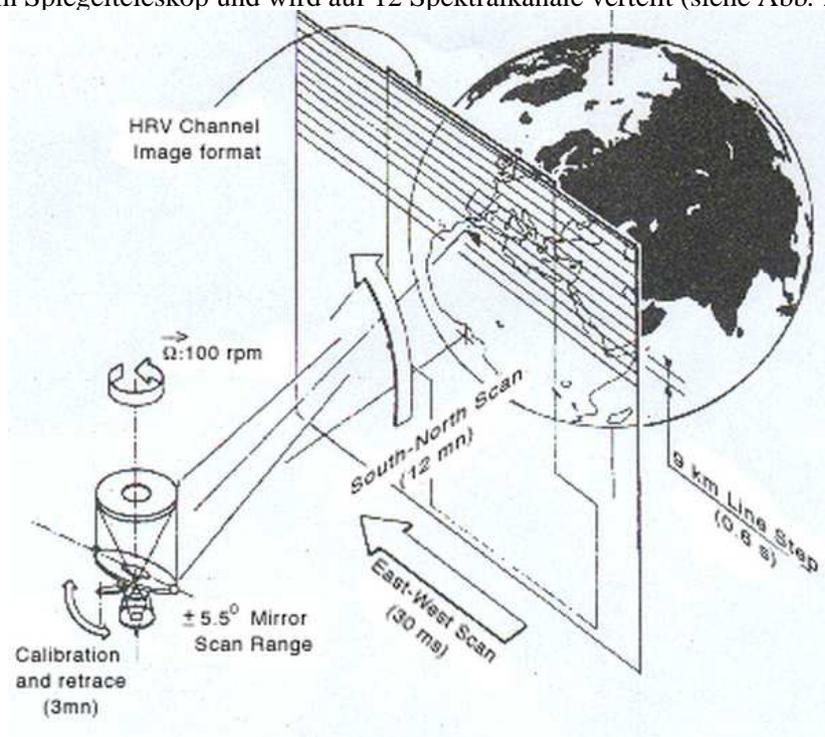


Abbildung 2.6: SEVIRI scan. Quelle: [EUMETSAT 2005a]

Der Abtastvorgang erfolgt von Süden nach Norden und aufgrund der Drehung des Satelliten von Ost nach West. Bei jeder Umdrehung werden 3 Linien der niedrig auflösenden Kanäle ( $3\text{km} \times 3\text{km}$ ),

der sogenannten **Low-Resolution (LR)** Kanäle, und 9 Linien des hochauflösenden Kanals des **High Resolution Visible (HRV)** ( $1\text{km} \times 1\text{km}$ ) aufgezeichnet. Die nominale Wiederholungsrate beträgt 15 Minuten. Der Abtastvorgang dauert 12 Minuten. Drei Minuten werden für die Rekalibrierung, Rückpositionierung des Spiegels und für die Stabilisierung benötigt.

Die Messwerte werden mit einer Auflösung von 10 bit digitalisiert und können mit den von EUMETSAT berechneten Kalibrationskoeffizienten wieder in Strahldichten umgerechnet werden. Die Größe der LR-Kanal Bilder ist  $3712 \times 3712$  Bildelemente. In Abb. 2.7 rechts ist das erste empfangene Bild des Kanal VIS 0.6 dargestellt.

Der HRV-Kanal hat die Größe  $5568 \times 11136$ . Es wird die gesamte Erdscheibe hochaufgelöst abgetastet. Aus Speicherplatzgründen wird nur ein Teil weiterversandt. Dieser besteht aus zwei Teilbildern, deren Grenzen in Ost-West- als auch in Süd-Nord-Richtung verschoben werden können (siehe Abb. 2.7, links). Die jeweiligen Parameter werden von EUMETSAT festgelegt.

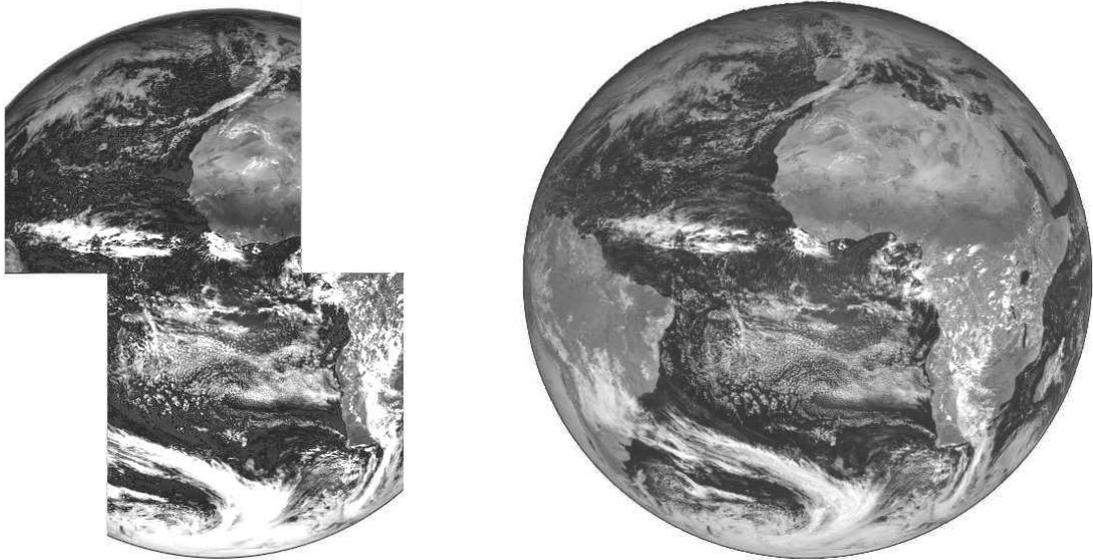


Abbildung 2.7: **Links:** 1. SEVIRI HRV-Kanal Bild vom 28. November 2002. **Rechts:** 1. SEVIRI VIS 0.6 Kanal Bild vom 28. November 2002. Quelle: <http://www.eumetsat.int>

Die HRIT Daten werden für die LR-Kanäle in 8 und im Falle des HRV-Kanals in 24 Segmente unterteilt übertragen. Da die Datenmenge sehr umfangreich ist, und die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit sich auf Europa und den Nordatlantik konzentrieren, wurden nur die nördlichen 3 Segmente (LR) bzw. 9 Segmente (HRV) am IPA für das Jahr 2004 (außer Januar) archiviert. In Abb. 2.8 sind die 3 nördlichen SEVIRI Segmente als Falschfarbenbild dargestellt.

UTC 2004/03/03 14:30



Abbildung 2.8: Falschfarbenbild aus den drei nördlichen SEVIRI Segmenten.

Neben der hohen zeitlichen Auflösung bietet die große Anzahl der Kanäle des MSG SEVIRI neue Möglichkeiten. SEVIRI verfügt über drei solare Kanäle: VIS006, VIS008 und IR\_016. IR\_039 Kanal ist sowohl im thermischen als auch im solaren Spektralbereich. Sieben Kanäle sind im thermischen Spektralbereich: WV\_062, WV\_073, IR\_087, IR\_097, IR\_108, IR\_120 und IR\_134. Die Auswahl der Kanäle basiert auf den Erfahrungen mit anderen Satelliten wie AVHRR, Meteosat GOES u.a.. SEVIRI kombiniert die Vorteile früherer Instrumente und bietet damit neue Möglichkeiten.

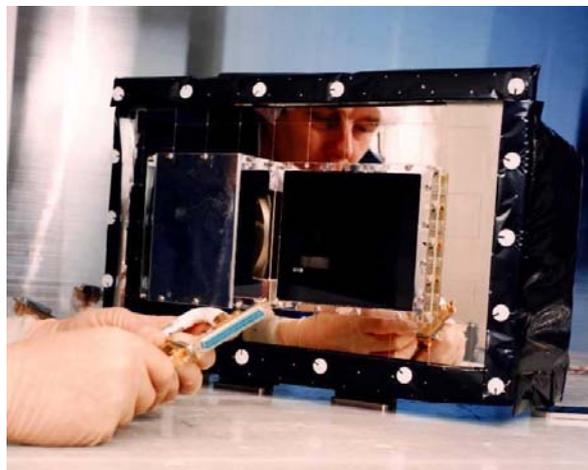
*Tabelle 2.1:* Alle SEVIRI Kanäle: Zentrale Wellenlänge, Spektralband, Auflösung und vergleichbare Kanäle auf anderen Satelliten. Quelle: [SCHMETZ et al. 2002]

Kanal	Zentrale Wellenlänge in $\mu m$	Spektralband in $\mu m$	Auflösung am Subsatellitenpunkt	Ähnlichkeit mit
VIS006	0.635	0.56 - 0.71	$3km \times 3km$	AVHRR
VIS008	0.81	0.74 - 0.88	$3km \times 3km$	AVHRR
IR_016	1.64	1.50 - 1.78	$3km \times 3km$	AVHRR
IR_039	3.92	3.48 - 4.36	$3km \times 3km$	AVHRR
WV_062	6.25	5.35 - 7.15	$3km \times 3km$	WV Meteosat
WV_073	7.35	6.85 - 7.85	$3km \times 3km$	WV Meteosat
IR_087	8.70	8.30 - 9.10	$3km \times 3km$	Neu
IR_097	9.66	9.38 - 9.94	$3km \times 3km$	Ozon HIRS
IR_108	10.8	9.80 - 11.80	$3km \times 3km$	AVHRR
IR_120	12.0	11.00 - 13.00	$3km \times 3km$	AVHRR
IR_134	13.40	12.40 - 14.40	$3km \times 3km$	CO <sub>2</sub> GOES-VAS sounder
HRV		0.4 - 1.1	$1km \times 1km$	Meteosat VIS

Die große Anzahl der infraroten Kanäle erlaubt eine Beobachtung der Erde bei Tag und Nacht. Dies ist für die Untersuchung des Einflusses des Flugverkehrs auf einen erhöhten Bedeckungsgrad sehr wichtig. Im Rahmen dieser Arbeit werden die spezifischen Eigenschaften einiger Kanäle in Hinblick auf Erkennung von Eiswolken diskutiert und vorgestellt.

### 2.2.2 Geostationary Earth Radiation Budget Experiment, GERB

Ein weiteres Erdbeobachtungsinstrument an Bord von MSG ist das **Geostationary Earth Radiation Budget Experiment (GERB)** Instrument. Im Rahmen dieser Arbeit waren noch keine GERB-Daten verfügbar. Für weiterführende Arbeiten kann dieses Instrument jedoch verwendet werden und wird daher kurz vorgestellt.



*Abbildung 2.9:* Geostationary Earth Radiation Budget Experiment (GERB). Quelle: <http://www.ssd.rl.ac.uk/gerb/photos.htm>

Geostationary Earth Radiation Budget Experiment (GERB) ist ein abbildender Radiometer. GERB hat zwei Breitbandkanäle. Ein Kanal ist im solaren Spektrum von 0.32 bis 4.0  $\mu\text{m}$ . Der andere Kanal deckt einen breiteren Teil des elektromagnetischen Spektrums ab (0.32 bis 30  $\mu\text{m}$ ). Aus der Differenz der beiden Kanälen wird die thermische Strahlung berechnet, die die Erde im Bereich zwischen 4.0 und 30  $\mu\text{m}$  aussendet. Die Daten werden an Bord des Satelliten kalibriert und dienen der Berechnung der reflektierten Sonnenstrahlung und der emittierten Wärmestrahlung am Oberrand der Atmosphäre.

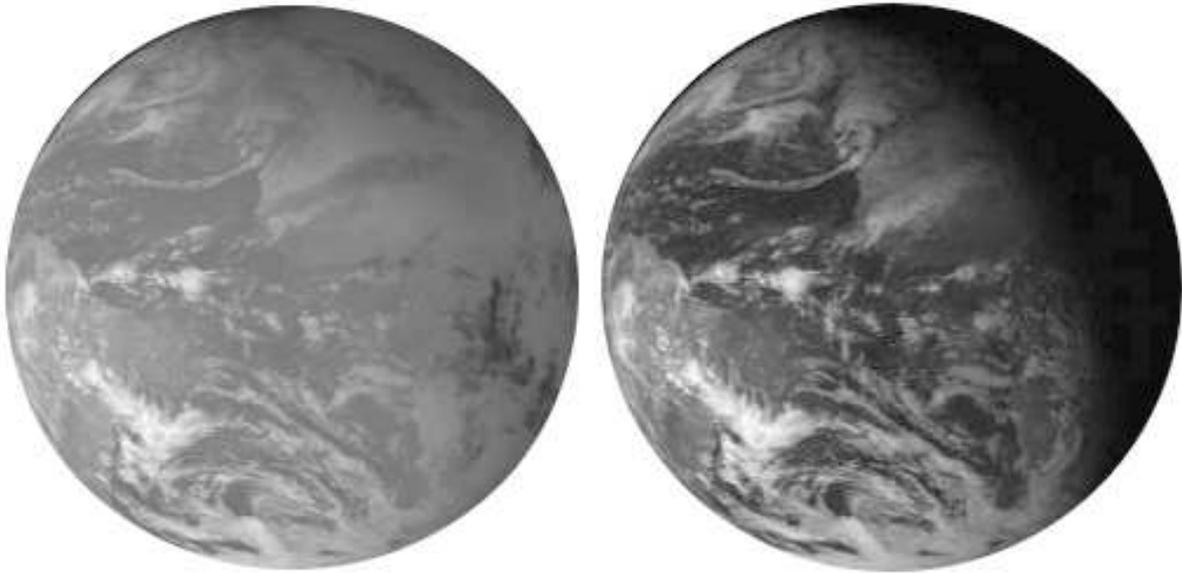


Abbildung 2.10: **Links:** 1. GERB-Gesamtspektrumbild vom 12. Dezember 2002. **Rechts:** 1. GERB-Solarspektrumbild vom 12. Dezember 2002. Quelle: <http://www.eumetsat.int>

Das Konsortium für die Entwicklung und den Betrieb des GERB Systems besteht aus folgenden Partnern: Rutherford Appleton Laboratory (RAL), UK; Imperial College of Science, Technology and Medicine (ICSTM), UK; Hadley Centre, UK; Leicester University, UK; RMI, Belgium; Advanced Mechanical and Optical Systems Ltd (AMOS Ltd), Belgium; und dem Officine Galileo, Italy.

Bei der Entwicklung des GERB Konzepts spielte das Royal Meteorological Institute of Belgium (RMI) eine wesentliche Rolle. Darüberhinaus stellt Belgien die Hälfte der gesamten Infrastruktur und Dienstleistungen am Boden (siehe <http://gerb.oma.be/gerb/>).

Die GERB Daten werden vom EUMETSAT Bodensegment empfangen und an die entsprechende GERB-Bodenstation zur Datenverarbeitung weitergeleitet. Die Daten und Produkte werden durch RAL an Zentren in ganz Europa übermittelt, wo sie zur Auswertung und Verbesserung von Modellen zur Klimabeobachtungen und zur numerischen Wettervorhersage eingesetzt werden.

Die Breitbandkanäle von GERB erstrecken sich über die zwölf viel engeren Kanäle von SEVIRI. Mit GERB lassen sich die Lücken des SEVIRI-Geräts im thermischen Strahlungsspektrum schließen. Allerdings misst GERB die thermische Strahlung in viel größerer räumlicher Auflösung (50km  $\times$  50km). Mit Hilfe von SEVIRI-Daten lässt sich die räumliche Auflösung der GERB-Bilder verbessern. Die zeitliche Auflösung beträgt 5 min. Weitere Informationen bietet die Internetseite <http://www.ssd.rl.ac.uk/gerb/>.

Die aus den GERB-Daten berechneten Strahlungsflüsse ließen sich mit den im Rahmen dieser Arbeit berechneten solaren und thermischen Strahlungsflüssen vergleichen. Die Daten stehen jedoch aufgrund von Kalibrationsproblemen zum derzeitigen Zeitpunkt nicht zur Verfügung. Für zukünftige Arbeiten bieten sie eine interessante Quelle, um die Klimawirksamkeit des Flugverkehrs und anderer anthropogener und natürlicher Einflüsse zu untersuchen.

## 2.3 SEVIRI Messgrößen

In diesem Abschnitt werden die in dieser Arbeit verwendeten abgeleiteten Messgrößen, äquivalente Helligkeitstemperatur und bidirektionale Reflektivität, veranschaulicht und ihre Berechnung aus den Messwerten dargestellt. Weiter werden die wichtigsten atmosphärischen Spurengase vorgestellt und ihr Einfluss auf die Messwerte der SEVIRI Kanäle diskutiert.

### 2.3.1 Umwandlung der gemessenen Strahldichte in äquivalente Helligkeitstemperatur

Die gemessene Strahldichte der thermischen Kanäle lässt sich als Funktion der äquivalenten Helligkeitstemperatur ausdrücken. Die **äquivalente Helligkeitstemperatur**  $T_b$  einer Satellitenmessung ist definiert als die Temperatur eines schwarzen Strahlers, die dieser hätte, wenn er die gemessene Strahldichte emittieren würde. Die gemessene Strahldichte ist dann:

$$L_{\Delta\nu} = \frac{\int_{\Delta\nu} f_{\nu} B_{\nu}(T_b) d\nu}{\int_{\Delta\nu} f_{\nu} d\nu} \quad (2.38)$$

mit  $L_{\Delta\nu}$  in  $\frac{mW}{m^2 sr cm^{-1}}$ ,  $B_{\nu}$  als Planckfunktion,  $T_b$  äquivalente Helligkeitstemperatur (in K),  $\nu$  Wellenzahl (in  $cm^{-1}$ ) und  $f$  als **spektrale Empfindlichkeitsfunktion** des Instruments (siehe Abb. 2.3.1).

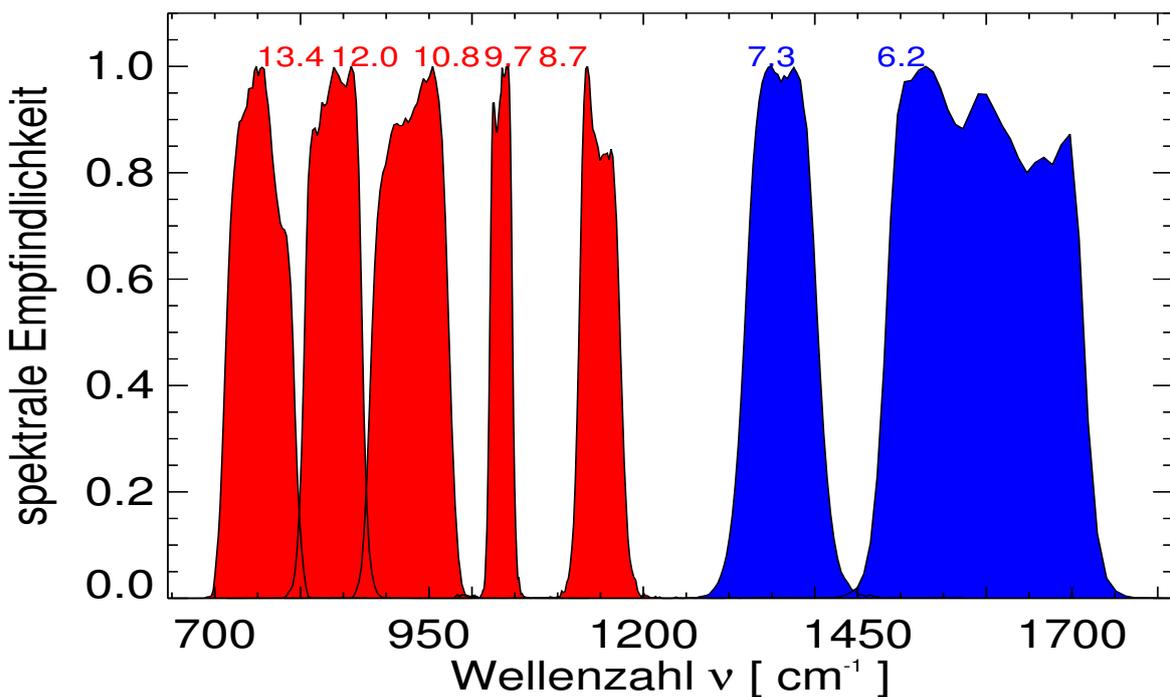


Abbildung 2.11: Spektrale Empfindlichkeitsfunktionen der Kanäle: WV\_062, WV\_073, IR\_087, IR\_097, IR\_108, IR\_120, IR\_134

Gleichung 2.38 lässt sich nach EUMETSAT MSG-MPEF (Meteorological Product Extraction Facility) für die einzelnen SEVIRI Kanäle mit folgender analytischer Beziehung approximieren [EUMETSAT 2005c]:

$$L_{\Delta\nu} = \frac{C_1 \nu_c^3}{e^{\frac{C_2 \nu_c}{AT_b + B}} - 1} \quad (2.39)$$

Aufgelöst nach  $T_b$  ergibt sich:

$$T_b = \frac{\frac{C_2 \nu_c}{\log\left(\frac{C_1 \nu_c^3}{L \Delta \nu} + 1\right)} - B}{A} \quad (2.40)$$

mit  $C_1 = 2hc^2$  und  $C_2 = \frac{hc}{k}$ , wobei  $c$  die Lichtgeschwindigkeit,  $h$  die Planckkonstante und  $k$  die Boltzmannkonstante sind.  $\nu_c$  ist die zentrale Wellenzahl der thermischen SEVIRI Kanäle und  $A$  und  $B$  sind nichtlineare Regressionskoeffizienten des entsprechenden SEVIRI Kanals (siehe Tabelle 2.2).

Die Koeffizienten sind unter der Randbedingung gewählt, dass die kleinste quadratische Abweichung der äquivalenten Helligkeitstemperatur kleiner als 0.05 K innerhalb des Intervalls 150K bis 350 K ist und werden von EUMETSAT zur Verfügung gestellt [EUMETSAT 2005c].

Tabelle 2.2: Zentrale Wellenzahl  $\nu_c$  (in  $\text{cm}^{-1}$ ), Koeffizienten  $A$  und  $B$  für die analytischen Beziehungen (Gl. 2.40) und (Gl. 2.39) zwischen Temperatur und Strahl-dichte für thermische Kanäle von SEVIRI auf MSG-1

Kanal	$\nu_c$	A	B
WV 6.2	1598.566	0.9963	2.219
WV 7.3	1362.142	0.9991	0.485
IR 8.7	1149.083	0.9996	0.181
IR 9.7	1034.345	0.9999	0.060
IR 10.8	930.659	0.9983	0.627
IR 12.0	839.661	0.9988	0.397
IR 13.4	752.381	0.9981	0.576

Eingesetzt in Gleichung 2.40 erhalten wir für die thermischen Kanäle den Zusammenhang zwischen Temperatur und Strahl-dichte (siehe Abb. 2.12). Für die Berechnung der Helligkeitstemperatur wurden im Rahmen dieser Arbeit die in Tabelle 2.2 dargestellten Koeffizienten verwendet.

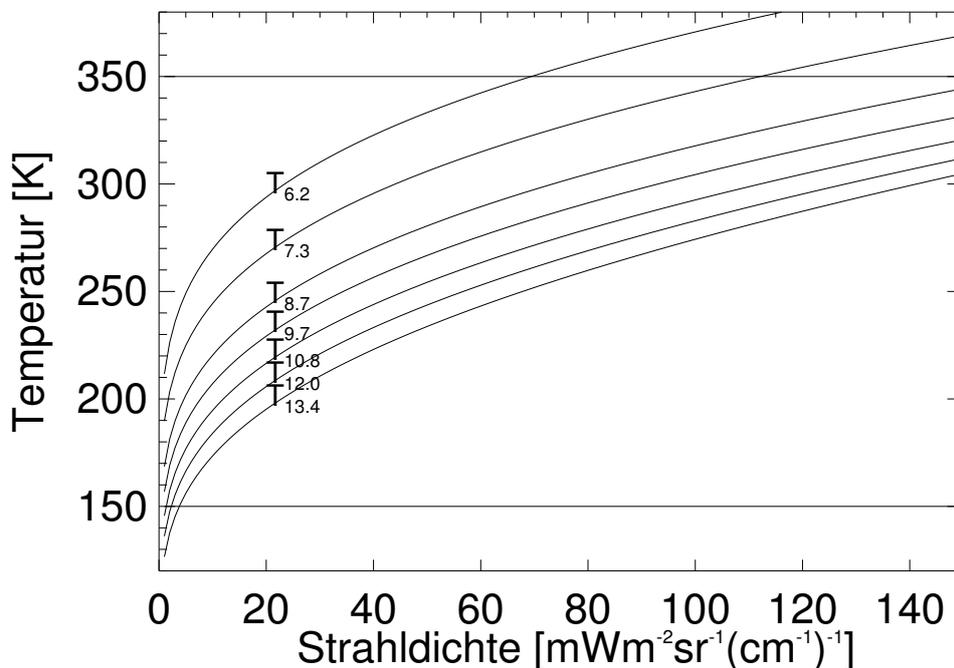


Abbildung 2.12: Äquivalente Helligkeitstemperatur als approximierte Funktion der gemessenen Strahl-dichte für die SEVIRI Kanäle: WV\_062, WV\_073, IR\_087, IR\_097, IR\_108, IR\_120, IR\_134. Die Linien bei 150K und 350K markieren den Gültigkeitsbereich.

### 2.3.2 Umrechnung der Strahldichten in bidirektionale Reflektivität

Für die solaren Kanäle wird die gemessene Strahldichte in eine **Reflektivität** umgerechnet. Dieser Wert beschreibt den Prozentsatz an ausfallender Strahlung, den die Erde von der einfallenden Sonnenstrahlung (= 100%) wieder zurücksendet. Die bidirektionale Reflektivität ist nach ([GOVAERTS und CLERICI 2004]) definiert als:

$$r = \frac{\pi L_{\Delta\nu} d(t)^2}{F_{\Delta\nu} \cos(\theta_s)} \quad (2.41)$$

mit  $L_{\Delta\nu}$  als gemessene Strahldichte,  $F_{\Delta\nu}$  als eingestrahlte Flußdichte bzw. Bestrahlungsstärke der Sonne im Wellenband (siehe Tab. 2.3),  $d(t)$  als der Abstand Sonne-Erde [AU] (siehe <http://gwest.gats-inc.com/software/soldis.pro>) und  $\theta_s$  als Sonnenzenitwinkel. Zur Berechnung des Sonnenzenitwinkels wird die Funktion von Blanco-Meriel (siehe [BLANCO-MERIEL et al. 2001]) verwendet. Die Funktion ist unter <http://www.psa.es/sdg/sunpos.htm> erhältlich.

Table 2.3: Bandbreite der solaren SEVIRI Kanäle, zentrale Wellenlänge  $\lambda_0$ , Bestrahlungsstärke der Sonne in dem entsprechenden Kanalband. Quelle: [GOVAERTS und CLERICI 2004].

Kanal	Bandbreite $\mu m$	$\lambda_0$ $\mu m$	Bestrahlungsstärke der Sonne $\frac{mW}{m^2 sr cm^{-1}}$
VIS 0.6	0.56-0.71	0.635	65.2296
VIS 0.8	0.74-0.88	0.810	73.0127
NIR 1.6	1.50-1.78	1.640	62.3715
HRV	0.37-1.25	0.750	78.8952

### 2.3.3 Gasabsorption in den SEVIRI Spektralbereichen

In Abb. 2.13 ist das Ergebnis einer hochaufgelöster Strahlungstransportrechnung (line-by-line) für eine “mid-latitude summer“ Atmosphäre dargestellt (siehe [TJEMKES und SCHMETZ 1998]). Die Strahldichte ist in eine äquivalente Helligkeitstemperatur umgewandelt und als Funktion der Wellenzahl aufgetragen.

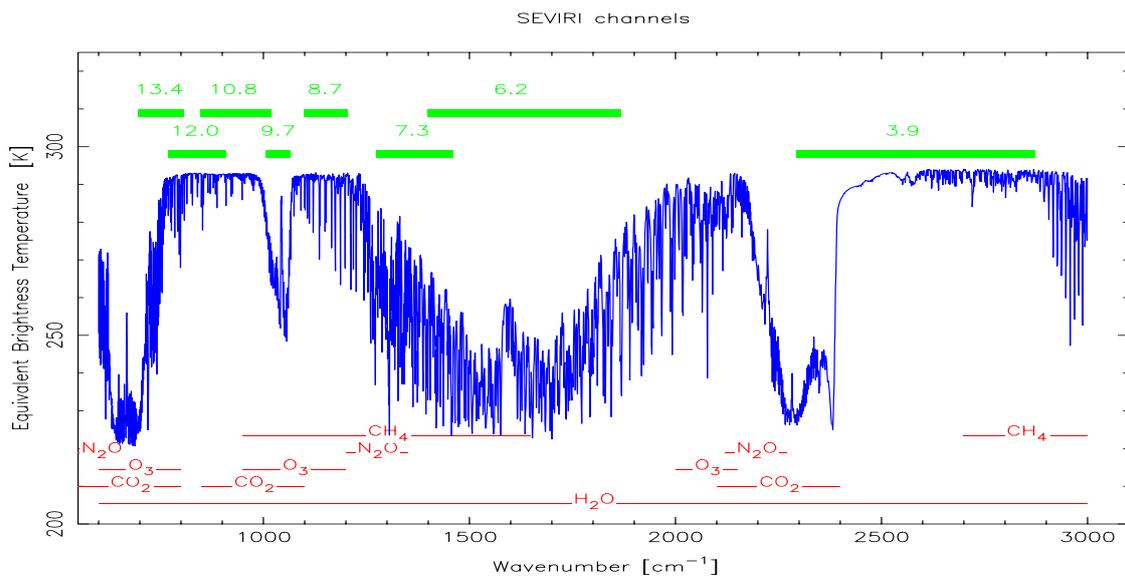


Abbildung 2.13: Nach oben gerichtete Strahldichte am Oberrand der “mid-latitude summer“ Atmosphäre, aufgetragen als äquivalente Helligkeitstemperatur als Funktion der Wellenzahl. Die Position der thermischen SEVIRI Kanäle ist oben aufgetragen und mit der zentralen Wellenlänge in  $\mu m$  markiert. Unten sind die wichtigsten Absorptionsbänder der verschiedenen Spurengase schematisch aufgetragen. Quelle: [TJEMKES und SCHMETZ 1998].

In Abb. 2.14 sind die Absorptionslinien der wichtigsten Spurengase und die Verteilung der langwelligeren und kurzwelligeren Strahlung dargestellt.

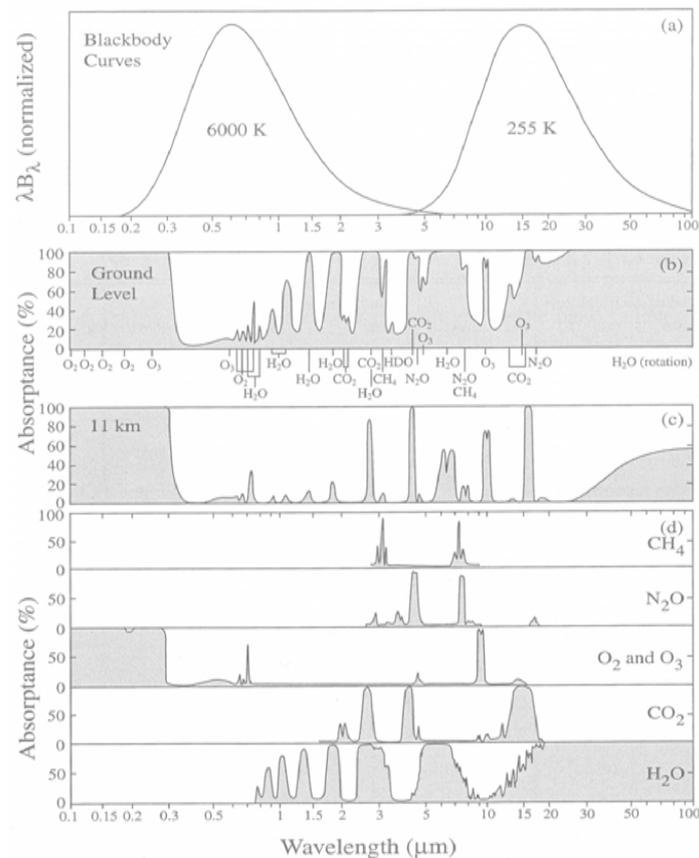


Abbildung 2.14: (a) Normalisierte Schwarzkörperkurven für die solare und terrestrische Strahlung. (b) Das gesamte Absorptionsspektrum der Atmosphäre vom Boden und (c) oberhalb von 11 km. (d) Absorptionsspektrum der wichtigsten Spurengase. Quelle: [THOMAS und STAMNES 1999].

In Abb. 2.15 sind simulierte Helligkeitstemperaturen für eine Atmosphäre mit Eiswolken für verschiedene Eis-Wasser-Pfade dargestellt (siehe [BANTGES et al. 1999]).

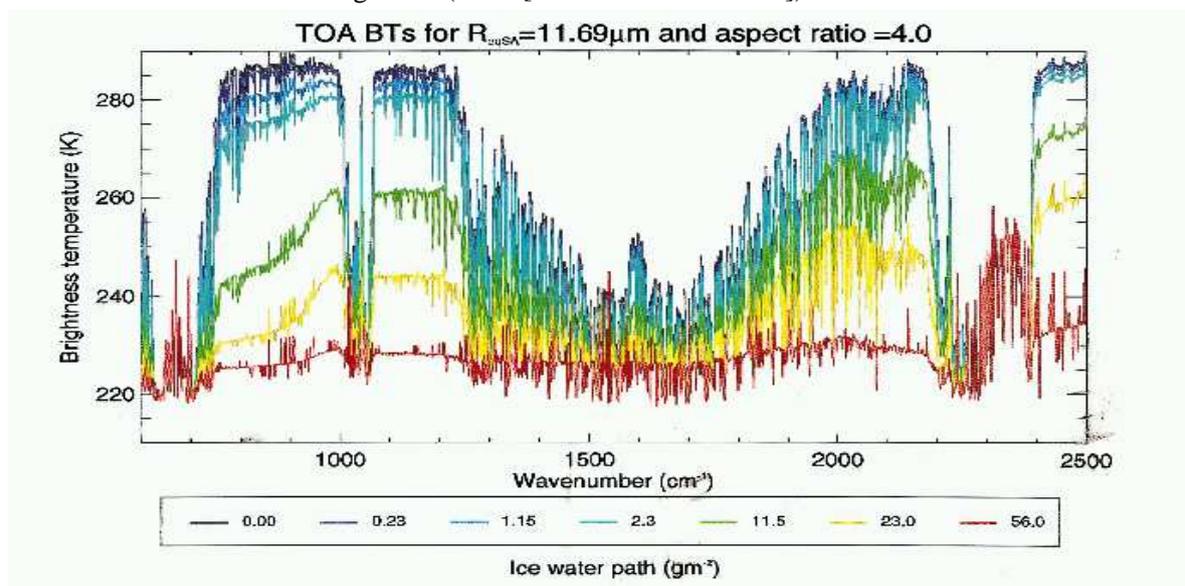


Abbildung 2.15: Simulierte Helligkeitstemperaturen für eine Atmosphäre mit Eiswolken (Form: zufällig verteilte prolata Sphäroide) als Funktion der Wellenzahl für unterschiedliche Eis-Wasser-Pfade. Quelle: [BANTGES et al. 1999].

Wie man in den Abbildungen 2.13, 2.14, 2.15 sieht, liegen die sogenannten Fensterkanäle IR\_108, IR\_120, IR\_087 in einem Spektralbereich mit wenig Absorption. Dies gilt auch für den Kanal IR\_039.

Dieser Kanal hat zusätzlich zu dem thermischen einen reflektierten solaren Anteil, ist also kein rein thermischer Kanal. Im Spektralbereich des Kanals IR\_134 absorbiert Wasserdampf etwas stärker. In diesem Spektralbereich absorbiert  $\text{CO}_2$ , der Kanal wird daher auch  $\text{CO}_2$ -Kanal genannt. Im Spektralbereich der Kanäle WV\_062 und WV\_073 hat Wasserdampf eine hohe Absorption. Sie werden daher auch Wasserdampfkanäle genannt. Im Spektralbereich des Ozonkanal IR\_097 liegen Absorptionslinien von  $\text{O}_3$ , die diesem Kanal den Namen geben. Methan ( $\text{CH}_4$ ) und  $\text{CO}_2$  absorbieren ebenfalls in diesem spektralen Band. Methanabsorptionslinien sind auch im Wasserdampfkanal WV\_073 enthalten.

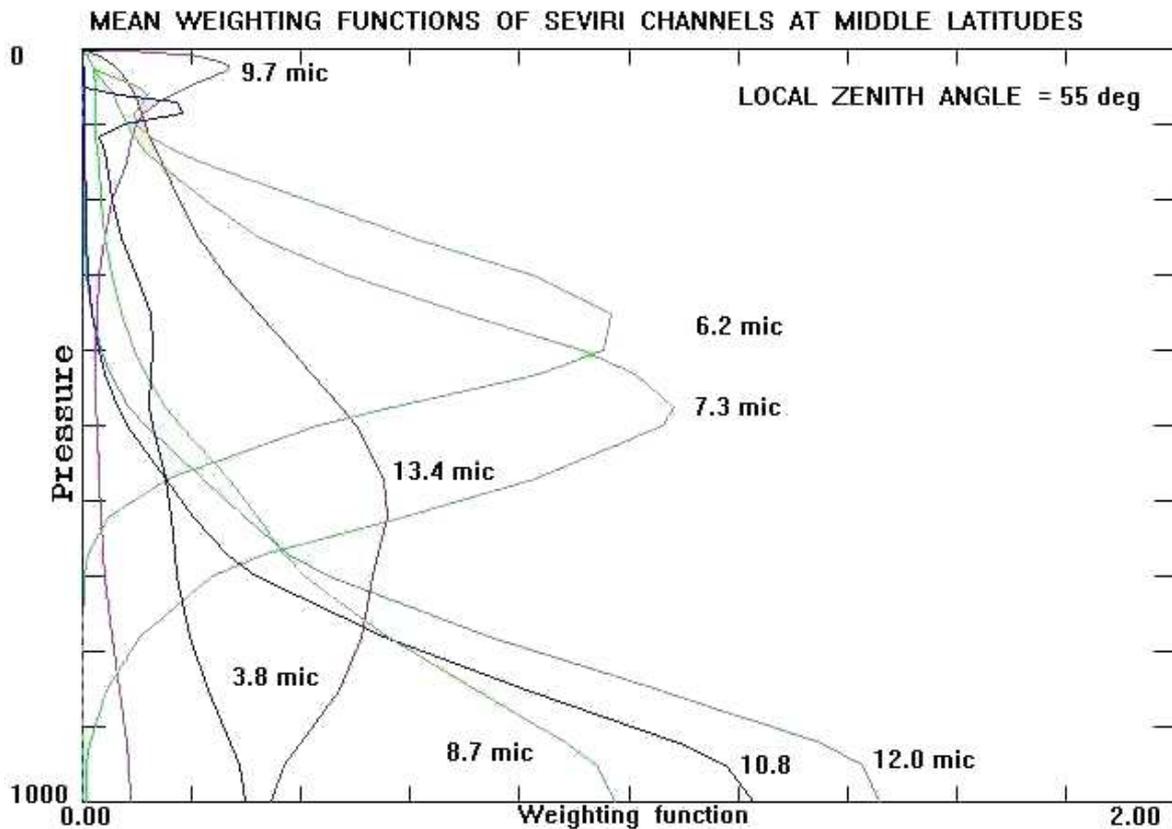


Abbildung 2.16: Mittlere Gewichtungsfunktion der thermischen Kanäle. Quelle: [EUMETSAT 2005a]

Durch die unterschiedliche Absorption der Atmosphäre in den einzelnen SEVIRI Kanälen sind diese sensitiver auf unterschiedliche Atmosphärenschichten bzw. unterschiedliche Höhe. In Abb. 2.16 sind für die thermischen Kanäle die Gewichtungsfunktionen für den Satellitenzenitwinkel  $55^\circ$  dargestellt. Eine Gewichtungsfunktion beschreibt den Beitrag der Atmosphärenschicht an der Strahldichte, die vom Satellitensensor gemessen wird. Die Gewichtungsfunktionen variieren abhängig vom Satellitenzenitwinkel und der Zusammensetzung der Atmosphäre.

Wie man an dieser Abbildung erkennt, reichen die Gewichtungsfunktionen der Kanäle IR\_108, IR\_120 und IR\_087 bis zur Erdoberfläche, während die Wasserdampfkanäle WV\_073 und WV\_062 einen viel geringeren bzw. gar keinen Beitrag aus unteren Atmosphärenschichten erhalten, d.h. weitgehend von der Temperatur des Bodens unabhängig sind. Dies ist vor allem vom Wasserdampfgehalt der Atmosphäre abhängig. Über ariden Gebieten "sieht" man im WV\_073 ein Signal vom Boden. Bei einem hohen Wasserdampfgehalt, bzw. wenn die Atmosphäre eine optisch dicke Wasserwolke oder Eiswolke enthält, verändern sich die Gewichtungsfunktionen, so dass auch in den Fensterkanälen kein Beitrag vom Boden detektiert wird. Dies bedeutet, dass die Photonen aus kälteren Atmosphärenschichten am Sensor ankommen, mit Ausnahme von Inversion, bei der die Temperatur mit der Höhe zunimmt. Die gemessene äquivalente Helligkeitstemperatur ist geringer als die Helligkeitstemperatur des Bodens. Dies kann man für einen einfachen Wolkenerkennungstest ausnutzen, bei dem ab einer bestimmten

oberen Temperaturgrenze das gemessene Signal als Wolke interpretiert wird.

$$T_b < T_{\text{Grenzwert.Wasserwolke}}$$

$$T_b < T_{\text{Grenzwert.Eiswolke}}$$

Semitransparente Wolken, wie z.B. Zirren, lassen einen Teil der vom Boden emittierten Strahlung durch. Die Gewichtsfunktionen werden für optisch dünne Zirren in den Kanälen IR\_108 und IR\_120 wegen der größeren Eisabsorption im Kanal IR\_120 unterschiedlich stark verändert (siehe [BANTGES et al. 1999]). So empfängt der Kanal IR\_120 Photonen aus kälteren Schichten als der Kanal IR\_108, abhängig von der optischen Dicke der Zirren. Die Differenz der äquivalenten Helligkeitstemperaturen der Fensterkanäle wird sehr häufig zur Zirrenerkennung verwendet (z.B. [FEIJT 2000], [MENZEL und STRABALA 2002], [KRIEBEL et al. 2003], [ACKERMAN et al. 1998]).

$$T_{b,10.8} - T_{b,12.0} > T_{\text{grenzwert.semitransparent}}$$

Der Unterschied der Eisabsorption in diesen zwei Kanälen ist desweiteren von der Partikelgröße abhängig. Je kleiner die Eispartikel, desto größer der Absorptionsunterschied bei gleicher optischer Dicke. In Kapitel 3 wird dieser Test und weitere Tests zur Zirrenerkennung näher untersucht und erläutert.

## Kapitel 3

# Methoden zur Ableitung von Zirruseigenschaften

In diesem Kapitel wird zunächst der Begriff Zirrus eingeführt. Es werden verschiedene Definitionen vorgestellt und diskutiert. Es werden unterschiedliche Möglichkeiten einer Zirrenerkennung mit Hilfe von Satellitenbildern gezeigt. Dabei liegt der Schwerpunkt auf einer Zirrenerkennung mit SEVIRI. Schwellenwerttechniken und morphologische Tests werden erläutert und anhand von Beispielen veranschaulicht.

Anschließend wird der für die Abschätzung des flugverkehrsinduzierten Bedeckungsgrades benötigte und im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Zirrenerkennungsalgorithmus vorgestellt. Verschiedene Tests des Algorithmus werden beschrieben. Die Validierung der abgeleiteten Zirusmasken wird gezeigt und diskutiert. Die für die Abschätzung des flugverkehrsinduzierten Strahlungsantriebs notwendigen Methoden zur Berechnung von Strahlungsflussdichtedaten werden erläutert und die Ergebnisse der Validierung der Strahlungsflussdichten vorgestellt.

### 3.1 Klassifizierung von Zirren

Für eine Klassifizierung von Zirren wird eine Definition dieses Begriffs benötigt. Wolken werden primär nach ihrer Morphologie klassifiziert. Nach der World Meteorological Organisation (WMO) ([WMO 1995], [WMO 1987]) sind Zirren definiert als:

“**Cirrus:** *Detached clouds in the form of white, delicate filaments or white or mostly white patches or narrow bands. These clouds have a fibrous (hair-like) appearance, or a silky sheen, or both.*“

“**Cirrocumulus:** *Thin, white patch, sheet or layer of cloud without shading, composed of very small elements in the form of ripples, ripples etc., merged or separate, and more or less regularly arranged; most of the elements have an apparent width of less than one degree.*“

“**Cirrostratus:** *Transparent, whitish cloud veil of fibrous (hair-like) or smooth appearance, totally or partly covering the sky, and generally producing halo phenomena.*“

Diese Definitionen lassen sich weiter in Subgruppen aufspalten (siehe [LYNCH et al. 2002], S. 7). Sie beinhalten jedoch nicht alle Typen von Zirren. So ist z.B. der “subvisible Cirrus“, ein in der Atmosphärenphysik anerkannter Begriff, nicht enthalten. Dies gilt auch für Kondensstreifen (*engl. contrail cirrus*). Der “subvisible Cirrus“ ist definiert als Zirrus mit einer optischen Dicke unterhalb 0.03 bei  $0.694\mu\text{m}$  (siehe [SASSEN und CHO 1992]).

Die oben zitierten Definitionen beziehen sich auf das Erscheinungsbild und basieren auf visuellen Beobachtungen bei Tag. Physikalische Eigenschaften wie Eis-Gehalt, Temperatur, Höhe, Farbe und optische Dicke sind nicht explizit enthalten.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Begriff Zirrus in einem weiteren Sinn für alle hohen Eiswolken, d.h. Wolken in denen Eispartikel die physikalischen Eigenschaften dominieren, verwendet.

Für eine automatische Zirrenerkennung aus Satellitendaten sind neben der Morphologie die physikalischen Eigenschaften von Zirruswolken entscheidend. So sind Zirren in der Regel optisch dünn und bestehen hauptsächlich aus Eis. Sie bilden sich ab ca. 6km und höher (siehe [LYNCH et al. 2002], S. 7). Die Höhe variiert mit dem Temperaturprofil der Troposphäre. Bedingt durch die große Höhe haben Zirren eine sehr niedrige Temperatur.

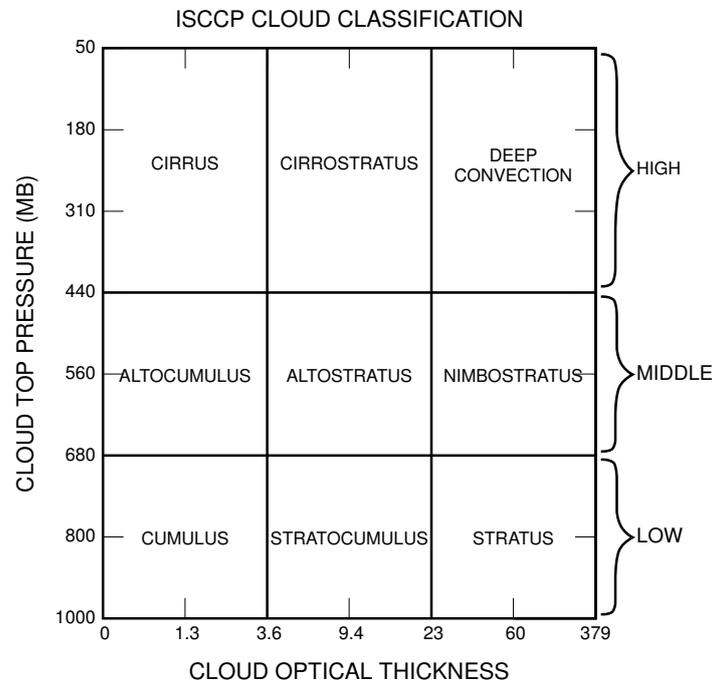


Abbildung 3.1: ISCCP Klassifikation der bewölkten Bildelemente. Klassifikation erfolgt nach optischer Dicke und Druck an der Wolkenoberkante. Nachts wird nur der Druck an der Wolkenoberkante bestimmt, so dass nur nach “low“, “middle“ und “top“ klassifiziert wird. Quelle: [ROSSOW und SCHIFFER 1999].

Für die **International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP)** Wolkenklimatologie definieren [ROSSOW und SCHIFFER 1991] Zirren und andere Wolken anhand ihrer optischen Dicke und der Wolkenhöhe bzw. dem dazu korrespondierenden Druck an der Wolkenoberkante. Die optische Dicke dient jedoch nur bei Tag als Klassifikationsparameter. Nachts wird nur der Druck an der Wolkenoberkante herangezogen (siehe auch [KIDDER und VONDER HAAR 1995], S. 285). In Abb. 3.1 ist die aktuelle ISCCP Klassifikation der bewölkten Satellitenbildelemente veranschaulicht.

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Zirrenerkennungsalgorithmus **MeCiDA (Meteosat Cirrus Detection Algorithm)** bezieht sich hauptsächlich auf Temperatur, Höhe und Eisgehalt der Wolken. Die Morphologie spielt insofern eine Rolle, als dass Zirren in den Wasserdampfkanälen eine hochfrequente Inhomogenität darstellen, auf die in diesem Kapitel noch näher eingegangen wird. Da der Flugverkehr mit der Tageszeit variiert, wurde eine tageszeitunabhängige Klassifizierung benötigt. Aus diesem Grund muss auf die solaren Kanäle und die optische Dicke als Klassifizierungskriterium verzichtet werden.

**Der MeCiDA-Algorithmus erkennt hohe, kalte Eiswolken** und unterscheidet nicht zwischen dünnem Zirrus und hochreichender Konvektion.

## 3.2 Satellitengestützte Fernerkundung von Zirren

Für die Bestimmung von Zirrusbedeckungen aus SEVIRI Daten wurden verschiedene Methoden verwendet, um aus Satellitendaten Wolkenbedeckungsgrade abzuleiten. Im diesem Abschnitt werden eine Reihe grundsätzlicher Methoden vorgestellt, auf denen der MeCiDA-Algorithmus aufbaut.

### 3.2.1 Schwellwerttechniken

Vom Weltraum aus betrachtet sind Wolken zumeist heller und kälter als deren unbewölkte Umgebung. Man kann daher anhand von Helligkeits- und Temperaturschwellwerten zwischen bewölkten und unbewölkten Bildelementen unterscheiden. Dies ist die älteste und gebräuchlichste Technik zur Wolkenidentifikation. Die Einfachheit und Schnelligkeit dieser Technik macht sie für viele Anwendungen attraktiv. Das Festlegen des Schwellwert ist jedoch nicht trivial. Wenn eine Wolke kleiner ist als das Satellitenpixel, lässt sich diese von einer optisch dünnen Wolke nicht mehr unterscheiden. Dies kann speziell bei dünnen und somit sowohl im solaren als auch im thermischen transparenten Wolken, sowie bei Teilbewölkung zu Fehlinterpretationen führen ([KIDDER und VONDER HAAR 1995], S. 269).

Im Idealfall hat eine Satellitenszene Bildelemente mit gleichförmigem Untergrund (Strahldichte  $L_{clr}$ ) und gleichförmiger Bewölkung (Strahldichte  $L_{cld}$ ). Im Vergleich dazu wird für die teilweise bewölkten Bildelemente eine Strahldichte zwischen  $L_{clr}$  und  $L_{cld}$  gemessen. Setzt man den Schwellwert nahe bei  $L_{clr}$ , so werden bereits Bildelemente mit geringer Bewölkung als bewölkt interpretiert, was zu einer Überschätzung des Wolkenbedeckungsgrades innerhalb der gesamten Satellitenszene führt. Umgekehrt werden bei einem Schwellwert nahe  $L_{cld}$  nur vollständig bewölkte Bildelemente als solche erfasst und alle teilweise bewölkten Felder als wolkenfrei, was zu einer Unterschätzung des Gesamtbedeckungsgrades führt.

Die Hauptschwierigkeit liegt daher in der Festlegung der Schwellwerte. Während bei einer manuellen Interpretation die Schwellwerte an die entsprechende Szene angepasst werden können, ist dies bei einer automatischen Wolkenklassifizierung schwierig. Betrachtet man einen infraroten Kanal, so ist die gemessene Strahldichte einer Atmosphäre vereinfacht ausgedrückt ([KIDDER und VONDER HAAR 1995] S. 219):<sup>1</sup>

$$L_{\lambda} = B_{\lambda}(T_S)T_A(\lambda) + B_{\lambda}(T_A)(1 - T_A(\lambda)) \quad (3.1)$$

bzw. mit einer semitransparenten hohen Wolke, z.B. Zirrus:

$$L_{\lambda} = B_{\lambda}(T_S)T_A(\lambda)T_Z(\lambda) + B_{\lambda}(T_A)(1 - T_A(\lambda))T_Z(\lambda) + B_{\lambda}(T_Z)(1 - T_Z(\lambda)) \quad (3.2)$$

mit  $T_A$  als Transmission der Atmosphäre,  $T_Z$  als Transmission der Zirruswolke,  $T_S$  Helligkeitstemperatur des Bodens,  $T_A$  Helligkeitstemperatur der Atmosphäre und  $T_Z$  Helligkeitstemperatur der Zirruswolke. Die Atmosphäre über der Zirruswolke wurde hierbei vernachlässigt. Die Strahldichte hängt damit von der Temperatur des Bodens, der Atmosphäre und der Zirruswolke ab. Eine Erkennung dünner Zirren mit Schwellwerttechniken, die auf einem Kanal basieren, ist nicht möglich.

#### 3.2.1.1 Schwellwerttests für einen Kanal

Bei optisch dicken, hohen Eiswolken lassen sich die beiden ersten Terme der Gl. 3.2 vernachlässigen, ( $T_Z(\lambda) = 0$ ). Die gemessene Strahldichte bzw. umgerechnet die Helligkeitstemperatur

$$L_{\lambda} = B_{\lambda}(T_Z) \quad (3.3)$$

hängt dann nur von der Temperatur der Eiswolke ab, und man kann das Bildelement ab einem Schwellwert

$$T_b < T_{\text{Grenzwert\_Eiswolke}} \quad (3.4)$$

z.B.  $243K < T_{13.4}$  als Eiswolke klassifizieren.  $T_{13.4}$  ist die äquivalente Helligkeitstemperatur des MSG-Kanals IR\_134. Der Test ist sehr schnell und eignet sich optisch dicke Eiswolken zu detektieren. Die Grenztemperatur hängt aber vom Satellitenzenitwinkel ab.

<sup>1</sup>Es gilt:  $R + A + T = 1$ , R: Reflexion, A: Absorption, T: Transmission. Für  $R=0 \rightarrow A + T = 1$

### 3.2.1.2 Multispektrale Schwellenwerttests

Bei semitransparenten Wolken können keine Tests verwendet werden, die auf konstanten Schwellenwerten eines Kanals basieren. Sie sind von einer Vielzahl zeitlich und räumlich variabler Parameter abhängig (Gl. 3.2): Oberflächentyp, unterschiedliche Untergrundtemperatur oder unterschiedliche Atmosphärenzusammensetzung. Daher werden bei semitransparenten Wolken Tests verwendet, die diese Abhängigkeit zumindest teilweise eliminieren, z.B. Tests die auf der Kombination bzw. Differenz von zwei Kanälen basieren. Durch die Kombination mehrerer Kanäle mit unterschiedlichen spektralen Eigenschaften lassen sich einige Einflüsse minimieren.  $L_{11}$  und  $L_{12}$  sind die gemessenen Strahldichten der Fensterkanäle ( $11\mu m$  und  $12\mu m$ ).

$$\begin{aligned} L_{11} &= B_{11}(T_S)\mathcal{T}_A(11)\mathcal{T}_Z(11) + B_{11}(T_A)(1 - \mathcal{T}_A(11))\mathcal{T}_Z(11) + B_{11}(T_Z)(1 - \mathcal{T}_Z(11)) \\ L_{12} &= B_{12}(T_S)\mathcal{T}_A(12)\mathcal{T}_Z(12) + B_{12}(T_A)(1 - \mathcal{T}_A(12))\mathcal{T}_Z(12) + B_{12}(T_Z)(1 - \mathcal{T}_Z(12)) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Bildet man die Differenz der umgerechneten Helligkeitstemperaturen dieser zwei Kanäle, bzw. der MSG-Kanäle IR\_108 und IR\_120 und trägt diese in Abhängigkeit der optischen Dicke der Eisolke auf, sieht man die in der Literatur zahlreich beschriebenen typischen Kurven (siehe [FEIJT 2000], [MENZEL und STRABALA 2002], [KRIEBEL et al. 2003], [ACKERMAN et al. 1998]). Da in beiden Kanälen die Bodenemissionsvermögen ähnlich sind, hängt die Differenz dieser Kanäle hauptsächlich von den unterschiedlichen Transmissionen bzw. Absorptionskoeffizienten der Spurengase, vor allem vom Wasserdampfgehalt der Atmosphäre und den Eisabsorptionskoeffizienten der Zirruswolke ab.

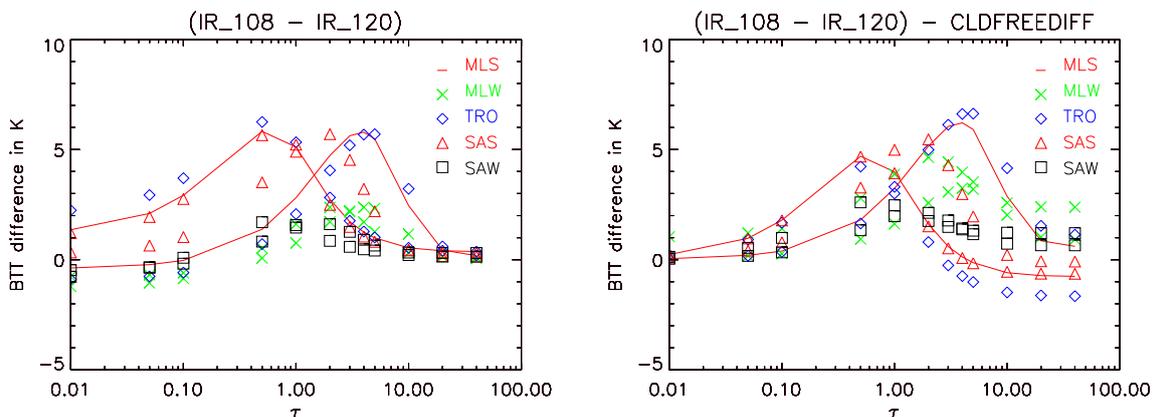


Abbildung 3.2: **Links:** Simulation der Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR\_108 und IR\_120 in Abhängigkeit von der optischen Dicke einer Eisolke für verschiedene Atmosphärenprofile, *MLS Midlatitude Summer*, *MLW Midlatitude Winter*, *TRO Tropical*, *SAS Subartical Summer*, *SAW Subartical Winter* und für zwei verschiedene Satellitenzenitwinkel. **Rechts:** Simulation der Helligkeitstemperaturdifferenz minus der Differenz ohne die Zirruswolke der Kanäle IR\_108 und IR\_120 in Abhängigkeit der optischen Dicke einer Eisolke für verschiedene Atmosphärenprofile, *MLS Midlatitude Summer*, *MLW Midlatitude Winter*, *TRO Tropical*, *SAS Subartical Summer*, *SAW Subartical Winter* und für zwei verschiedene Satellitenzenitwinkel.

Eine ausführliche Untersuchung lässt sich mittels Strahlungstransportrechnungen durchführen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Vielzahl von Kanalkombinationen untersucht. Mit Hilfe des Satellitensimulationstools **SimSat** (siehe Anhang D.1) wurden für alle thermischen Kanäle von SEVIRI unterschiedliche Szenarien simuliert. Dabei wurden Oberflächen-, Atmosphären- und Wolkeneigenschaften variiert, um die Sensitivität der Wolkenerkennungstests auf die Schwellwerte zu untersuchen und die Tests zu veranschaulichen (siehe Anhang D).

In Abb. 3.2 ist das Ergebnis einer Strahlungstransportrechnung für die Kanäle IR\_108 und IR\_120 dargestellt. Wie man im linken Teil der Abb. 3.2 sieht, steigt die Temperaturdifferenz der beiden Kanäle mit zunehmender optischer Dicke der Zirruswolke an, da im Kanal IR\_120 Eispartikel stärker absorbieren als im Spektralband des Kanal IR\_108. Der erste und zweite Term in Gl. 3.5 wird mit zunehmender optischer Dicke vernachlässigbar. Der dritte Term nimmt für den Kanal IR\_120 stärker zu als im IR\_108 Kanal. Die Temperaturdifferenz nimmt für große optische Dicken<sup>2</sup>  $\tau > 5$  wieder

<sup>2</sup>Die optische Dicke ist bei  $0.55\mu m$   $\tau_{0.55}$  angegeben.

ab, da nun für beide Wellenlängen die Helligkeitstemperatur der Zirruswolke gemessen wird. Der Semitransparente-Zirrustest liefert für

$$T_{b,10.8} - T_{b,12.0} > T_{\text{grenzwert\_semitransparent}} \quad (3.6)$$

eine Wolkenmaske für dünne Zirren.

In Abb. 3.2 wird ebenfalls sichtbar, dass dieser Zirrustest stark von der Atmosphärenzusammensetzung und vom Blickwinkel abhängt. Daher ist die Festlegung der wolkenfreien äquivalenten Helligkeitstemperatur wichtig (Startwert der Kurve). Diese kann z.B. aus Modelldaten gewonnen werden (siehe [FEIJT 2000]), dies ist aber rechenzeitaufwendig und fehlerbehaftet. Für eine Reihe der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Zirrentests wird die zirrusfreie Temperatur aus dem wärmsten Bildelement der Umgebung abgeschätzt. Diese Methode ist für räumlich ausgedehnte Zirrus- und Eiswolken fehleranfällig und funktioniert nur in Kombination der räumlichen Eigenschaften dieser Wolken in den Wasserdampfkanälen.

Im rechten Teil der Abb. 3.2 ist die Helligkeitstemperaturdifferenz der zirrusfreien Atmosphäre von der Temperaturdifferenz mit der Eiswolke abgezogen, so dass für optisch dünne Wolken ein fester Schwellenwert verwendet werden kann. Der so modifizierte semitransparente Zirrustest

$$(T_{b,10.8} - T_{b,12.0}) - (T_{b,10.8}(\text{geschätzt}) - T_{b,12.0}(\text{geschätzt})) > T_{\text{grenzwert}} \quad (3.7)$$

lässt sich besser auf dünne Zirren anpassen. Für optisch dicke Zirren führt dies zu einer Abhängigkeit von der wolkenfreien Atmosphäre und der Bodentemperatur. Es werden weniger optisch dicke Zirren erkannt. Für diese lassen sich allerdings andere Tests verwenden, z.B. der bereits erwähnte Schwellenwerttest basierend auf dem Kanal IR\_134.

Im Gegensatz zu den gerade besprochenen Fensterkanälen ist die Abhängigkeit von der Bodentemperatur in den Wasserdampfkanälen WV\_062 und WV\_073 in nur geringem Maß vorhanden. Die gemessene Strahlendichte einer Atmosphäre mit einer semitransparenten, hohen Eiswolke ist vereinfacht ausgedrückt:

$$\begin{aligned} L_{6.2} &= B_{6.2}(T_A)(1 - \mathcal{T}_A(6.2))\mathcal{T}_Z(6.2) + B_{6.2}(T_Z)(1 - \mathcal{T}_Z(6.2)) \\ L_{7.3} &= B_{7.3}(T_A)(1 - \mathcal{T}_A(7.3))\mathcal{T}_Z(7.3) + B_{7.3}(T_Z)(1 - \mathcal{T}_Z(7.3)). \end{aligned} \quad (3.8)$$

Dabei absorbiert Wasserdampf im Spektralbereich des Kanals WV\_062 mehr als im Kanal WV\_073. Letzterer "sieht" tiefer in die Atmosphäre, empfängt also ein Signal aus wärmeren Atmosphärenschichten. Auf der anderen Seite hat Eis eine höhere Absorption im Spektralband des Kanal WV\_073. Bilden man die Differenz der beiden Helligkeitstemperaturen, so verringert sich diese in Abhängigkeit von der optischen Dicke der Zirruswolke.

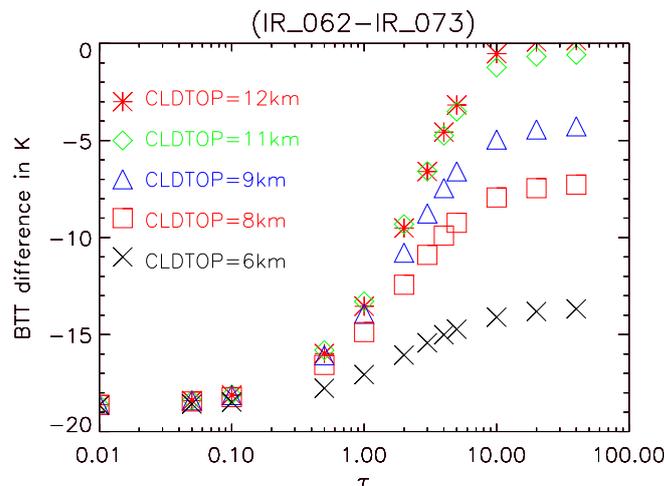


Abbildung 3.3: Simulation der Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle WV\_062 und WV\_073 in Abhängigkeit der optischen Dicke einer Eiswolke für verschiedene Wolkenoberkanten.

In Abb. 3.3 wurden die Differenzen der Helligkeitstemperatur beider Kanäle in Abhängigkeit von der optischen Dicke und für verschiedene Wolkenoberkantenhöhen für eine "mid-latitude-summer" Atmosphäre simuliert.

Bei tiefen und optisch dünnen Wolken ist die Differenz sehr groß. Der linke Teil der Abbildung 3.4 zeigt die Differenz der Helligkeitstemperaturen der Wasserdampfkanäle. Zur besseren Orientierung ist rechts ein Falschfarbenbild der selben Szene dargestellt.

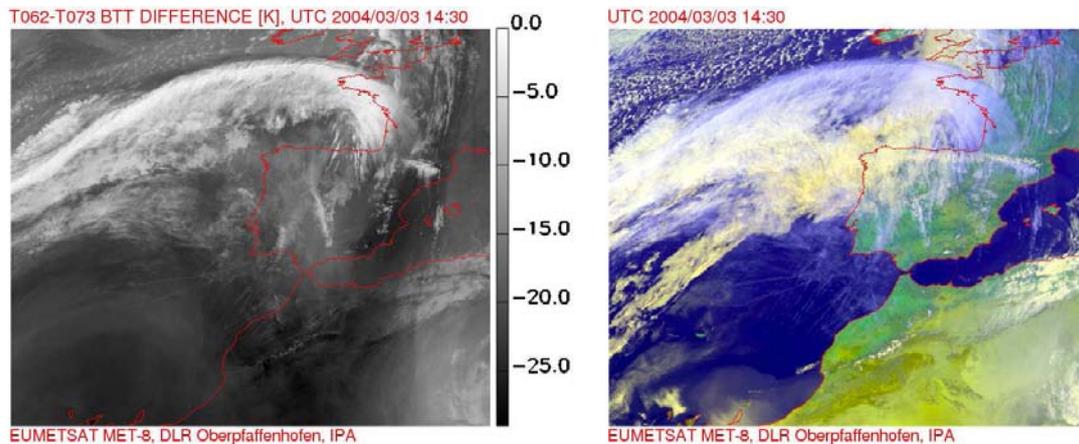


Abbildung 3.4: **Links:** Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR\_62 und IR\_73. **Rechts:** Falschfarbenbild rot: VIS006, grün: VIS008, blau: IR\_108 invertiert.

Man sieht die hohen Wolken deutlich heller als tiefe Bewölkung. Mit Hilfe der Differenz der Helligkeitstemperaturen der Wasserdampfkanäle

$$T_{b,6.2} - T_{b,7.3}(\text{gemessen}) > T_{\text{Grenzwert}} \quad (3.9)$$

lassen sich hohe, optisch dicke Eiswolken erkennen. Als geeigneter Grenzwert ist  $T_{\text{Grenzwert}} = -12K$  festgelegt worden. Das Ergebnis dieses Tests hängt ebenfalls vom Satellitenzenitwinkel ab.

### 3.2.2 Falschfarbenbilder

Kombiniert man drei oder mehr Kanäle, bietet sich eine farbliche Kodierung der zusätzlichen Information bei der Visualisierung an. In einem RGB-Farbschema kann man z.B. die Strahldichten von drei Kanälen je einer Farbe rot, grün oder blau zuweisen. Aus den Mischfarben lassen Schlüsse über die Eigenschaften der Wolken und der Umgebung ziehen (siehe z.B. [ROSENFELD 2000]). EUMETSAT hat auf der Web-Seite: <http://www.eumetsat.int> einige Möglichkeiten zusammengestellt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird häufig die Kombination aus den Kanälen VIS\_006-rot, VIS\_008-grün und dem invertierten Kanal IR\_108-blau verwendet (siehe Abb. 3.4 rechts). Dabei werden verschiedene Eigenschaften dieser Spektralkanäle ausgenutzt. So ist die Reflexion von Land mit Vegetation im Spektralbereich des Kanals VIS\_008 höher als die Wasserreflexion und die Reflexion im Kanal VIS\_006. Deshalb bietet sich an, den Kanal VIS\_008 im RGB-Farbschema der Farbe grün zuzuweisen. Wasser und Eiswolken reflektieren stark und haben ähnliche Reflexionseigenschaften in beiden Kanälen. Hohe Eiswolken sind kälter und haben eine geringere Helligkeitstemperatur als tiefe und daher warme Wasserwolken. Invertiert man den infraroten Kanal IR\_108 und weist ihn der Farbe Blau zu, so ist der Blauanteil der Wasserwolken geringer als der von Eiswolken. Warme Wasserwolken erscheinen gelb, kalte optisch dicke Eiswolken sind weiß. Optisch dünne Eiswolken erscheinen über Wasser bläulich.

Die so prozessierten Falschfarbenbilder sind intuitiv erfassbar und sehr anschaulich bei der Beurteilung der Szene. Im Rahmen dieser Arbeit wurden sie benutzt, um Zirrentests zu überprüfen.

Zusätzlich kann mit Hilfe des HRV Kanals, der zu einem oder zwei der sichtbaren Kanälen VIS\_006 und VIS\_008 addiert, bzw. anstelle des VIS\_008 verwendet wird, die räumliche Auflösung erhöht werden. Dies erlaubt z.B. die Untersuchung und Erkennung von räumlich dünneren Kondensstreifen.

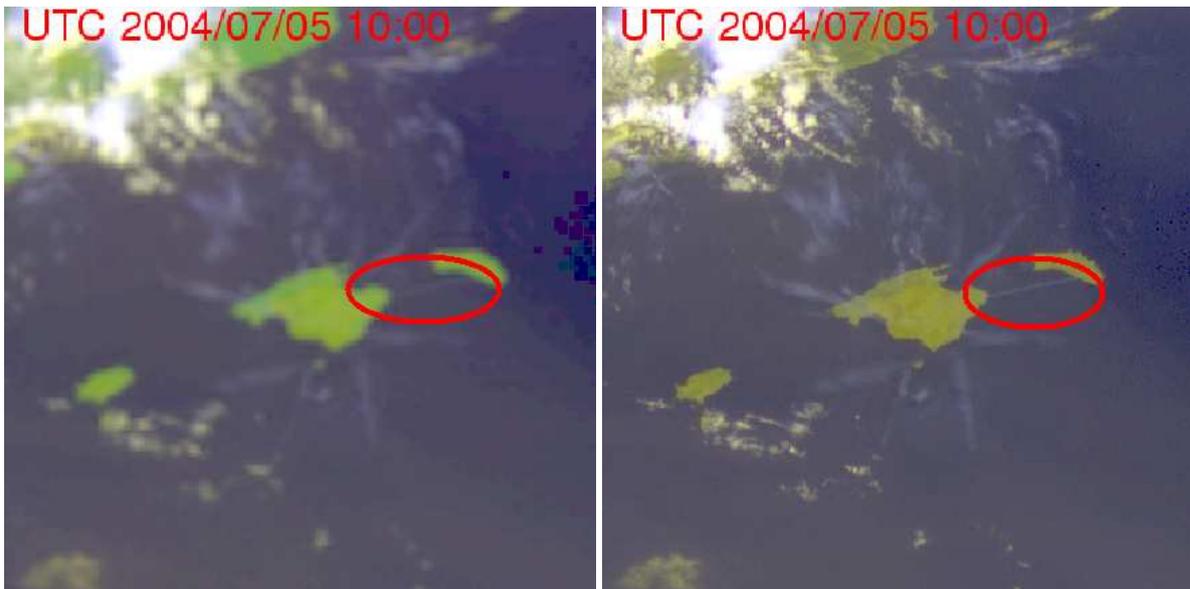


Abbildung 3.5: **Links:** Kondensstreifen über Mallorca. Falschfarbenbild rot: VIS006, grün: VIS008, blau: IR\_108 invertiert **Rechts:** Falschfarbenbild der selben Szene mit HRV. rot:VIS006+HRV, grün:HRV, blau:IR\_108 invertiert.

Im linken Bild der Abb. 3.5 ist der markierte Kondensstreifen aufgrund der geringeren Auflösung nicht erkennbar, während er rechts mit Hilfe des HRV Kanals sichtbar wird.

Mit der hohen zeitlichen Auflösung des MSG (15 min.) lassen sich durch diese Bilder Rückschlüsse auf die Lebensdauer und Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Kondensstreifen ziehen.

### 3.2.3 Mustererkennungsverfahren

Zirren bilden in einem Satellitenbild bestimmte Muster. In Abb. 3.6 ist die in Abb. 3.4 dargestellte Szene als Helligkeitstemperaturbild des Wasserdampfkanals WV\_073 dargestellt. Man sieht, dass die Zirruswolken sich aufgrund ihrer "faserigen" Struktur vom ansonsten homogenen Wasserdampfbild abheben. Diese strukturellen bzw. morphologischen Eigenschaften von Zirruswolken kann man nutzen, um zu entscheiden, ob es sich um eine Zirruswolke handelt oder nicht.

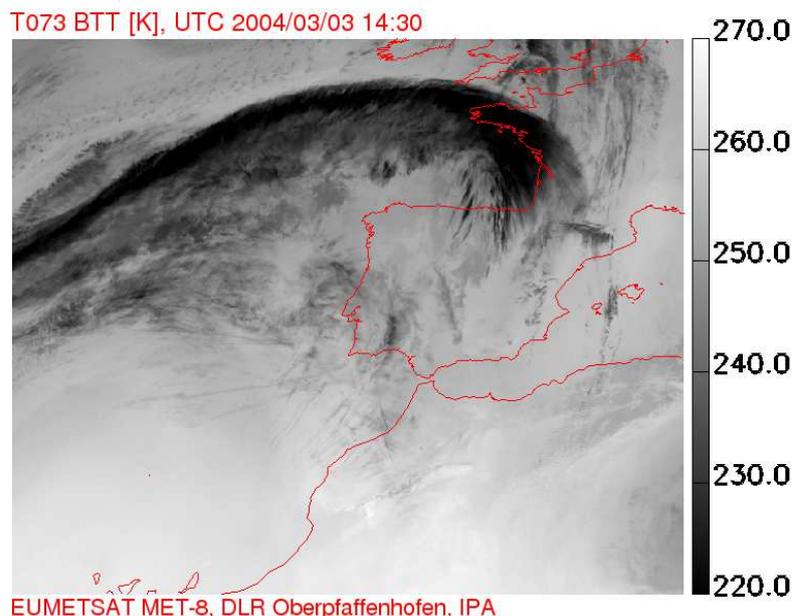


Abbildung 3.6: Helligkeitstemperatur des Wasserdampfkanals WV\_073.

Allein aufgrund der Helligkeitstemperaturen wäre dies für dünne Zirren wie Kondensstreifen nicht möglich. In Abb. 3.6 sind große homogene Bereiche teilweise dunkler als die Eiswolken in anderen Teilen des Bildes. Bei einem konstanten Schwellenwert würden entweder zu viele Bildelemente fälschlicherweise als Zirren markiert werden oder viele Zirren würden nicht erkannt. Die strukturellen Eigenschaften der Ziruswolken lassen sich auch bei einer automatischen Erkennung verwenden. Die dünnen Ziruswolken stellen in Abb. 3.6 hohe Frequenzen dar. Wasserwolken, von Wolkenkanten abgesehen, und die unterschiedliche Wasserdampfkonzentration sind als homogenere Strukturen sichtbar und lassen sich als langwelligeres Signal in einem 2D Bild auffassen.

Man kann diese homogenen Strukturen aus dem Bild herauszufiltern. Das Filtern der Frequenzen lässt sich im Frequenzraum oder im Ortsraum durchführen.

Im Frequenzraum bedeutet dies nach einer Transformation des Bildes, z.B. mit FFT (Fast Fourier Transform) eine Multiplikation mit der Frequenz-Filter-Funktion. Die Frequenz-Filter-Funktion kann im einfachsten Fall 1 sein für den zu filternden Frequenzbereich und 0 für die Frequenzen die weggefiltert werden sollen. Die Rücktransformation liefert dann das gewünschte Ergebnis.

Die entsprechende Operation dazu im Ortsraum ist die Faltung bzw. **Konvolution** des Bildes  $f(i, j)$  mit einem **Konvolutionskern** (engl. *Kernel*)  $h(i, j)$

$$g(i, j) = f(i, j) \odot h(i, j). \quad (3.10)$$

Die mathematische Operation ist analog zu der im Frequenzraum, das Ergebnis kann sich jedoch unterscheiden, da der Konvolutionskern bei diskreten Bildern approximiert wird, da der Konvolutionskern diskret ist und eine endliche Größe haben muss. Dabei ist zu beachten, dass die Rechenzeit einer solchen Implementierung von der Größe des Kerns abhängt. Für einen rechteckigen  $M \times M$  Kern ergibt sich die Rechenvorschrift:

$$g(i, j) = \sum_{m=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}} \sum_{n=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}} h(m, n) f(i - m, j - n). \quad (3.11)$$

Verschiedene Konvolutionskerne können genutzt werden, um je nach Aufgabenstellung das entsprechende Bild zu verarbeiten. Diese Konvolutionskerne sind zahlreich in der Literatur (z.B. [GONZALEZ und WOODS 1992]) und im Internet beschrieben. Eine anschauliche Einführung findet sich z.B. unter <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/filtops.htm>

Ein einfacher  $3 \times 3$  Konvolutionskern ist gegeben mit

$$\frac{1}{9} \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array}$$

Mit diesem Konvolutionskern lässt sich der gleitende Mittelwert berechnen. Angewandt auf das Helligkeitstemperaturbild in Abb. 3.6 würden die hohen Frequenzen unterdrückt. Das ist ein sogenannter **Boxcar Filter**, ein Tiefpassfilter. Zieht man vom Ergebnis das Originalbild wieder ab, werden diesmal die tiefen Frequenzen unterdrückt.

$$g(i, j) = f(i, j) \odot h(i, j) - f(i, j) \quad (3.12)$$

Das Ergebnis ist ein Hochpassfilter.

Mit dem **Gauß-Filter** kann man die Nachbarschaftsbeziehungen in Abhängigkeit des Abstandes berücksichtigen. Die zweidimensionale radialsymmetrische Gaußfunktion hat die Form:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}. \quad (3.13)$$

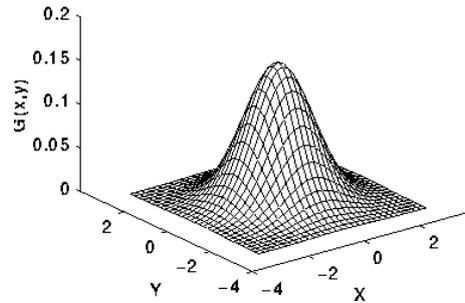


Abbildung 3.7: 2-D Gaußverteilung mit Mittelwert (0,0)  $\sigma = 1$ .

In Abb. 3.7 ist die Funktion veranschaulicht. Der entsprechende  $5 \times 5$  Kern wäre dann:

$$\frac{1}{273}$$

1	4	6	4	1
4	16	26	16	4
6	26	43	26	6
4	16	26	16	4
1	4	6	4	1

Mit Hilfe solcher Filter lassen sich anstelle von festen Schwellwerten sogenannte **adaptive Schwellwerttechniken** realisieren.

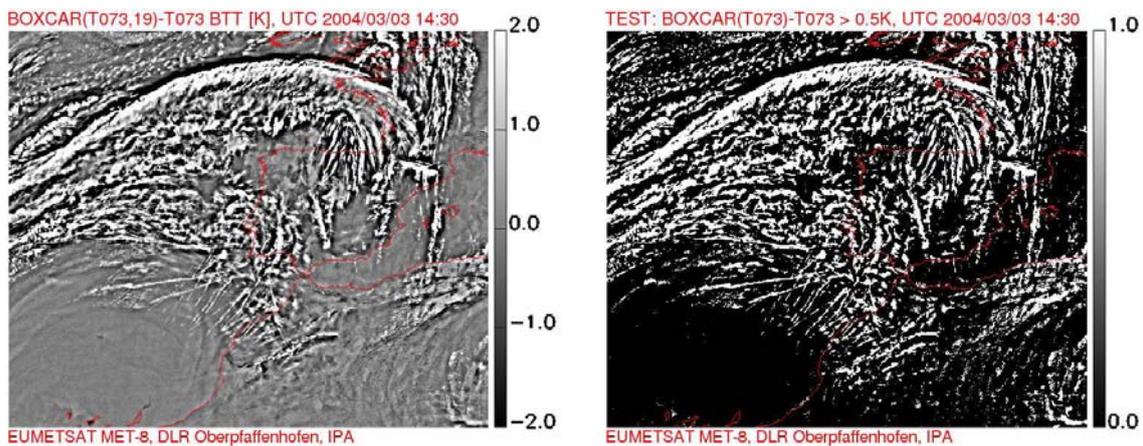


Abbildung 3.8: **Links:** Boxcar-Filter angewandt auf den Wasserdampfkanal WV.073. Das Originalbild ist vom geglätteten Bild subtrahiert. **Rechts:** Zirrusmaske als Ergebnis des morphologischen Zirrustests  $\text{BOXCAR}(T_{7.3}) - T_{7.3} > 0.5K$

In Abb. 3.8 wurde für die oben gezeigte Szene der Wasserdampfkanal im linken Bild mit einem  $19 \times 19$  Boxcar-Filter geglättet. Dann wurde das Originalbild vom geglätteten Bild subtrahiert. Man erhält die hohen Frequenzen des Bildes. Man erkennt deutlich die Kondensstreifen und dünne Zirren. Jetzt kann man mit einem Schwellenwert von z.B.  $0.5K$  eine Zirrusmaske ableiten (rechtes Bild).

Der oben beschriebene Test zeigt neben hohen Eiswolken auch sonstige Kanten im Wasserdampfbild. Daher sollte dieser Test mit weiteren Tests kombiniert werden. In Kombination mit den vorher beschriebenen Schwellwerttests bildet dieser Test ein sehr gutes Kriterium für die Erkennung von Zirren. Der Test ist ein wichtiger Bestandteil des Zirruserkennungsalgorithmus, der in Abschnitt 3.3 ausführlich beschrieben wird.

Mustererkennungsverfahren lassen sich auch zur Identifikation anderer Wolkentypen heranziehen ([KIDDER und VONDER HAAR 1995]). Räumliche Kohärenztests sind Bestandteil des APOLLO Wolkenerkennungsalgorithmus (siehe [KRIEBEL et al. 2003]). Die Zirrenerkennung von

[MANNSTEIN und SCHUMANN 2005] basiert auf Mustererkennungsverfahren, angewandt auf den Wasserdampfkanal des Meteosat-7 MVIRI. Diese Verfahren bilden die Grundlage der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten und implementierten morphologischen Zirrentests. Die Kondensstreifenkennung von [MANNSTEIN et al. 1999] basiert ebenfalls auf Mustererkennungsalgorithmen.

### 3.2.4 Weitere Möglichkeiten

In [KIDDER und VONDER HAAR 1995], S. 269ff finden viele Methoden, um Wolken mit abbildenden Radiometern wie SEVIRI zu erkennen und deren Eigenschaften zu berechnen. Einige sind in den vorhergehenden Abschnitten bereits dargestellt worden. In diesem Abschnitt sollen weitere Möglichkeiten kurz erwähnt werden.

Eine Methode ist die **Histogrammanalyse**. Sie basiert auf der Idee, dass innerhalb von Histogrammen Bildelemente mit bestimmten Eigenschaften (z.B. bewölkt oder unbewölkt) Häufungen bzw. Cluster bilden. Diese können dann mit dynamischen Clusteranalyseverfahren (siehe z.B. [DESBOIS et al. 1982]) analysiert werden.

Histogramme lassen sich verwenden, um innerhalb eines Bildes bestimmte Informationen zu verstärken, z.B. mit Hilfe von Histogrammangleichung (*engl. histogram equalization*) und Histogrammdehnung (*engl. histogram stretching*). Diese Technik wurde häufig zur Erzeugung der Falschfarbenbilder verwendet, um den Kontrast zu erhöhen. Eine anschauliche Erklärung findet sich z.B. unter: <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/gsmooth.htm>

Liegen zu einem Zeitpunkt mehrere Satellitenbilder aus verschiedenen Blickrichtungen vor, kann man mit Hilfe von geometrischen Techniken, wie der **Stereoskopie** die Wolkenoberkantenhöhe ableiten (siehe [KIDDER und VONDER HAAR 1995], S. 289).

**Neuronale Netze** können zur Bildauswertung und Klassifizierung von Wolken verwendet werden (siehe z.B. [BANKERT und AHA 1994], [MILLER und EMERY 1997]) Dazu ist ein geeigneter Trainingsdatensatz erforderlich, der nicht immer zur Verfügung steht. Der Vorteil der neuronalen Netze ist ihre Rechengeschwindigkeit. Der Nachteil ist, dass die physikalischen Zusammenhänge nicht explizit abgebildet werden.

Desweiteren ist es möglich Messungen aus abbildenden Radiometern mit Messungen von sondierenden Instrumenten wie HIRS (High-Resolution Infrared Radiation Sounder) zu kombinieren (siehe [HUTCHISON 1999]), um Zirren zu erkennen, bzw. nur sondierende Instrumente zu verwenden ([STUBENRAUCH et al. 1999]). Allerdings stehen solche Messungen nicht in der für diese Arbeit benötigten zeitlichen und räumlichen Auflösung zur Verfügung. Dies gilt auch für Messungen mit horizontsondierenden Instrumenten wie dem Microwave Limb Sounder (MLS) mit deren Hilfe Zirren detektiert werden (siehe [READ et al. 2001]).

### 3.3 MSG Cirrus Detection Algorithm (MeCiDA)

Im Rahmen dieser Arbeit wurde basierend auf den thermischen Kanälen des SEVIRI ein Zirrererkennungsalgorithmus **MeCiDA** (**M**eteosat **S**econd **G**eneration **C**irrus **D**etection **A**lgorithm) entwickelt. Dabei wurden verschiedene Schwellenwerttests mit morphologischen Tests kombiniert. Der Algorithmus erkennt hohe Eiswolken. In diesem Kapitel wird der Algorithmus vorgestellt und die verschiedenen Tests diskutiert, auf denen er basiert.

Bedingt durch die Entstehung des Algorithmus und durch die unterschiedlichen Ansätze lässt er sich in zwei Gruppen von Tests aufteilen: einen sogenannten **morphologischen Zirrustest** und einen sogenannten **Morph&Dilate Zirrustest**. In Abb. 3.19 und 3.20 ist in Flussdiagrammen der gesamte Programmablauf des Zirruerkennungsalgorithmus veranschaulicht.

#### 3.3.1 Morph&Dilate Zirrustest

Der Morph&Dilate Zirrustest basiert auf der Kombination von adaptiven und multispektralen Schwellenwerttechniken. Er setzt sich aus drei Untertests zusammen, die im folgenden als T1, T2 und T3 bezeichnet werden (siehe Abb. 3.19).

##### 3.3.1.1 Test T1

Der Test **T1** basiert auf der Helligkeitstemperaturdifferenz zweier Fensterkanäle:  $T_{10.8} - T_{12.0}$ . Das Ergebnis sind optisch dünne Eiswolken aber auch partiell bewölkte Pixel, z.B. Wolkenränder tieferer Wolken. Aus diesem Grund wird das Ergebnis verknüpft mit dem hochpassgefilterten Wasserdampfkanal WV\_073 (19 Kern), da dieser nur die hohen Wolken detektiert.

Optisch dickere hohe Eiswolken werden mit der Helligkeitstemperaturdifferenz der Wasserdampfkanäle WV\_62 und WV\_073 erkannt und zum Ergebnis hinzugezählt. In Abb. 3.9 ist das Simulationsergebnis dieses Tests in Abhängigkeit von der optischen Dicke dargestellt. Man sieht die Variation der Temperaturdifferenz für verschiedene Höhen der Wolkenoberkante.

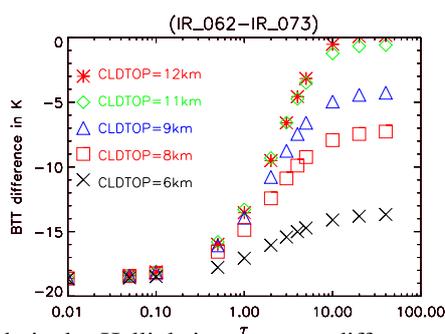


Abbildung 3.9: Simulationsergebnis der Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle WV\_062 und WV\_073 in Abhängigkeit der optischen Dicke für verschiedene Höhen der Wolkenoberkante einer Zirruswolke. Atmosphäre: Mid Latitude Summer, Satellitenblickwinkel:  $60^\circ$ , geometrische Dicke: 1 km, Effektivradius:  $6\mu\text{m}$

Der Helligkeitstemperaturdifferenztest der Fensterkanäle wird seit langem verwendet, um Zirren zu detektieren. Das Problem besteht darin, den Schwellenwert zu bestimmen, da dieser von der Bodentemperatur und vor allem von der Zusammensetzung der Atmosphäre abhängt. Eine Möglichkeit zur Verbesserung des Tests ist die Helligkeitstemperaturdifferenz der beiden Kanäle ohne die Zirruswolke von der ursprünglichen Temperaturdifferenz zu subtrahieren. In Abb. 3.10 sieht man im linken Bild die simulierte Helligkeitstemperaturdifferenz der beiden Fensterkanäle abhängig von der optischen Dicke einer Zirruswolke für verschiedene Bodentemperaturen. Im rechten Bild wurde die Helligkeitstemperaturdifferenz der wolkenfreien Atmosphäre subtrahiert. Die Variation der Temperaturdifferenz der optisch dünnen Zirren wird dadurch reduziert. Für optisch dicke Zirren vergrößert sich die Variation, so dass weniger dieser Zirren erkannt werden.

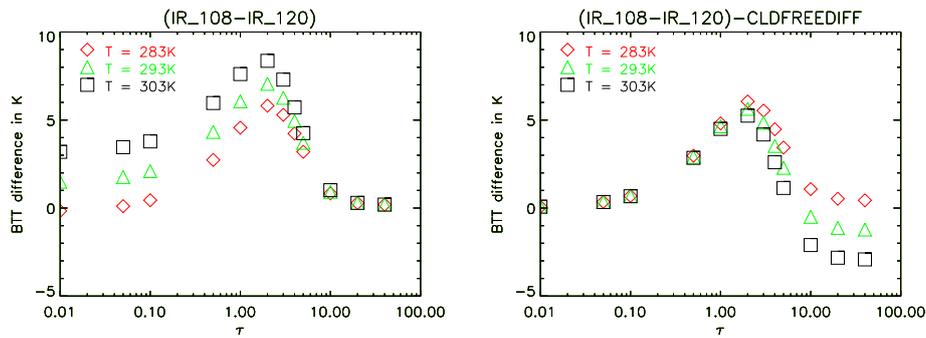


Abbildung 3.10: **Links:** Simulationsergebnis der Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR\_108 und IR\_120 in Abhängigkeit der optischen Dicke für verschiedene Bodentemperaturen. Satellitenblickwinkel:  $60^\circ$ , Wolkenoberkante: 11 km, geometrische Dicke: 1 km, Effektivradius:  $6\mu m$ . **Rechts:** Selbe Szene subtrahiert mit der Helligkeitstemperaturdifferenz der wolkenfreien Atmosphäre.

Um die Helligkeitstemperatur der zirrusfreien Atmosphäre zu bestimmen, wird in der Nachbarschaft des jeweiligen Bildelementes das wärmste Pixel gesucht. Dies lässt sich am schnellsten mit Hilfe einer Dilatationsoperation, auch Maximumoperation genannt, durchführen. Es werden aus unterschiedlich großen Gebieten ( $3 \times 3$ ,  $9 \times 9$  und  $19 \times 19$ ) die wärmsten Bildelemente gesucht, um auch Kondensstreifen in der Nähe von Küstenlinien zu erkennen.

Der Test **T1** lässt sich schreiben als:

$$\begin{aligned}
 T_{1_{3 \times 3}} &= T_{108} - T_{120} - (T_{108}_{max}^{3 \times 3} - T_{120}_{max}^{3 \times 3}) > 0.6K \quad \cap \quad T_{073_{box, 19 \times 19}} - T_{073} > 0.5 \quad K \\
 &\cup \quad T_{062} - T_{073} > -12K \\
 T_{1_{9 \times 9}} &= T_{108} - T_{120} - (T_{108}_{max}^{9 \times 9} - T_{120}_{max}^{9 \times 9}) > 0.6K \quad \cap \quad T_{073_{box, 19 \times 19}} - T_{073} > 0.5 \quad K \\
 T_{1_{19 \times 19}} &= T_{108} - T_{120} - (T_{108}_{max}^{19 \times 19} - T_{120}_{max}^{19 \times 19}) > 0.6K \quad \cap \quad T_{073_{box, 19 \times 19}} - T_{073} > 0.5 \quad K \\
 T_1 &= T_{1_{3 \times 3}} \cup T_{1_{9 \times 9}} \cup T_{1_{19 \times 19}}
 \end{aligned}$$

### 3.3.1.2 Test T2

Der Test **T2** basiert auf der Verknüpfung der Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR\_087 und IR\_120 mit dem hochpassgefilterten Wasserdampfkanal WV\_062. Für hohe, optisch dicke Zirren werden die Ergebnisse der Wasserdampfdifferenztests hinzuaddiert.

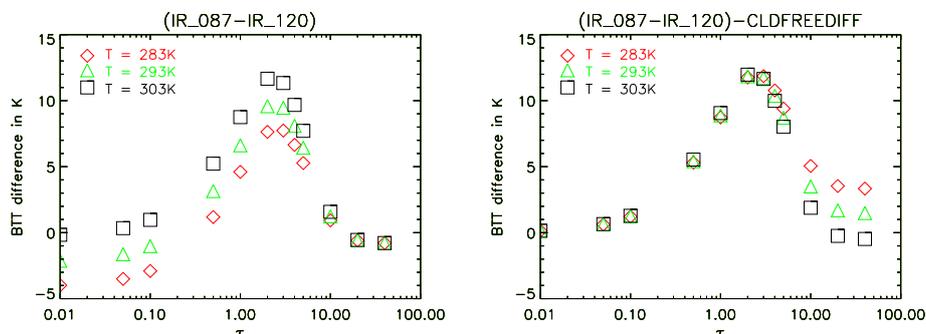


Abbildung 3.11: **Links:** Simulationsergebnis der Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR\_087 und IR\_120 in Abhängigkeit der optischen Dicke für verschiedene Bodentemperaturen. Satellitenblickwinkel:  $60^\circ$ , Wolkenoberkante: 11 km, geometrische Dicke: 1 km, Effektivradius:  $6\mu m$ . **Rechts:** Selbe Szene subtrahiert mit der Helligkeitstemperaturdifferenz der wolkenfreien Atmosphäre.

Die Simulation der Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR\_087 und IR\_120 ist in Abb. 3.11 dargestellt. Das Ergebnis ist ähnlich dem  $T_{10.8} - T_{12.0}$  Test. Allerdings ist die Eisabsorption und die

Wasserdampfabsorption im Spektralband des IR\_087 Kanals zusammen höher als die des IR\_108 Kanals. Die Eis- und Wasserdampfabsorption ist zusammen ebenfalls höher als im Spektralbereich des Kanals IR\_120. Das bedeutet, dass im Spektralband des Kanals IR\_087 Photonen aus kälteren Schichten der Atmosphäre detektiert werden. Für eine wolkenfreie Atmosphäre ist die Helligkeitstemperatur des Kanals IR\_087 niedriger als die des Kanals IR\_120. Enthält die Atmosphäre eine optisch dünne Zirruswolke, wird der Beitrag der Eisabsorption relativ zum Wasserdampf mit steigender optischer Dicke größer, da im Kanal IR\_120 Eis eine höhere Absorption hat als im Kanal IR\_087 (siehe Abb. 3.12). Die Helligkeitstemperatur des Kanals IR\_120 nimmt daher stärker ab. Die Helligkeitstemperaturdifferenz wird positiv und steigt mit der optischen Dicke der Zirruswolke. Für optisch dicke Zirren wird die Differenz wieder geringer, da in beiden Kanäle die Temperatur der Zirruswolke gemessen wird.

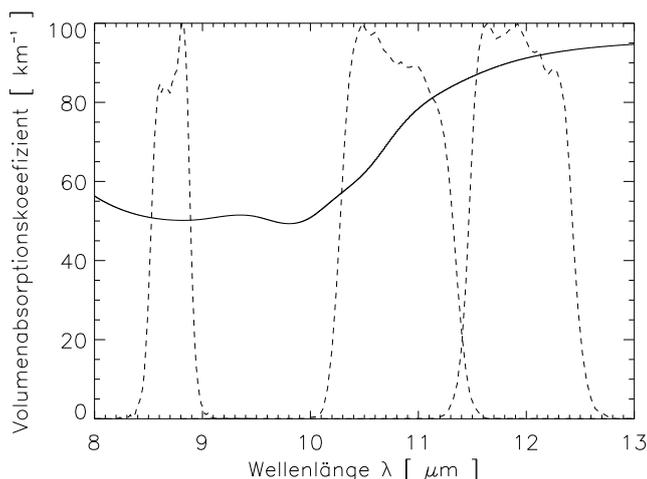


Abbildung 3.12: Volumenabsorptionskoeffizient von Eispartikeln (durchgezogene Linie) im Vergleich mit den SEVIRI Kanälen IR\_087, IR\_108 und IR\_120 (gestrichelte Linien). Effektivradius:  $10\mu\text{m}$ , Eiswassergehalt  $1\frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ , Form: hexagonal. Simuliert mit **clpdp** aus dem libRadtran Paket. Eisparametrisierung aus [KEY et al. 2002].

Um die Helligkeitstemperatur des zirrusfreien Bildelementes abzuschätzen, wird die Nachbarschaft des Bildelementes wie im T1-Test mit einem  $19 \times 19$  Kernel nach dem wärmsten Bildelement abgesehen. Der Test eignet sich gut, um dünne Zirruswolken zu erkennen, allerdings zeigt sich über ariden Gebieten eine hohe Fehlerrate. Aus diesem Grund wird das Ergebnis mit dem hochpassgefiltertem Wasserdampfkanal WV\_062 verknüpft, der im Vergleich zum Kanal WV\_073 Photonen aus höheren Schichten der Atmosphäre detektiert.

Ein weiterer Test, um Zirren zu detektieren, basiert auf der Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR\_087 und IR\_108 (Abb. 3.13).

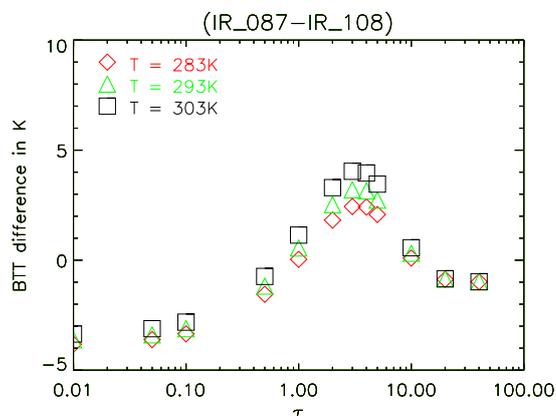


Abbildung 3.13: Simulationsergebnis der Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR\_087 und IR\_108 in Abhängigkeit der optischen Dicke für verschiedene Bodentemperaturen. Satellitenblickwinkel:  $60^\circ$ , Wolkenoberkante: 11 km, geometrische Dicke: 1 km, Effektivradius:  $6\mu\text{m}$ . [ACKERMAN et al. 1996] und [ROSKOVENSKY und LIOU 2003] verwendeten ähnliche Kanäle, um

aus MODIS-Daten<sup>3</sup> Zirren abzuleiten. Dieser Test verhält sich ähnlich zu dem vorher besprochenen Test  $T_{8.7} - T_{12.0}$ . Die Temperaturdifferenz im Falle von Zirren ist jedoch geringer, d.h. der Kontrast der Zirren ist niedriger. Desweiteren sind die Fehler, die über ariden Gebieten wie der Sahara auftreten, größer. Aus diesem Grund wurde der Test mit einem restriktiven Schwellenwert  $T_{8.7} - T_{10.8} > 0K$  angepasst. Auf die Subtraktion der zirrusfreien Atmosphäre wurde verzichtet. Der Test erkennt Zirren mit der optischen Dicke von ca. 0.5 bis 10 und detektiert homogen ausgebreitete Zirren, die wiederum vom vorher besprochenen Test weniger gut erkannt werden, da dieser mit einem Hochpassfilter verknüpft ist.

Der Test **T2** lässt sich schreiben als:

$$T2_1 = T087 - T120 - (T087_{max}^{19 \times 19} - T120_{max}^{19 \times 19}) > 1.6K \cap T062_{box, 19 \times 19} - T062 > 0.5K$$

$$T2_2 = T062 - T073 > -12K$$

$$T2_3 = T087 - T108 > 0K$$

$$T2 = T2_1 \cup T2_2 \cup T2_3$$

### 3.3.1.3 Test T3

Der Test **T3** basiert auf der Helligkeitstemperaturdifferenz des Ozonkanals IR\_097 und des  $CO_2$  Kanals IR\_134. Da dieser Test von der Bodentemperatur abhängt, wird die Helligkeitstemperaturdifferenz der zirrusfreien Atmosphäre bestimmt und vom Ergebnis subtrahiert. Das Ergebnis wird mit dem hochpassgefiltertem Wasserdampfkanal WV\_073 verknüpft. Dieser Test eignet sich, um dünne Zirren über tieferer Bewölkung zu detektieren, da Zirren, wie man im Helligkeitsdifferenzbild der Abb. 3.14 sieht, aufgrund des hohen Kontrastes auch über tiefen Wasserwolken deutlich erkennbar sind.

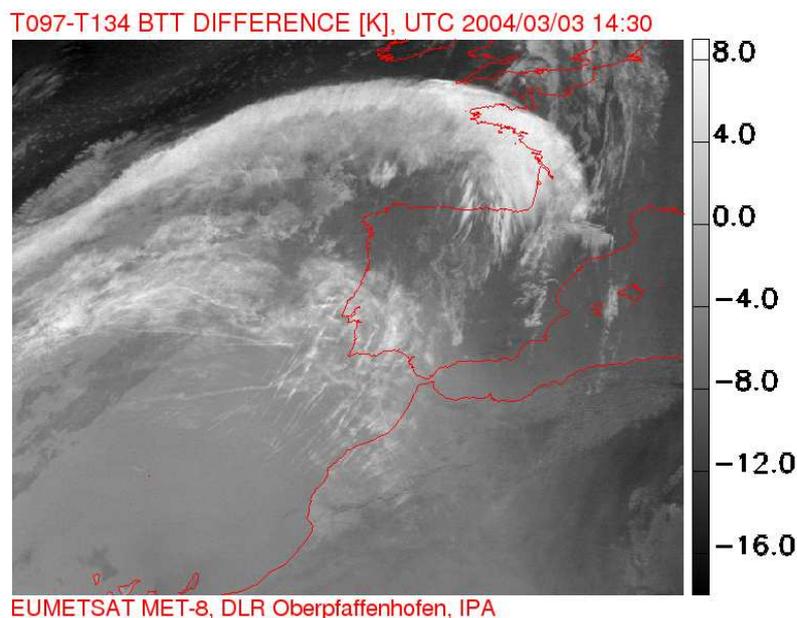


Abbildung 3.14: Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR\_097 und IR\_134.

In Abb. 3.14 ist die Helligkeitstemperaturdifferenz der Wasserdampfkanäle für eine Szene für den 3. März 2004 14:30 UTC abgebildet.

<sup>3</sup>Das MODIS Instrument wird in Abschnitt 3.4 besprochen

Abb. 3.15 zeigt die Simulation der Helligkeitstemperaturdifferenz in Abhängigkeit der optischen Dicke und für verschiedene Bodentemperaturen. Im rechten Bild wurde die Helligkeitstemperatur der zirusfreien Atmosphäre subtrahiert.

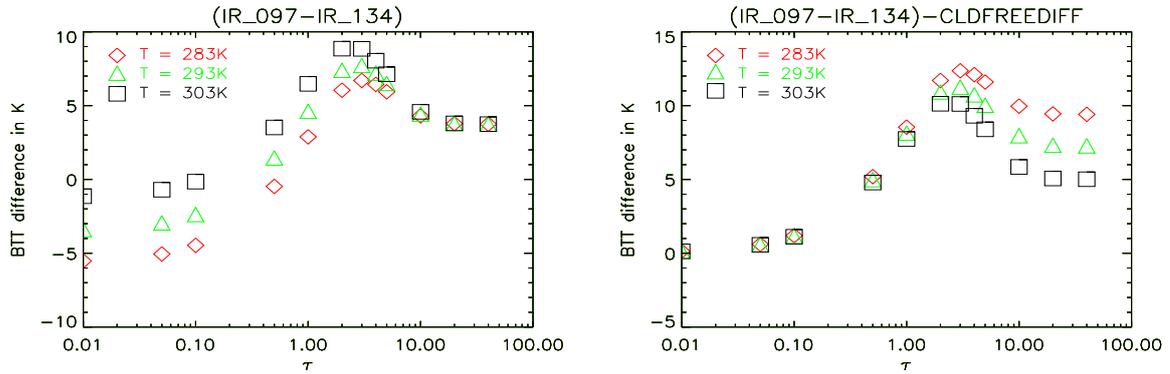


Abbildung 3.15: **Links:** Simulationsergebnis der Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR\_097 und IR\_134 in Abhängigkeit der optischen Dicke für verschiedene Bodentemperaturen. Satellitenblickwinkel:  $60^\circ$ , Wolkenoberkante: 11 km, geometrische Dicke: 1 km, Effektivradius:  $6\mu\text{m}$ . **Rechts:** Selbe Szene subtrahiert mit der Helligkeitstemperaturdifferenz der wolkenfreien Atmosphäre.

Optisch dicke hohe Eiswolken werden mit dem Wasserdampfdifferenztest bestimmt. Der gesamte Test T3 lässt sich schreiben mit:

$$\begin{aligned}
 T_{21} &= T_{097} - T_{134} - (T_{097}_{max}^{19 \times 19} - T_{134}_{max}^{19 \times 19}) > 3.5K \cap T_{073}_{box, 19 \times 19} - T_{073} > 0.5K \\
 T_{32} &= T_{062} - T_{073} > -12K \\
 T_3 &= T_{31} \cup T_{32}
 \end{aligned}$$

### 3.3.2 Morphologische Zirrustests

Der morphologische Zirrustest ist eine Kombination verschiedener Hochpassfilter, angewandt auf die Wasserdampfkanäle. Die Ergebnisse werden kombiniert mit den Helligkeitstemperaturen des Kanals IR\_134 und mit der Temperaturdifferenz der Kanäle IR\_097 und IR\_134. Der Test setzt sich aus drei Untertests zusammen, die als T4, T5 und T6 bezeichnet werden.

#### 3.3.2.1 Test T4

Der Test **T4** ist eine Kombination zweier auf den Wasserdampfkanal WV\_073 angewandten Hochpassfilter, die mit der Helligkeitstemperatur des Kanals IR\_134 verknüpft werden. Der BOXCAR Filter liefert die tiefen Frequenzen des Wasserdampfbildes. Zieht man von dem geglätteten Bild das Originalbild wieder ab, bekommt man die hohen Frequenzen des Wasserdampfes, die mit einem festen Schwellenwert die Zirusmaske liefern. Ähnlich aufgebaut ist der Gaußfilter. Der Unterschied zum BOXCAR Filter ist, dass beim Glätten die entfernteren Punkte weniger stark gewichtet werden. Das Bild wird mit einem modifizierten Gauß-Kern geglättet. Der Kernel berechnet sich mit der Funktion:

$$K(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \frac{s}{4}} e^{-\frac{x^2+y^2}{2 * (\frac{s}{4})^2}} \quad (3.14)$$

NK ist Normierungskonstante (Flächenintegral).  $s$  ist die Größe des Kerns. In unserem Fall ist  $s=15$ . ( $15 \times 15$  Kern). Die gesamte Operation lässt sich schreiben mit:

$$g(i, j) = (f(i, j) \odot K(s) - f(i, j))^2 \odot K(s) \quad (3.15)$$

Wie man in Gl. 3.15 erkennt, werden die hohen Frequenzen geglättet. Dadurch wird das Rauschen minimiert, welches durch einen Hochpassfilter versärkt würde. Das Ergebnis wird mit dem  $CO_2$ -Kanal IR\_134 verknüpft, um die Variabilität des Wasserdampfes in tieferen Schichten nicht zu detektieren. Sehr kalte räumlich ausgedehnte Wolken werden wieder hinzugezählt. Die Erkennung erfolgt mit dem Kanal IR\_134. Der gesamte Test T4 lässt sich schreiben als:

$$\begin{aligned} T4 = & T073_{box,15 \times 15} - T073 > 0.5K \cap T073_{gauss,15 \times 15} > 0.5K \cap T134 < 253K \\ & \cup T134 < 233K \end{aligned}$$

### 3.3.2.2 Test T5

Der Test **T5** ist analog zu dem vorhergehendem Test T4. Die Filter werden jedoch auf die Helligkeitstemperaturdifferenz der Wasserdampfkanäle angewandt. Der Test lässt sich schreiben als:

$$\begin{aligned} T5 = & (T062 - T073)_{box,15 \times 15} - (T062 - T073) > 1K \cap (T062 - T073)_{gauss,15 \times 15} > 1K \\ & \cap T134 < 253K \cup T134 < 233K \end{aligned}$$

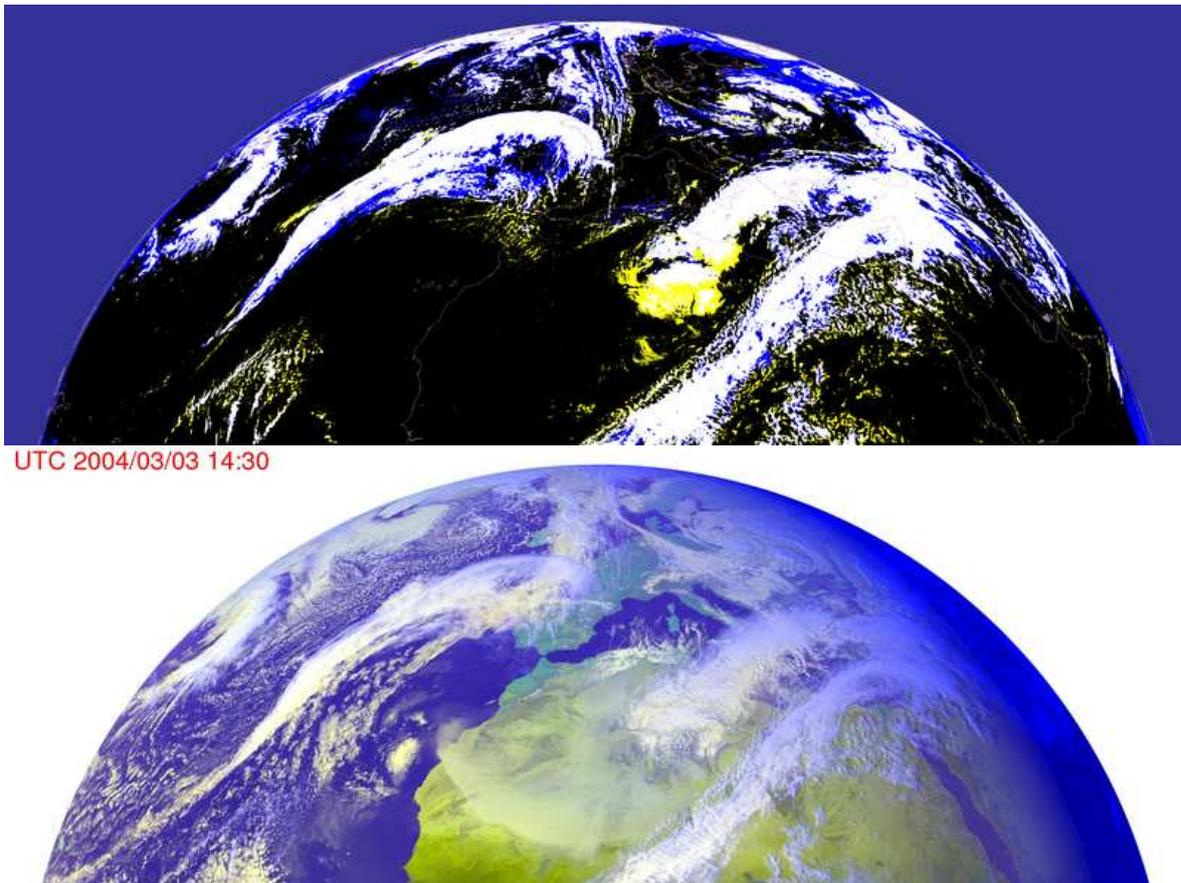
### 3.3.2.3 Test T6

Der Test **T6** ist eine Kombination verschiedener Schwellenwerttests, basierend auf den Kanälen IR\_097 und IR\_134. Die Temperaturdifferenz der Kanäle IR\_097 und IR\_134 ist dabei stark vom Satellitenzenitwinkel abhängig. Je größer der Blickwinkel, desto größer ist die Temperaturdifferenz. Kombiniert mit dem Schwellenwerttest, basierend auf den Kanal IR\_134, ist dieser Test gut geeignet, um Zirren z.B. über Mitteleuropa zu erkennen. Kalte, optisch dicke Zirren werden allein mit dem Kanal IR\_134 erkannt.

$$T6 = T097 - T134 > -7K \cap T134 < 258K \cup T134 < 243K$$

### 3.3.3 Zusammenfassung

Die oben beschriebenen Tests T1 bis T6 werden zusammen zu einer Zirrusmaske addiert. Dabei sind einige der Tests bewusst so gewählt, dass sie redundant sind, da teilweise Segmente in den unterschiedlichen Kanälen durch Übertragungsfehler oder auch durch Fehler in der Georeferenzierung der Kanäle unbrauchbar werden. Der Algorithmus gibt eine binäre Entscheidung, ob das entsprechende Bildelement eine Zirruswolke enthält oder nicht. In Abb. 3.16 ist für den 3. März 2004 ein Falschfarbenbild und das Ergebnis des Zirrenerkennungsalgorithmus dargestellt. Die Zirren sind unterschiedlich gefärbt als GIF Bilder für die Monate Februar bis Dezember 2004 gespeichert. Dies war im Rahmen der Entwicklung und Verbesserung der Zirrustests notwendig. Für weitere Auswertung wird nicht zwischen den einzelnen Tests unterschieden.<sup>4</sup>



**Abbildung 3.16:** **Oben:** Ergebnis des MeCiDA-Zirrustests für die oberen 3 Segmente in Satellitenprojektion. Die Zirren sind unterschiedlich gefärbt dargestellt. Blau sind die Ergebnisse der Tests T4, T5 und T6. Gelb sind die Ergebnisse der Tests T1, T2 und T3. Weiß sind die von beiden Kombinationen erkannten Zirren. **Unten:** Zum Vergleich ein Falschfarbenbild der selben Szene. Datum: 2004/03/03. Zeit: 14:30 UTC.

Die Schwellenwerte des Algorithmus wurden anhand der Daten des Mai 2004 angepasst. Dies war einer der ersten Monate für den sowohl ein vollständiger Flugverkehrsdatensatz als auch MSG Daten zur Verfügung standen. Zudem konnten im Mai 2004 viele Kondensstreifen über Europa beobachtet werden. Zum Anpassen der Schwellenwerte wurden die Ergebnisse mit Falschfarbenbildern, die aufgrund der Nutzung des HRV-Kanals eine höhere räumliche Auflösung haben, visuell verglichen. Desweiteren wurden Falschfarbenbilder in ihrer zeitlichen Entwicklung mit den Ergebnissen verglichen. In der dynamischen Bildabfolge sind die unterschiedlichen Bewegungen der einzelnen Atmosphärenschichten erkennbar. Dies verbessert die Entscheidung, ob es sich um eine Zirruswolke handelt oder nicht. Da sich in dieser Arbeit die Untersuchungen auf das Gebiet Europa und den Nordatlantik konzentrieren, wurde auch der Algorithmus für entsprechende Atmosphären und Breiten angepasst.

<sup>4</sup>Bemerkung: Das Falschfarbenbild zeigt über der Sahara einen der größten Sandstürme, die mit MSG beobachtet werden konnten. Einen Film dieses Sandsturms findet man unter:  
[http://www.pa.op.dlr.de/contrails/loops/sand\\_movie.gif](http://www.pa.op.dlr.de/contrails/loops/sand_movie.gif).

Der Fehler in der Erkennung steigt für hohe Satellitenzenitwinkel. Für die Auswertung wurden nur Satellitenzenitwinkel kleiner als  $75^\circ$  berücksichtigt.

Mit Hilfe des oben beschriebenen Algorithmus wurde für das Jahr 2004 (außer Januar<sup>5</sup>) für die nördlichen 3 Segmente des SEVIRI eine Zirrusmaske berechnet. Die Zirrusmaske wurde in der Satellitenprojektion gespeichert und anschließend in die äquidistante Projektion, in der der Flugverkehr zur Verfügung stand, transformiert<sup>6</sup>. Diese Daten liegen in äquidistanter zylindrischer Projektion in einer Auflösung von  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  vor. Die transformierte zylindrische Zirrusmaske enthält einen Bedeckungsgrad pro  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  Box für das im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Gebiet  $80^\circ W - 50^\circ O, 20^\circ N - 75^\circ N$  (siehe Beispielszene in Abb. 3.17). Dieses Gebiet enthält Europa, große Teile des Nordatlantik und Nordafrika und umfasst ca. 8% der Erdoberfläche. Innerhalb dieses Gebiets liegen Regionen mit sehr hohem Flugverkehrsaufkommen.

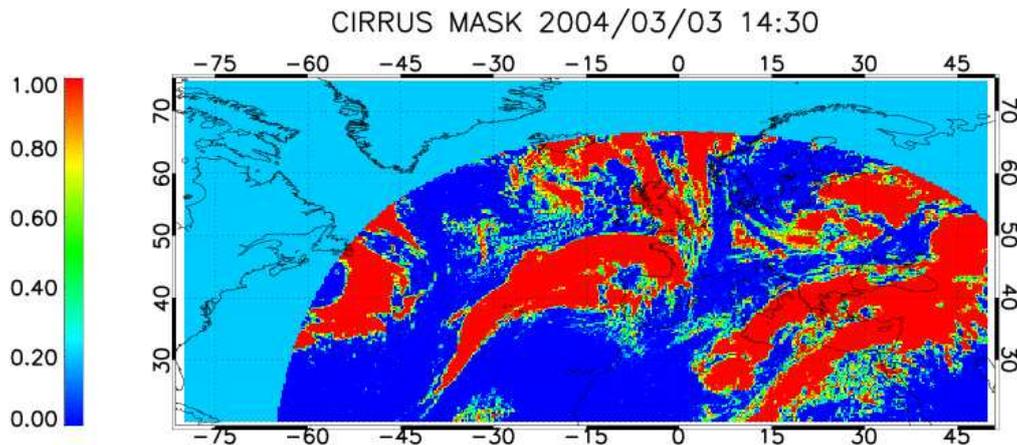


Abbildung 3.17: Das Ergebnis des MeCiDA Zirrenerkennungsalgorithmus projiziert auf eine äquidistante zylindrische Projektion. Hellblau sind die Gebiete mit einem Satellitenzenitwinkel größer  $75^\circ$ . Datum: 2004/03/03. Zeit: 14:30 UTC. Koordinaten:  $80^\circ W - 50^\circ O, 20^\circ N - 75^\circ N$ .

Für das CONTRAILS Projekt und evtl. spätere Untersuchungen wurden zusätzlich aus den abgeleiteten äquidistanten Zirrusdichtemasken mittlere Bedeckungsgrade für 6-h Intervalle berechnet. Ein solches Produkt ist in Abb. 3.18 veranschaulicht.

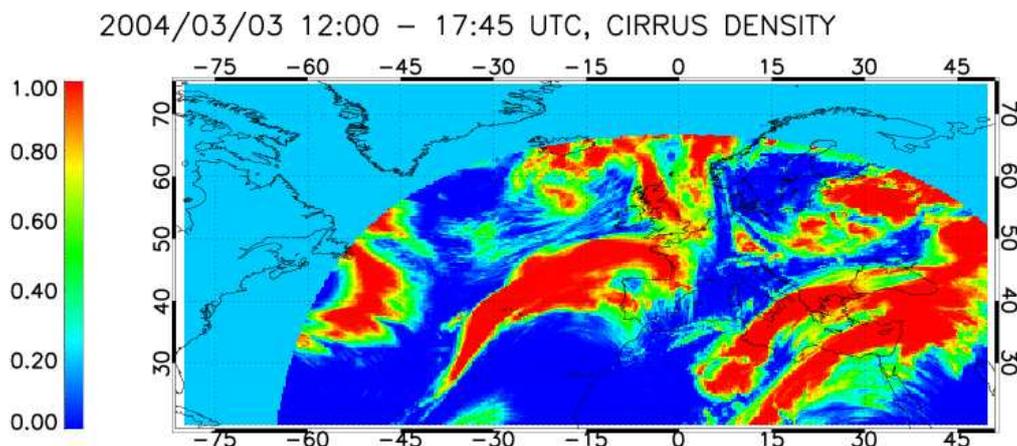


Abbildung 3.18: Mittlere Zirrusdichte in äquidistanter zylindrischer Projektion für das Intervall 12:00-17:45 UTC, 2004/03/03. Hellblau sind die Gebiete mit einem Satellitenzenitwinkel größer  $75^\circ$ .

In Abbildung 3.19 und Abbildung 3.20 ist das Flussdiagramm des MeCiDA-Zirruerkennungsalgorithmus dargestellt.

<sup>5</sup>Für den Januar stehen nicht genügend MSG-Daten zur Verfügung, da der MSG erst seit Ende Januar im operationellen Betrieb ist.

<sup>6</sup>Die Daten sind auf einem RAID Archiv des IPA-Oberpfaffenhofen im IDL-SAV-Format und als Quicklook-GIF verfügbar.

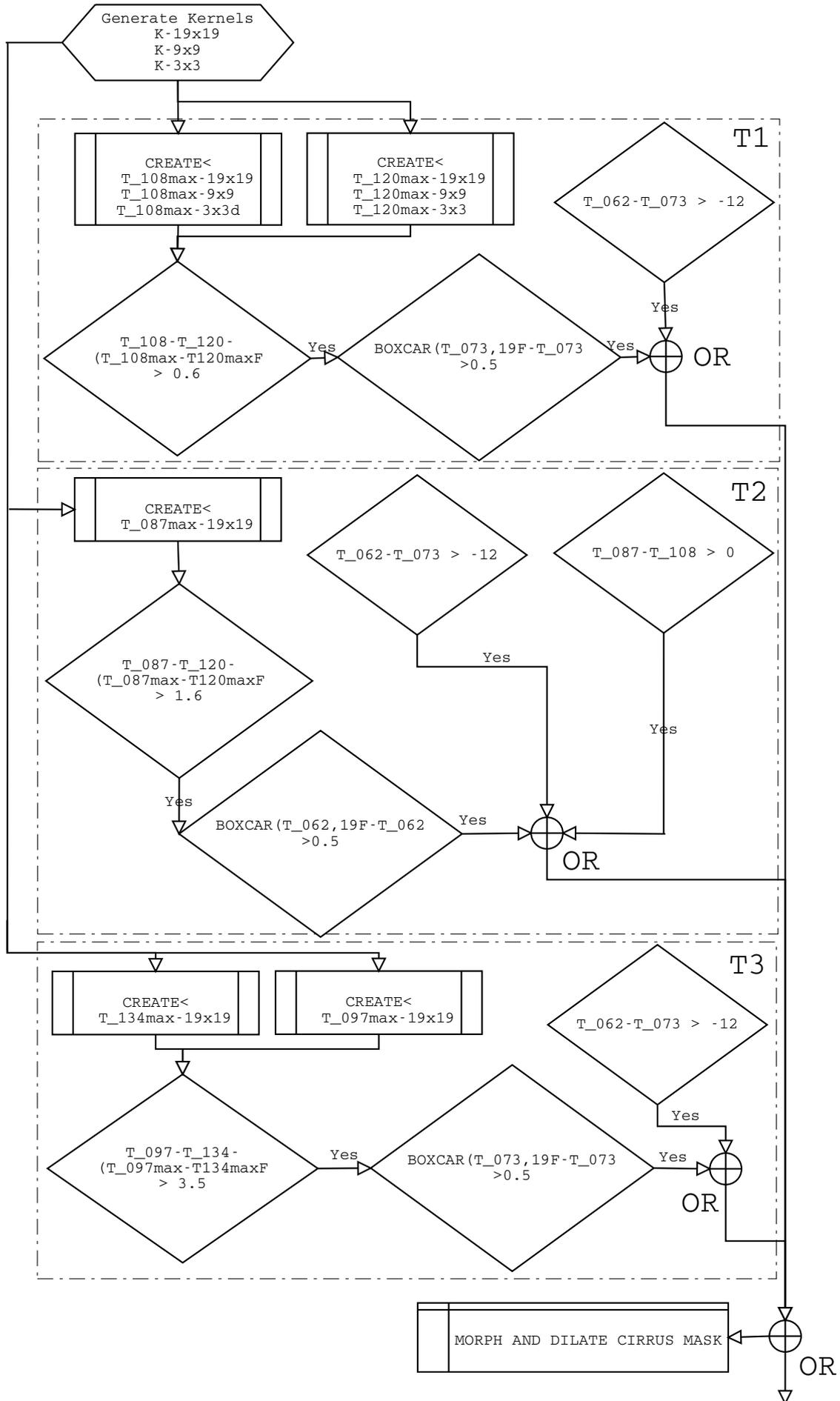


Abbildung 3.19: Morph & Dilate-Zirrustest

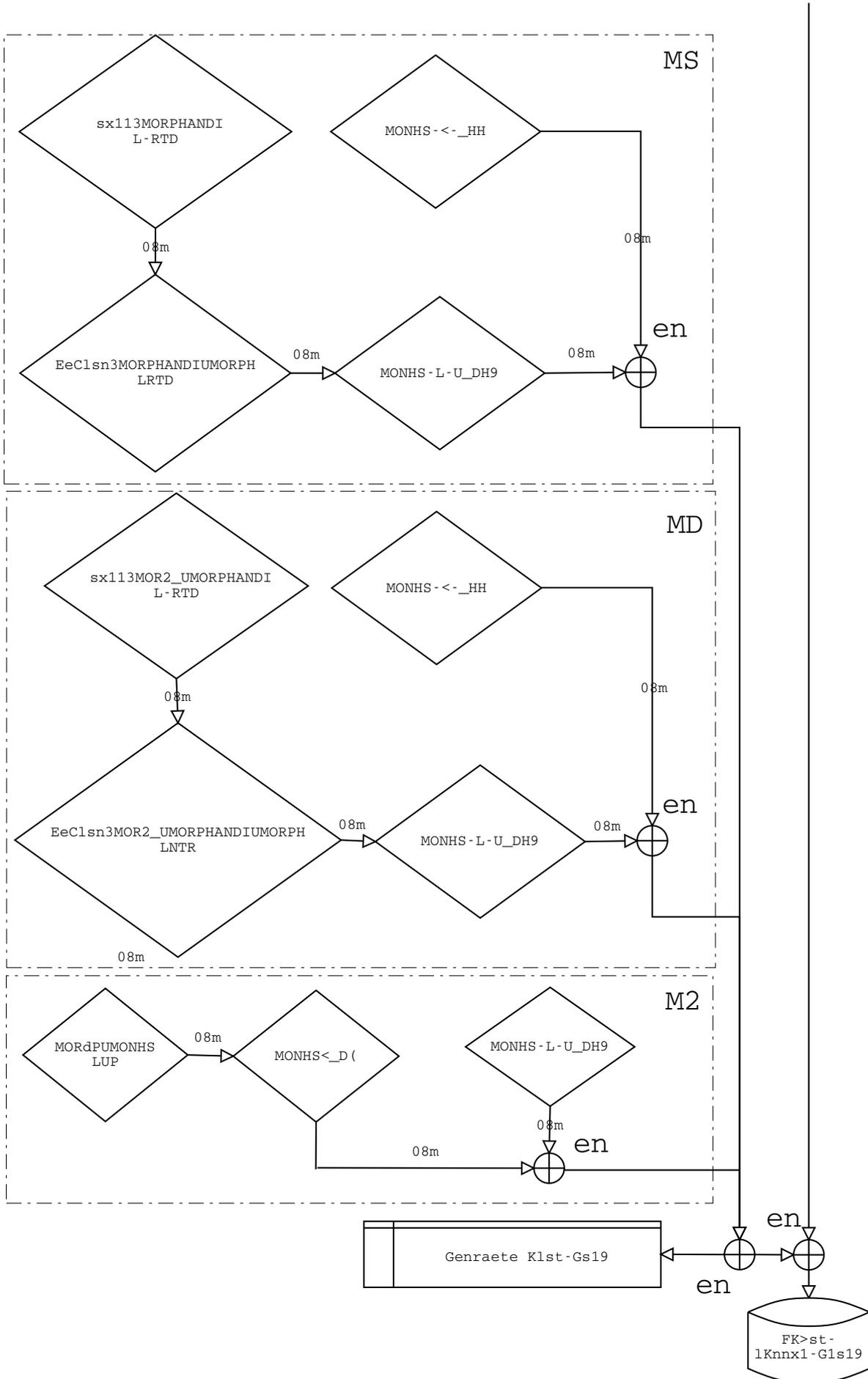


Abbildung 3.20: Morphologischer Zirrtest

### 3.4 Validierung der Zirrusmaske

In diesem Abschnitt wird die Validierung der MeCiDA Zirrusmaske vorgestellt. Die aus SEVIRI abgeleiteten Zirrusmasken wurden mit verschiedenen unabhängigen Datensätzen verglichen. Die Validierung wurde anhand von Einzelszenen und mit Monatsmittelwerten durchgeführt.

Die MeCiDA Zirrusmasken wurden mit den aus MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Messungen abgeleiteten Zirrusmasken validiert. MODIS ist ein abbildendes Radiometer mit einer hohen räumlichen Auflösung von bis zu  $250m \times 250m$ . MODIS ist Teil der Instrumentierung zweier polarumlaufender NASA-Satelliten AQUA und TERRA. Das MODIS Instrument hat 35 spektrale Kanäle und eignet sich aufgrund der höheren räumlichen Auflösung, um die aus SEVIRI abgeleiteten Zirrusmasken zu validieren. MODIS-Produkte sind ihrerseits mit Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) validiert (siehe [HART et al. 2005], [MAHESH et al. 2004]).

#### 3.4.1 Vergleich mit Einzelszenen

Die abgeleiteten Zirrusmasken sind Bestandteil der MOD06\_L2 Level 2 Wolkenprodukte und liegen in der Auflösung von  $1km \times 1km$  vor. Die Beschreibung der Produkte findet man in: [MENZEL und STRABALA 2002], [KING et al. 1997]. Die Produkte sind über das Distributed Active Archive Center (DAAC), <http://daac.gsfc.nasa.gov> verfügbar.

Für die Validierung wurde der Cirrus Reflectance Flag aus der MOD06\_L2 Produktreihe verwendet. Dieses Produkt ist nur während des Tages erhältlich, da solare Kanäle zur Erstellung verwendet werden. Daher ist diese Validierung auf Tagesszenen beschränkt. Da die MeCiDA Zirrusmaske auf infrarote Kanäle aufbaut, ist die Funktionsweise des Algorithmus nicht von der Tageszeit abhängig. Damit bietet die Validierung bei Tageszeit Aufschluss über die gesamte 24h Periode. Eventuelle Fehler, die mit dem Tagesgang der Oberflächentemperatur zusammenhängen, werden nicht berücksichtigt.

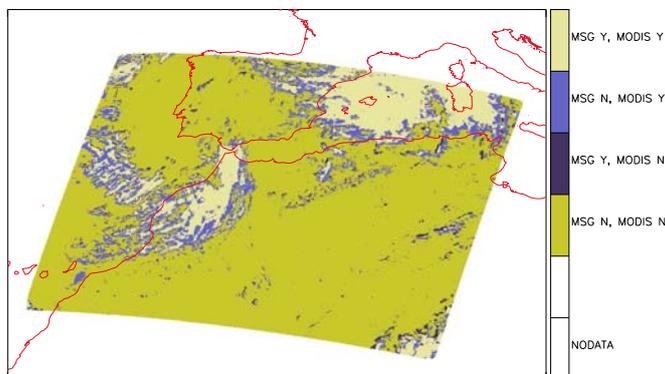


Abbildung 3.21: Vergleich der Ergebnisse des SEVIRI MeCiDa-Algorithmus mit MODIS-Terra Cirrus Reflectance Flag aus MOD06\_L2. Datum: 2004/05/31 11:00 UTC

Für die Validierung wurden die MODIS-Daten in die MSG Satellitenprojektion projiziert. In Abb. 3.21 ist ein Vergleich der Ergebnisse der beiden Algorithmen für den 2004/05/31 11:00 UTC dargestellt. Man sieht eine deutliche Übereinstimmung der Ergebnisse (grüne und gelbe Farbe). Der Vergleich zeigt, dass der MODIS-Algorithmus vor allem an den Wolkenrändern mehr Zirren erkennt als der MeCiDA Algorithmus. Man erkennt auch, dass die MeCiDA-Daten leicht verschoben gegenüber den MODIS-Daten sind. Der Grund hierfür sind die unterschiedlichen Zeitpunkte der Bildaufnahmen. MSG scannt von Süd nach Nord und ist ca. 11:07 UTC mit der Aufnahme der dargestellten Region fertig. MODIS beginnt die Aufnahme der Region um 11:00. Durch Windverschiebung werden die Wolken verlagert, so dass einige der räumlich dünnen Wolken von beiden Instrumenten an verschiedenen Orten zu sehen sind. Für unsere Untersuchungen wurden die Zeitpunkte so gewählt, dass die Zeitdifferenz im Mittel unter 7 Minuten liegt. In Tabelle 3.1 sind die Ergebnisse des Vergleiches beider Zirrusmasken dargestellt:

MeCiDA erkennt in diesem Fall 50225 von 85110 der von MODIS als Zirrus zugewiesenen Bildelemente. Das entspricht ca. 59%. Insgesamt werden ca. 88% der Bildelemente durch beide Instrumente

2004/05/31 11:00 UTC	MeCiDA Zirrus	MeCiDA kein Zirrus	Gesamt
MODIS Zirrus	50225	34885	85110
MODIS kein Zirrus	10001	275139	285140
Gesamt	60226	310024	370250

Tabelle 3.1: Vergleich MeCiDA Zirren mit MODIS Zirren. Datum: 2004/05/31 11:00 UTC

gleich bewertet. Dies ist ein sehr gutes Ergebnis, da MODIS eine höhere räumliche Auflösung von  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  hat.

Insgesamt wurde im Zeitraum Februar bis Dezember 2004 ein Termin pro Monat zufällig ausgewählt. Alle Vergleiche sind in Anhang A.1 dargestellt.

### Zusammenfassung Validierung der Einzelszenen

Die durchgeführten und in Anhang A.1 dargestellten Vergleiche zeigen für die meisten Szenen eine gute Übereinstimmung des MeCiDA Algorithmus mit MODIS. Die größten Abweichungen zeigen die Szenen in hohen Breiten z.B. in der Nähe von Neufundland (siehe Abb. A.3), über Nordosteuropa (siehe Abb. A.11) und dem Nordatlantik zwischen Grönland und Island (siehe Abb. A.5). Der Vergleich über der Nordsee und Nordwesteuropa (siehe Abb. A.1, A.8 und A.10) zeigt eine gute Übereinstimmung, obwohl für den Februar und November in dieser Region eine Überschätzung des Zirrusbedeckungsgrades durch den MeCiDA Algorithmus zu erwarten war. Im März wurde eine Szene über Nordafrika und dem östlichen Mittelmeer ausgesucht (siehe Abb. A.2). Man sieht Unterschiede über Ostanatolien und vor allem über Wüstengebieten in Nordafrika und der Sinai Halbinsel. Eine genauere Betrachtung mit Hilfe des hochauflösenden HRV-Kanals (siehe Abb. 3.22) zeigt, dass hier die vom MODIS-Algorithmus klassifizierten Zirren über Ostanatolien und Nordafrika falsch interpretiert wurden. Über der Sinai Halbinsel ist eine Wolkenstruktur zu sehen, die visuell schwieriger zu klassifizieren ist. Betrachtet man die zeitliche Abfolge, d.h. einen MSG Satellitenfilm, erkennt man einen sich auflösenden tiefen Stratus (siehe <http://www.pa.op.dlr.de/contrails/loops/20040309.sinai.loop.gif>). D.h. mit Hilfe der dynamischen Auswertung lässt sich zeigen, dass der MODIS-Algorithmus den Zirrus über der Sinai Halbinsel falsch klassifiziert hat. Ein zweiter Vergleich über Nordafrika zeigt eine sehr gute Übereinstimmung (siehe Abb. A.6). Ebenfalls sehr gut ist die Übereinstimmung im westlichen Nordatlantik (siehe Abb. A.7) trotz des großen Satellitenzenitwinkels. Auch über Mitteleuropa zeigen die Vergleiche gute Ergebnisse (siehe Abb. A.10 und A.9). In Tabelle 3.2 sind alle Vergleiche zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 3.2: Vergleich MODIS Cirrus Reflectance Flag mit MeCiDA Ergebnissen.

Datum	Übereinstimmung in der Klassifizierung	MODIS Zirren von MeCiDA detektiert
2004/02/12 11:15	81%	71%
2004/03/09 08:45	83%	60%
2004/04/22 14:00	70%	39%
2004/05/31 11:00	88%	59%
2004/06/05 12:45	74%	50%
2004/07/23 09:30	99%	16%
2004/08/14 14:00	91%	71%
2004/09/17 12:00	80%	88%
2004/10/03 10:15	80%	68%
2004/11/14 11:00	78%	63%
2004/12/03 09:45	62%	72%
Mittelwert	81%	60%

Insgesamt zeigen die Vergleiche der Einzelszenen gute Übereinstimmung mit den MODIS Ergebnissen. Im Mittel wurden 81% der Bildelemente gleich klassifiziert. 60% der mit MODIS erkannten Zirren wurden von MeCiDA detektiert.

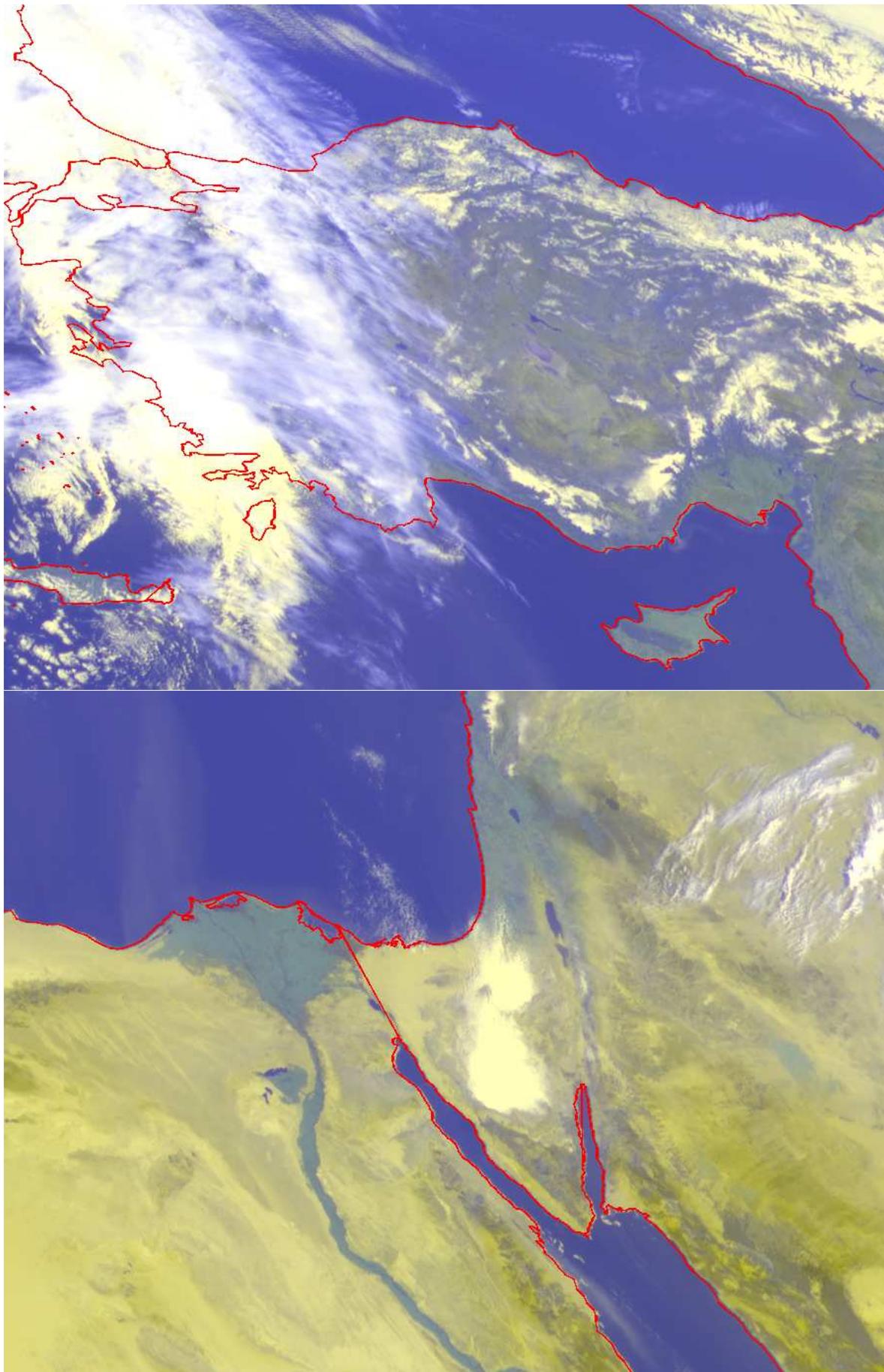


Abbildung 3.22: **Oben:** Falschfarbenbild mit HRV-Kanal über Anatolien. Datum: 2004/03/09 08:45 UTC.  
**Unten:** Falschfarbenbild mit HRV-Kanal über der Sinai Halbinsel. Datum: 2004/03/09 08:45 UTC.

### 3.4.2 Vergleich mit Monatsmittelwerten

Neben den Vergleichen der Einzelszenen wurden Monatsmittelwerte aus den MODIS Daten mit den MeCiDA Monatsmittelwerten verglichen. Die Monatsmittelwerte sind Bestandteil der MODIS **MYD08\_M3** Level 3 Produkte. Die Beschreibung der Produkte findet man in: [KAUFMAN und TANRÉ 1998], [GAO und KAUFMANN 1998], [MENZEL und STRABALA 2002], [KING et al. 1997], [MENZEL et al. 1997]. Die Produkte sind über das **Distributed Active Archive Center (DAAC)**, <http://daac.gsfc.nasa.gov> verfügbar. Die Monatsmittelwerte liegen in einer äquidistanten zylindrischen Projektion in  $1^\circ \times 1^\circ$  Auflösung vor.

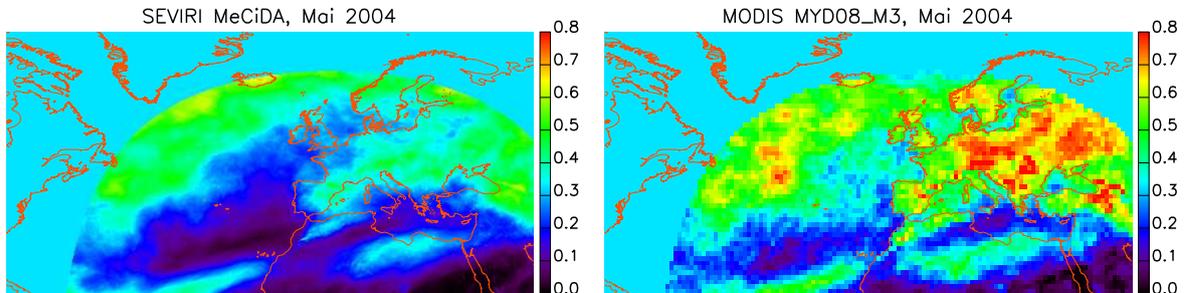


Abbildung 3.23: **Links:** Der SEVIRI MeCiDA Monatsmittelwert, Monat Mai 2004 für das **CONTRAILS** Gebiet:  $80^\circ W, 50^\circ O, 20^\circ N, 75^\circ N$ . **Rechts:** MODIS Cirrus\_Fraction\_SWIR\_FMean Zirrus Monatsmittelwert aus MYD08\_M3, Monat Mai 2004.

In Abb. 3.23 sind für den Monat Mai die Monatsmittelwerte aus den SEVIRI-Daten dargestellt im Vergleich zu den Monatsmittelwerten aus MODIS MYD08\_M3, **Cirrus\_Fraction\_SWIR\_FMean** Produkten. Die Cirrus\_Fraction\_SWIR\_FMean Produkte sind aus den Level 3 Tagesmittelwerten berechnet und beinhalten sowohl Tests basierend auf den solaren MODIS Kanälen als auch Tests, die thermische Kanäle nutzen. Man sieht deutlich, dass MODIS mehr Zirren erkennt als der MeCiDA Algorithmus. Die Gebiete mit einer hohen Zirrusrücklage in den MODIS-Daten heben sich in SEVIRI-Daten ebenfalls hervor.

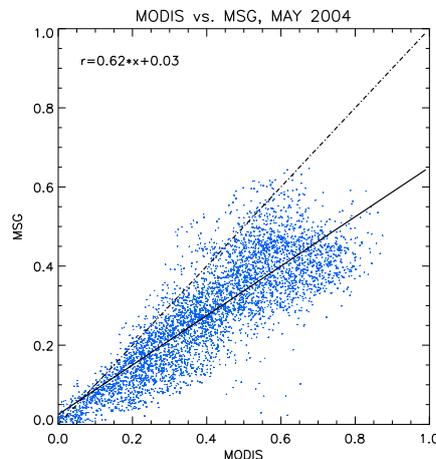


Abbildung 3.24: Vergleich der MeCiDA Monatsmittelwerte und der MODIS SWIR Zirrus Monatsmittelwerte aus MYD08\_M3, Mai 2004.

Trägt man die Mittelwerte für jedes Bildelement gegeneinander auf, ergibt sich der in Abb. 3.24 visualisierte Zusammenhang. Eine lineare Regression liefert:

$$Y = 0.62 * X + 0.03 \quad (3.16)$$

Der Korrelationskoeffizient beträgt 0.84. Das ist eine gute Übereinstimmung der MeCiDA Ergebnisse mit den aus MODIS-Daten abgeleiteten Monatsmittelwert für den Monat Mai. MeCiDA erkennt dabei im Mittel 62% der von MODIS detektierten Zirren. Da sich MODIS auf polarumlaufenden Satelliten Terra und Aqua bewegt, sind die Mittelwerte anders berechnet als die des geostationären MSG. Man könnte solche Monatsmittelwerte auch aus den MSG-Daten für die jeweiligen Bahnen von Terra und Aqua berechnen. Dies wäre jedoch sehr aufwendig.

Die oben gezeigten Vergleiche wurden für elf Monate des Jahres 2004 durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Anhang A.2 dargestellt.

### Zusammenfassung Vergleiche mit Monatsmittelwerten

Die Ergebnisse zeigen für die meisten Monate eine gute Übereinstimmung. In Tabelle 3.3 sind für die Monate Februar bis Dezember die Ergebnisse der linearen Regression der beiden Monatsmittelwerte und die Korrelationskoeffizienten dargestellt.

Tabelle 3.3: Regressionskoeffizienten und Korrelationskoeffizienten der Vergleiche MODIS vs. MeCiDA.

Monat	Regressionsgerade	Korrelationskoeffizient
Februar	$Y = 0.93 * X - 0.04$	0.79
März	$Y = 0.68 * X - 0.00$	0.76
April	$Y = 0.63 * X + 0.03$	0.81
Mai	$Y = 0.62 * X + 0.03$	0.84
Juni	$Y = 0.68 * X + 0.03$	0.88
Juli	$Y = 0.76 * X + 0.03$	0.90
August	$Y = 0.82 * X + 0.01$	0.94
September	$Y = 0.88 * X - 0.01$	0.93
Oktober	$Y = 0.77 * X + 0.01$	0.88
November	$Y = 0.98 * X - 0.01$	0.74
Dezember	$Y = 0.79 * X + 0.08$	0.58

Im Jahresmittel ergibt sich eine deutliche Korrelation von 0.87. Die lineare Regression liefert:

$$Y = 0.89 * X - 0.03. \quad (3.17)$$

In Abb. 3.25 sind die Ergebnisse der Untersuchung der Jahresmittelwerte dargestellt.

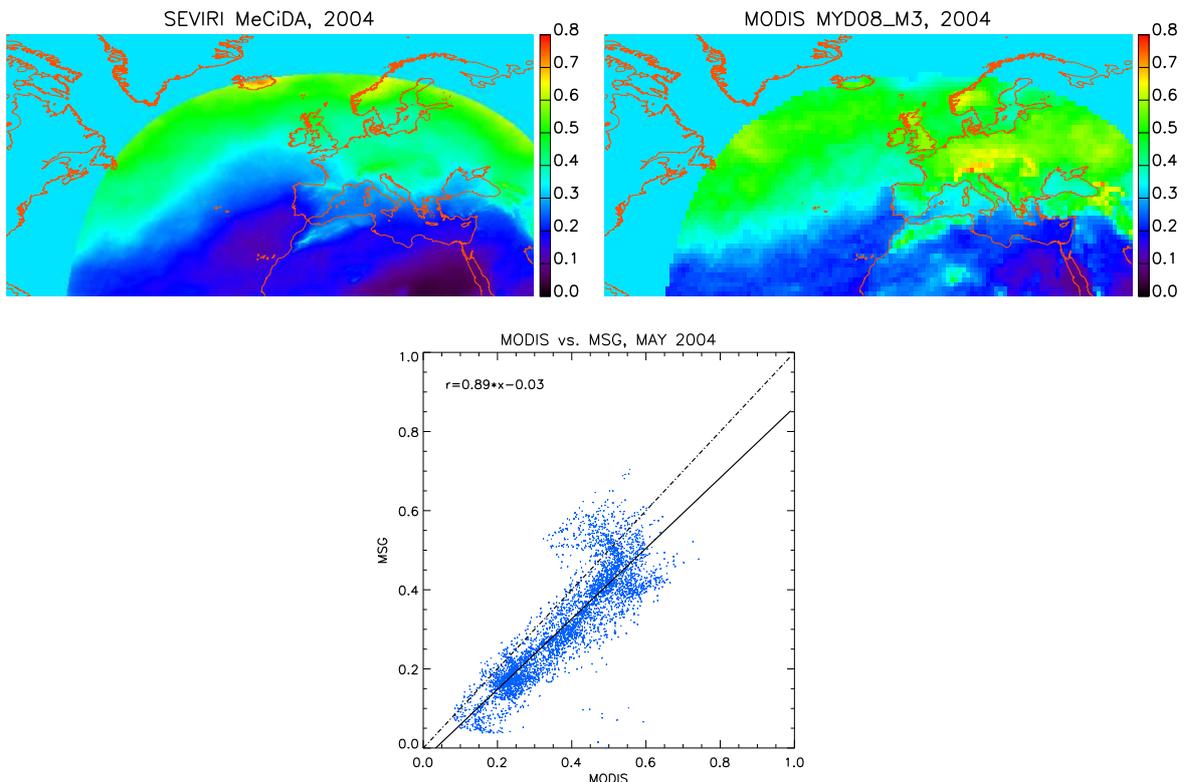


Abbildung 3.25: **Links Oben:** Der SEVIRI MeCiDA Jahresmittelwert 2004 für das **CONTRAILS** Gebiet:  $80^{\circ}W$ ,  $50^{\circ}O$ ,  $20^{\circ}N$ ,  $75^{\circ}N$ . **Rechts Oben:** MODIS Cirrus.Fraction.SWIR.FMean Cirrus Jahresmittelwert aus MYD08\_M3, 2004. **Unten:** Vergleich der SEVIRI MeCiDA Jahresmittelwerte und der MODIS SWIR Cirrus Jahresmittelwerte aus MYD08\_M3, 2004.

Insgesamt sind die MODIS-Mittelwerte aufgrund der höheren räumlichen Auflösung erwartungsgemäß höher als die Mittelwerte der MSG Zirruserkennung.

Für die Wintermonate zeigt sich, dass die MeCiDA Mittelwerte für große Satellitenzenitwinkel deutlich über den MODIS Mittelwerten liegen (siehe z.B. Abb. A.13 für den Februar 2004). Die lineare Regression liefert eine steilere Gerade als z.B. im Mai (siehe Tab. 3.3). Der Korrelationskoeffizient beträgt im Februar 0.79. Er ist aufgrund der größeren Streuung deutlich kleiner als für den Monat Mai. Der Grund hierfür ist die hohe Fehlerrate des MeCiDA Algorithmus für große Satellitenzenitwinkel ( $> 65^\circ$ ) bei kalten Temperaturen. Auf der anderen Seite ist eine auf solaren Kanälen basierende Zirrenerkennung bedingt durch die jahreszeitliche Dunkelheit in den nördlichen Breiten für kürzere Zeiträume einsetzbar als im Mai. Desweiteren ist eine Zirrenerkennung im solaren Spektralbereich über Schnee schwieriger. Dies verringert die Erkennungsrate von MODIS, so dass sich die mittlere Zirrenbedeckung für das Gebiet im Februar und auch im Dezember und November (siehe A.23, A.22) angleicht. Im Dezember zeigen sich die größten Abweichungen zu MODIS. Die übrigen Monate haben eine deutlich bessere Übereinstimmung.

In den Monaten Juni, Juli, August, September und Oktober erkennt MODIS deutlich mehr Zirren, da in diesen Monaten die MODIS Solarkanäle für längere Zeiträume zur Verfügung stehen. Die Korrelation ist auf der anderen Seite höher als in den Wintermonaten. Die Zirrenerkennung bei MSG ist in den Sommermonaten restriktiver, die Fehlerrate geringer.

### 3.4.3 Zusammenfassung Validierung

Die Vergleiche mit MODIS Produkten zeigten sowohl für die Einzelszenen als auch für Monatsmittelwerte und Jahresmittelwerte gute Übereinstimmung mit den MeCiDA Ergebnissen. MODIS ist aufgrund der räumlichen Auflösung und der vorhandenen Spektralkanäle sehr gut geeignet, um Zirren zu erkennen. Daher bietet sich eine Validierung der MeCiDA Ergebnisse mit der MODIS Zirrusmaske an. Jedoch zeigte sich, wie an Beispielen veranschaulicht, dass über ariden Gebieten vereinzelt Zirren mit MODIS falsch klassifiziert wurden. Wie erwartet erkennt MODIS aufgrund der höheren räumlichen Auflösung an Wolkenrändern mehr Zirren als MSG-SEVIRI. Die Vergleiche mit den Monatsmittelwerten ergaben eine bessere Übereinstimmung als die Vergleiche mit den Einzelszenen, da in diese MODIS-Produkte auch rein thermische Zirrustests eingehen, die eine geringere Erkennungsrate als die solaren Tests aufweisen, und dem MeCiDA Verfahren ähnlich sind.

Die entwickelte Zirrusmaske ist sehr gut geeignet, um den Zusammenhang der Zirrusbewölkung mit dem Flugverkehr zu untersuchen.

### 3.5 Methoden zur Bestimmung der Strahlungsflussdichte

In diesem Abschnitt werden die Werkzeuge zur Berechnung der ausgehenden langwelligen und kurzwelligen Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre aus MSG-Daten vorgestellt und die Validierung der berechneten Strahlungsflussdichten vorgestellt und diskutiert.

Zur Bestimmung des Strahlungsantriebs des Flugverkehrs wurde die **ausgehende Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre** für Gebiete ohne Flugverkehr mit den mittleren Strahlungsflussdichten der jeweiligen Untersuchungsregion verglichen bzw. die unterschiedlichen Strahlungsflussdichten abhängig von der Flugverkehrsdichte untersucht. Da der Flugverkehr in der Zeit stark variiert, wurde die ausgehende Strahlungsflussdichte in einer hohen zeitlichen Auflösung benötigt. Um ein möglichst großes Gebiet zu untersuchen, wurde diese Größe für das gesamte Gebiet und den gesamten Zeitraum des Jahres 2004, für den Flugverkehrsdaten zur Verfügung standen und Berechnungen möglich waren, abgeleitet. Die Flugverkehrsdaten umfassen ein Gebiet  $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$  für das Jahr 2004. Das Gebiet wird größtenteils von SEVIRI Daten abgedeckt. Die abgeleiteten Strahlungsflussdichten wurden auf einen Satellitenzenitwinkel  $< 75^{\circ}$  beschränkt, da darüber hinaus eine Berechnung von Strahlungsflussdichten aus SEVIRI Daten nicht mehr sinnvoll ist. Aufgrund der großen Anzahl der zu berechnenden Bildelemente war es notwendig, schnelle Werkzeuge für die Berechnung der ausgehenden Strahlungsflussdichte zu entwickeln.

In Zusammenarbeit mit Dr. Bernhard Mayer und Dr. Hermann Mannstein wurden Methoden entwickelt, mit deren Hilfe die kurzwellige und langwellige Strahlungsflussdichte für das gesamte Untersuchungsgebiet und den gesamten Zeitraum 2004 direkt aus den MSG-SEVIRI Messungen in wenigen Monaten berechnet werden konnte.

SEVIRI misst spektral abhängige Strahldichten, die von der Beobachtungsgeometrie und im kurzwelligen zusätzlich vom Sonnenzenit- und Azimutwinkel abhängen. Für eine Umwandlung in eine Strahlungsflussdichte müssen diese Größen für den gesamten kurzwelligen und langwelligen Spektralbereich ausgedehnt (*engl. narrowband-to-broadband conversion*) und die Winkelabhängigkeit berücksichtigt werden. Die Winkelabhängigkeit hängt dabei stark vom jeweiligen Wolkentyp (Wasser oder Eiswolken) bzw. von den Oberflächeneigenschaften des Bodens ab.

Dazu wurde von Dr. Bernhard Mayer die kurzwellige und langwellige Strahlungsflussdichte in Kombination mit den Helligkeitstemperaturen bzw. Reflektivitäten der SEVIRI Kanälen für verschiedene Geometrien sowie Boden und Atmosphäreigenschaften simuliert. Insgesamt wurden 10000 Fälle mit jeweils 800 verschiedenen Winkel simuliert. Die Winkelabhängigkeit der Reflektivitäten von Wolken und Oberflächen wurde mit Hilfe von tabellierten *Angular Distribution Model (ADM)* Daten berücksichtigt.

Die Simulationen wurden mit Hilfe des Strahlungspakets libRadtran [MAYER und KYLLING 2005] durchgeführt. Basierend auf den Simulationsergebnissen wurden unterschiedliche Werkzeuge zur Berechnung der Strahlungsflussdichten entwickelt und in IDL implementiert.

#### 3.5.1 Parametrisierungsmodell der langwelligen Strahlungsflussdichte

Die Berechnung der langwelligen Strahlungsflussdichten erfolgt durch eine vom Satellitenzenitwinkel abhängige Linearkombination der aus SEVIRI-Strahldichten umgewandelten Helligkeitstemperaturen.

$$F_{LW}^{\uparrow}(\Theta_{sat}) = \sigma(a(\Theta_{sat})T_{6.2} + b(\Theta_{sat})T_{7.3} + c(\Theta_{sat})T_{8.7} + d(\Theta_{sat})T_{9.7} + e(\Theta_{sat})T_{10.8} + f(\Theta_{sat})T_{12.0} + g(\Theta_{sat})T_{13.4} + h(\Theta_{sat}))^4 \quad (3.18)$$

mit  $\sigma = 5.6703 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$  als Stefan-Boltzmann-Konstante und  $\Theta_{sat}$  als Satellitenzenitwinkel. Die Konstanten  $a(\Theta_{sat}) \dots h(\Theta_{sat})$  sind für Szenen mit Zirren und ohne Zirren unterschiedlich. Die Fitkonstanten wurden durch eine multilineare Regression der Helligkeitstemperaturen bestimmt und

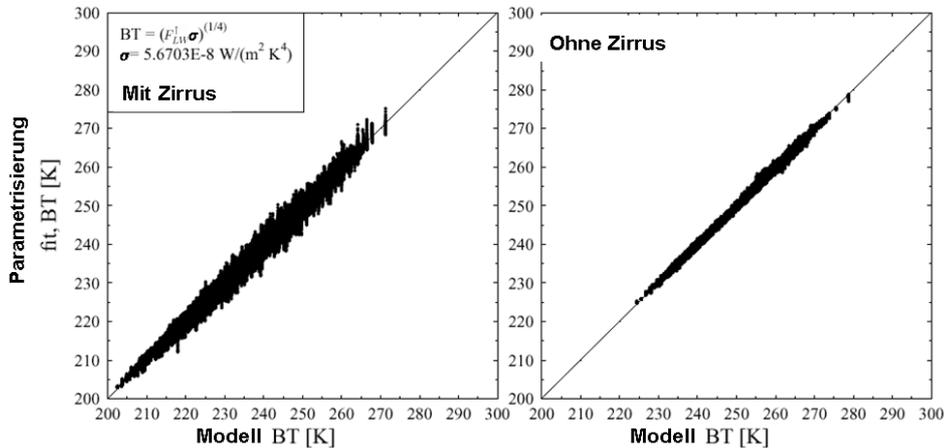


Abbildung 3.26: Gefittete langwellige Strahlungsflussdichte umgewandelt in Temperatur im Vergleich mit den Modelldaten für Szenen mit Zirus und ohne Zirus.

für verschiedene Satellitenzenitwinkel tabelliert. Die Tabellen umfassen Werte für den Cosinus des Satellitenzenitwinkel in dem Bereich  $0.2 \dots 1.0$ . Die Schrittweite beträgt  $0.02$ .

Ein Vergleich zwischen den mit Gleichung 3.18 gefitteten Ergebnissen und den dazugehörigen Modelldaten ist in Abb. 3.26 aufgetragen. Dargestellt sind alle (10000) simulierten Fälle. Man sieht sowohl für die Fälle mit Zirus (links) als auch ohne Zirus (rechts) eine deutliche Übereinstimmung der Ergebnisse. Allerdings zeigt sich mit Zirus eine größere Streuung als ohne eine Ziruswolke. Der Grund ist zum einen die Erhöhung der Komplexität des Problems, da die Fälle mit Ziruswolke mit der gleichen Fitfunktion beschrieben werden (es ändern sich nur die Konstanten, nicht deren Anzahl) und zum anderen erfolgt eine Verbreiterung des Wertebereichs mit Ziruswolken, da diese sehr kalt sind.

Die Berechnungsroutine wurde in IDL implementiert. Die IDL-Routine trennt die Bildelemente mit Hilfe der mit dem McCiDA Algorithmus bestimmten Zirrenbedeckungen in zirusfreie und zirusbedeckte Bildelemente. Die Satellitenzenitwinkel werden eingelesen und die tabellierten Konstanten  $a(\Theta_{sat})$  bis  $h(\Theta_{sat})$  auf den jeweiligen Satellitenzenitwinkel interpoliert. Die gemessenen Strahlungsflussdichten werden in Helligkeitstemperaturen umgewandelt und gemeinsam mit den interpolierten Fitkonstanten in Gleichung 3.18 eingesetzt.

Die Berechnungen der Strahlungsflussdichten wurde in der Satellitenprojektion durchgeführt und anschließend in die äquidistante Projektion, in der der Flugverkehr zur Verfügung stand, transformiert.

### 3.5.2 Parametrisierungsmodelle der kurzwelligen Strahlungsflussdichte

Zur Berechnung der kurzwelligen Strahlungsflussdichte wurden zwei Methoden entwickelt und in IDL implementiert. Beide Methoden werden in diesem Abschnitt kurz erläutert. Die erste basiert, wie für die langwelligen Strahlungsflussdichte, auf einer Linearkombination der Reflektivitäten der Kanäle VIS006, VIS008 und IR\_016. Die zweite Methode basiert auf der Berechnung der Strahlungsflussdichten mit einem neuronalen Netz. Das neuronale Netz wurde von Dr. Hermann Mannstein entwickelt. Mit Hilfe beider Methoden wurden die kurzwelligen Strahlungsflussdichten für den gesamten Zeitraum 2004 berechnet und stehen für weitere Benutzung in Satellitenprojektion und äquidistanter Projektion zur Verfügung. Der Zusammenhang zwischen der kurzwellige Strahlungsflussdichte und Strahlungsflussdichten für unterschiedliche Szenarien, wie z.B. für die Berechnung der Strahlungsflussdichten über den Wasserwolken und über Wasser, ist nichtlinear. Ein neuronales Netz eignet sich für die Abbildung nichtlinearer Zusammenhänge. Bildet man den Zusammenhang mit mehreren linearen Funktionen ab, muss die Nichtlinearität, wie in unserem Fall, über mehrere fehleranfällige Fallunterscheidungen abgebildet werden. Vergleiche mit anderen Satellitendaten zeigten, dass die auf das neuronale Netz basierende Methode zuverlässigere Ergebnisse liefert als die lineare Parametrisierung. Für die statistischen Auswertungen wurden daher, wenn kurzwellige Strahlungsflussdichten benutzt wurden, die Berechnungen des neuronalen Netzes verwendet.

### 3.5.2.1 Berechnung der kurzwelligen Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre basierend auf einer Linearkombination der Reflektivitäten

Diese Methode basiert auf einem ähnlichen Prinzip wie die Methode zur Berechnung der langwelligen Strahlungsflussdichten. Die kurzwellige Strahlungsflussdichte wurde mittels einer Linearkombination der Reflektivitäten der Kanäle VIS006, VIS008 und IR\_016 berechnet.

$$F^{\uparrow}(\Theta_{sat}, \Phi, \theta_{sun})_{SW} = a(\Theta_{sat}, \Phi, \theta_{sun})R_{0.6} + b(\Theta_{sat}, \Phi, \theta_{sun})R_{0.8} + c(\Theta_{sat}, \Phi, \theta_{sun})R_{1.6} + d(\Theta_{sat}, \Phi, \theta_{sun}) \quad (3.19)$$

mit  $\Theta_{sat}$  als Satellitenzenitwinkel,  $\Phi$  als relativen Azimut und  $\theta_{sun}$  als Sonnenzenitwinkel.  $a(\Theta_{sat}, \Phi, \theta_{sun}) \dots d(\Theta_{sat}, \Phi, \theta_{sun})$  sind Fitkonstanten. In Abb. 3.27 sind die gefitteten Strahlungsflussdichten und die Modelldaten gegeneinander aufgetragen.

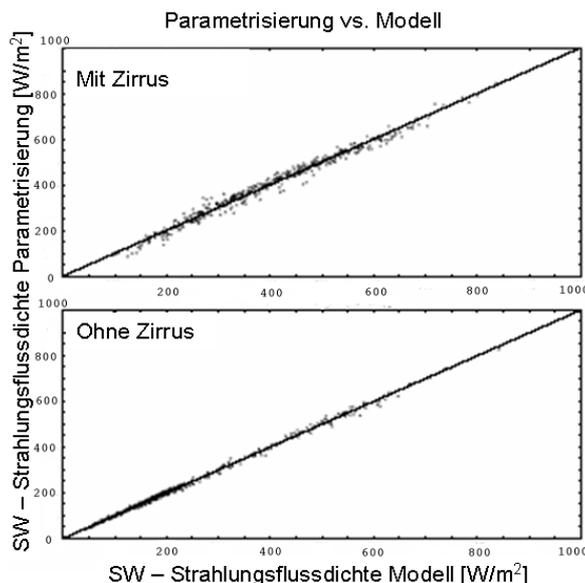


Abbildung 3.27: Gefittete kurzwellige Strahlungsflussdichte im Vergleich mit den Modelldaten für Szenen mit Zirrus und ohne Zirrus.

Die Fitkonstanten hängen vom Satellitenzenitwinkel, vom relativen Azimut und dem Sonnenzenitwinkel ab. Zur Berechnung der Fitkonstanten wurden die Reflektivitäten der drei Kanäle und die kurzwellige Strahlungsflussdichte für verschiedene Atmosphärenprofile und Bodeneigenschaften mit Hilfe von libRadtran simuliert. Da der Zusammenhang zwischen den Reflektivitäten und den Strahlungsflussdichten abhängig von den jeweiligen Bodeneigenschaften stark nichtlinear ist, war eine Fallunterscheidung der simulierten Szenen notwendig. Es wurden vier verschiedene Tabellen verwendet für Bildelemente:

- mit Zirren über Land oder Wasserwolken,
- ohne Zirren über Land,
- mit Zirren über Wasser
- und wolkenfreie Bildelemente über Wasser.

Für die ersten drei Fälle wurden die Fitparameter durch multilineare Regression bestimmt und für verschiedene Sonnenzenitwinkel und Beobachtungsgeometrien tabelliert. Die Wertebereiche und Schrittweiten sind in Tabelle 3.4 dargestellt.

Für den Fall *Wasser wolkenfrei* zeigt sich, dass die ausgehende kurzwellige Strahlungsflussdichte näherungsweise nur vom Sonnenzenitwinkel abhängt. Die ausgehende kurzwellige Strahlungsflussdichte wurde für diesen Fall abhängig vom Sonnenzenitwinkel tabelliert. Für den jeweiligen Sonnenzenitwinkel des Bildelementes wurde aus der Tabelle eine Strahlungsflussdichte durch Interpolation berechnet. Für die anderen drei Fälle sind die Fitparameter abhängig von den drei Winkeln

Tabelle 3.4: Wertebereiche der Winkel

Winkel	Wertebereich	Schrittweite
Cosinus Satellitenzenitwinkel $\cos(\Theta_{sat})$	0.2 . . . 1.0	0.02
relativer Azimut $\Phi$	$0^\circ \dots 180^\circ$	$10^\circ$
Cosinus Sonnenzenitwinkel $\cos(\theta_{sun})$	0.2 . . . 0.95	0.05

tabelliert. Zur Berechnung der Strahlungsflussdichte werden die Fitparameter aus der Tabelle interpoliert und gemeinsam mit den aus SEVIRI abgeleiteten Reflektivitäten in Gleichung 3.19 eingesetzt.

Um die richtige Tabelle zu verwenden, unterscheidet der Algorithmus für Bildelemente über Wasser, ob unterhalb der Zirruswolke eine Wasserwolke vorhanden ist. Eine lineare Parametrisierung der Strahlungsflussdichte wäre über Wasser ohne die Fallunterscheidung, ob die Zirruswolke sich über einer Wasserwolke oder nur über Wasser befindet, nicht möglich. Dies erfordert eine Erkennung von Wasserwolken über Wasser unterhalb der Zirruswolke. Dazu werden die Reflektivitäten unterhalb der Zirruswolke aus den Nachbarbildelementen der Zirren abgeschätzt. Aus den Reflektivitätsbildern der drei Kanäle werden die als Zirrus markierten Bildelemente aus dem Bild eliminiert. Mit einem Box-Car-Filter werden die entstandenen Lücken aufgefüllt. Sind die Lücken nicht geschlossen, wird der Kernel vergrößert und auf die Bilder nochmal angewandt. Bei jedem Iterationsschritt wird die Zirruslücke von den Ränder aufgefüllt, bis keine Lücken mehr vorhanden sind. Werte die vor dem Iterationsschritt vorhanden waren werden nicht überschrieben. Aus dem so berechnetem Reflektivitätsbild des Kanals VIS008 ohne Zirruswolken wird mittels eines Schwellenwerttests  $R_{0.8} > 1.5$  die Wasserwolkenmaske über Wasser bestimmt.

Diese Abschätzung der Reflektivitäten unterhalb von Zirruswolken erfolgte über Land und über Wasser. Dies ermöglichte die Berechnung des kurzwelligen Strahlungsantriebs der Zirruswolken. Für die Bildelemente mit Zirruswolken wurde die ausgehende kurzwellige Strahlungsflussdichte mit Zirruswolken und ohne Zirruswolken bestimmt. Aus der Differenz wurde auch der kurzwellige Strahlungsantrieb berechnet. Die ausgehende kurzwellige Strahlungsflussdichte und der kurzwelliger Strahlungsantrieb wurden in Satellitenprojektion berechnet und anschließend in eine äquidistante Projektion transformiert. Der auf diese Weise bestimmte kurzwellige Strahlungsantrieb wurde jedoch für die statistischen Untersuchungen des Zusammenhangs mit der Flugverkehrsdichte nicht verwendet, da er eine große Unsicherheit aufweist und schwierig zu validieren ist.

### 3.5.2.2 Berechnung der kurzwelligen Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre mit Hilfe eines künstlichen neuronalen Netzes

Die zweite Methode zur Berechnung der kurzwelligen Strahlungsflussdichte basiert auf einem von Dr. Hermann Mannstein entwickelten künstlichen neuronalen Netz (KNN). Trainiert und verifiziert wurde das neuronale Netz mit den simulierten Strahldichten der SEVIRI Kanäle VIS006, VIS008 und IR\_016 sowie den simulierten Strahlungsflussdichten.

Das verwendete künstliche neuronale Netz basiert auf 200 Neuronen, die in einer Schicht angeordnet werden. Die Parameter des Eingangsvektors  $X_{inp}$  sind:

- VIS006 Strahldichte,
- VIS008 Strahldichte,
- IR\_016 Strahldichte,
- Satellitenzenitwinkel,
- Sonnenzenitwinkel,
- Relativer Azimut,
- Land/Wasser-Flag.

Das Ergebnis ist die kurzwellige ausgehende Strahlungsflussdichte  $F^\uparrow$  am Oberrand der Atmosphäre.

Zur Berechnung der Strahlungsflussdichte werden die 7 Eingabeparameter in jedes Neuron mit einer vorher bestimmten und gespeicherten Gewichtsmatrix  $W1$  multipliziert und addiert. Mit diesen Werten werden mit einer Aktivierungsfunktion, in Falle des verwendeten Netzes ist dies die Sigmoid-Funktion:

$$y(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}, \quad (3.20)$$

die Neurone aktiviert. Die Ausgaben der Neurone werden wieder unterschiedlich gewichtet (mit einer Gewichtsmatrix  $W2$  multipliziert) addiert und in die Aktivierungsfunktion (Gl. 3.20) eingesetzt.

$$F = y(y(X_{\text{inp}} \otimes W1) \otimes W2) \quad (3.21)$$

Das Ergebnis  $F$  ist die kurzwellige Strahlungsflussdichte. Die Methode wird für jedes Bildelement durchgeführt und ermöglicht aufgrund der vergleichsweise wenigen Rechenoperationen die Berechnung der Strahlungsflussdichte einer MSG-Szene in wenigen Minuten.

Zum Erzeugen der Gewichtsmatrix wird das neuronale Netz trainiert. Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete neuronale Netz wurde mit Hilfe eines Rückwärtspropagierungsalgorithmus (*engl. Back-Propagation*) trainiert ([RUMELHART et al. 1986]). Dies ist eines der häufigsten Verfahren zum Trainieren neuronaler Netze und wird in Folge für eine beliebige Anzahl an Schichten vorgestellt.

### Der Rückwärtspropagierungsalgorithmus

Um ein neuronales Netz zu trainieren, muss die Abweichung des gewünschten Ergebnisses vom berechneten Wert durch die Variation der Gewichtsmatrix minimiert werden. Für diesen Prozess muss diese Abweichung oder Fehler in Abhängigkeit von einer kleinen Änderung der Gewichtsmatrix bestimmt werden. Man benötigt also die Ableitung der Gewichtsmatrix (EW).

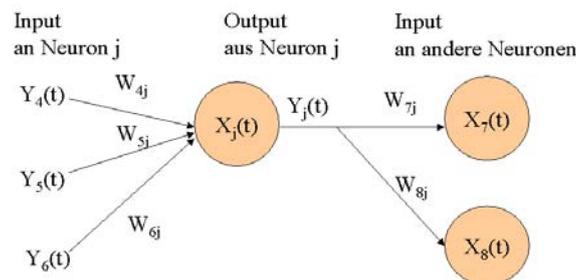


Abbildung 3.28: Neuron mit Ein- und Ausgabe.

Um diese zu bestimmen wird als erstes die gewichtete Eingabe für jedes Neuron  $X_j$  bestimmt:

$$X_j = \sum_i y_i W_{i,j} \quad (3.22)$$

mit  $y_i$  als Aktivierung bzw. Aktivierungsfunktion des  $i$ -ten Neurons in der vorhergehenden Schicht und  $W_{i,j}$  als das Gewicht zwischen dem  $i$ -ten und  $j$ -ten Neuron.

Im nächsten Schritt wird für das Neuron die Aktivierung  $y_j$  als Funktion der gewichteten Eingabe berechnet. Dies erfolgt mit Hilfe der Sigmoid-Funktion:

$$y_j = \frac{1}{1 + e^{-x_j}} \quad (3.23)$$

Wenn die Aktivierungsfunktionen der Ausgabe jedes Neurons bestimmt wurden, wird der Fehler des Netzwerks  $E$  bestimmt, der definiert ist als:

$$E = \frac{1}{2} \sum_i (y_j - d_j)^2 \quad (3.24)$$

mit  $y_j$  als Aktivierung des  $j$ -ten Neurons in der oberen Schicht und  $d_j$  als gewünschtes Ergebnis des  $j$ -ten Neurons.

Jetzt wird der Fehler wieder über die Ausgabe- zur Eingabeschicht zurück propagiert, dabei werden die Gewichtungen der Neuronenverbindungen abhängig von ihrem Einfluss auf den Fehler verändert. Dies bedingt eine schrittweise Annäherung an die gewünschte Ausgabe. Der Algorithmus läßt sich in vier Schritte gliedern:

1. Es wird die Änderung des Fehlers in Abhängigkeit von der Aktivierung einer Ausgabeneinheit berechnet. Die Ableitung des Fehlers (EA) ist die Differenz zwischen der aktuellen und der gewünschten Aktivierung  $d_j$ .

$$EA_j = \frac{\partial E}{\partial y_j} = y_j - d_j \quad (3.25)$$

2. In diesem Schritt wird die Änderung der Abweichung in Abhängigkeit von der Eingabe berechnet.<sup>7</sup>

$$EI_j = \frac{\partial E}{\partial y_j} \times \frac{dy_j}{dx_j} = EA_j \cdot y_j(1 - y_j) \quad (3.26)$$

3. In nächsten Schritt wird die Änderung der Abweichung in Abhängigkeit von den Gewichten berechnet.

$$EW_{i,j} = \frac{\partial E}{\partial W_{i,j}} = \frac{\partial E}{\partial x_j} \times \frac{\partial x_j}{\partial W_{i,j}} = EI_j \cdot y_i \quad (3.27)$$

4. In diesem Schritt wird die Änderung der Abweichung in Abhängigkeit von der Aktivierung der vorhergehenden Schicht berechnet. Dieser Schritt erlaubt eine Rückwärtspropagierung zur vorhergehenden Schicht. Durch die Änderung der Aktivierung eines Neurons in einer vorhergehenden Schicht werden die Aktivierungen aller Neuronen verändert, mit denen die Ausgabe des jeweiligen Neurons verbunden ist. D.h. um den gesamten Effekt zu berechnen werden alle einzelnen Änderungen addiert. Diese sind einfach zu berechnen. Das Ergebnis aus Schritt 2 wird mit den Gewichten der jeweiligen Verbindung multipliziert.

$$EA_i = \frac{\partial E}{\partial y_i} = \sum_j \frac{\partial E}{\partial x_j} \times \frac{\partial x_j}{\partial y_i} = \sum_j EI_j W_{i,j} \quad (3.28)$$

Mit Hilfe der Schritte 2 und 4 werden die EAs einer Schicht in die EAs der vorhergehenden Schicht umgewandelt. Diese Prozedur kann für beliebig viele Schichten wiederholt werden, um die Änderungen der Abweichungen zu berechnen. Sobald die EAs für jedes Neuron bekannt sind, lassen sich die EWs mit Schritt 2 und 3 berechnen.

Die verwendete Trainingsroutine mit N-Trainingsdaten ist dann:

```
FOR n=0, UNTIL n=N DO BEGIN
  y1      = SIGMOID(Xinp ⊗ W1)
  y2      = SIGMOID(y1 ⊗ W2)

  EA2   = 2 · (y2 - d)
  EI2   = EA2 · y2 · (1 - y2)
  EW1,2 = EI2 ⊗ y1
  EA1   = W2 ⊗ EI2
  EI1   = EA1 · y1 · (1 - y1)
  EWinp,1 = Xinp ⊗ EI1

  W1      = W1 - α · EWinp,1
  W2      = W2 - α · EW1,2
ENDFOR
```

<sup>7</sup>Die Ableitung der Sigmoid-Funktion läßt sich als  $y \cdot (1 - y)$  schreiben.

$\alpha$  ist ein frei wählbarer Parameter, der variiert werden kann. Mit diesem Parameter läßt sich steuern, wie schnell das Netz konvergiert.  $X_{\text{inp}}$  ist der Eingabevektor,  $d$  ist das gewünschte Ergebnis.  $W1$  und  $W2$  sind die gesuchten Gewichtsmatrizen.<sup>89</sup>

Die Routine wurde in IDL implementiert. Das Trainieren erfolgte mit dem gleichen Datensatz, der auch für die lineare Parametrisierung benutzt wurde. Aus diesem Datensatz wurden die Eingangsvektoren zufällig ausgewählt ( $8 \times 10^6$  Vektoren). Dieser Vorgang wurde zehnmal wiederholt. Die Trainingszeit beträgt auf einem Linux 1.6 GHz Rechner ca. 12h. Die Rechenzeit beträgt ca. 5-10 Minuten pro Tagszene (für drei Segmente), davon entfallen ca. zwei Minuten auf das Einlesen und Ablegen der Daten. Die kurzweilige Strahlungsflussdichte wurde in Satellitenprojektion berechnet und in äquidistanter zylindrischer Projektion transformiert.

In Abb. 3.29 ist die mit dem neuronalen Netz berechnete kurzweilige Strahlungsflussdichte im Vergleich zu den Modelldaten als zweidimensionales Histogramm aufgetragen.

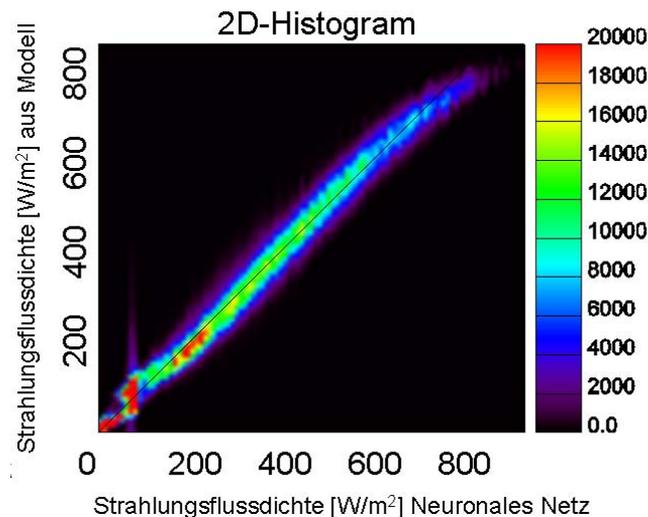


Abbildung 3.29: Mit Hilfe des neuronalen Netzes berechnete kurzweilige Strahlungsflussdichte im Vergleich mit den Modelldaten für Szenen mit Zirrus und ohne Zirrus.

In Abb. 3.30 ist die ausgehende kurzweilige Strahlungsflussdichte in zylindrischer Projektion für den Zeitpunkt 2004/03/10 10:00 UTC dargestellt.

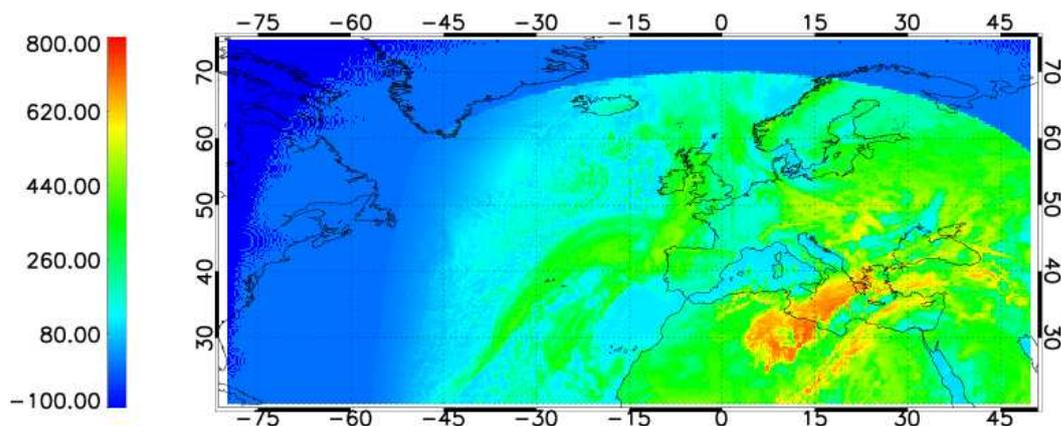


Abbildung 3.30: Ausgehende kurzweilige Strahlungsflussdichte in  $\frac{W}{m^2}$  am Oberrand der Atmosphäre 2004/03/10 10:00 UTC. Berechnet mit neuronalem Netz aus MSG-Daten.

Die Berechnung wurde für alle MSG-Szenen aus dem gesamten Zeitraum Feb. - Dez. 2004 durchgeführt.

<sup>8</sup>Bemerkung:  $X, d, W1$ , und  $W2$  sind je um einen Bias-Term erweitert. D.h.  $X=(X,1)$ ,  $d=(d,1)$  usw.. Dies wird in einigen Artikeln empfohlen siehe z.B. [HORNÍK 1993].

<sup>9</sup> $\otimes$  ist das Vektor- bzw. Kreuzprodukt.

### 3.6 Validierung der Strahlungsflussdichten

In diesem Abschnitt wird die Validierung der ausgehenden kurzwelligen und langwelligen Strahlungsflussdichten vorgestellt. Zur Validierung der ausgehenden Strahlungsflussdichten wurde das **C**louds and the **E**arth's **R**adiant **E**nergy **S**ystem (CERES) verwendet.

#### 3.6.1 CERES Instrument

CERES besteht aus zwei abbildenden Breitbandradiometern zur Messung des Strahlungshaushalts der Erde und Bestimmung der Wolkeneigenschaften und deren Bedeutung auf die Strahlungsflussdichten vom Erdboden bis zum Oberrand der Atmosphäre. Das Messprinzip basiert auf einem Thermistor-Bolometer mit einer sehr hohen radiometrischen Präzision und Genauigkeit. CERES-Instrumente sind auf den Satelliten Aqua, Terra und TRMM installiert.

Jedes CERES Instrument hat drei Kanäle, einen kurzwelligen Kanal zur Messung des reflektierten Sonnenlichts, einen langwelligen Kanal zur Messung der emittierten Strahlung im  $8-12\mu\text{m}$  „Fenster“ und einen Kanal zur Messung des gesamten Spektrums. Die Messungen können in drei Abtastmodi durchgeführt werden. Einen *Crosstrack scan*, einen *Rotating Azimuth Plane scan* zur Bestimmung des Angular Distribution Models (ADM) und einem *Alongtrack scan* zur Validierung der instantanen CERES Flüsse.

CERES ist ein Forschungsinstrument der NASA, betrieben vom NASA's Langley Research Center (LaRC) in Hampton, Virginia (siehe [WIELICKI et al. 1996]). Das Instrument wurde von TRW in Redondo Beach, California gebaut. Weitere Informationen über CERES sind auf der Internetseite:

<http://asd-www.larc.nasa.gov/ceres/ASDceres.html>  
verfügbar.

CERES ist mit einer großen Anzahl von Produkten validiert ([CHARLOCK und ALBERTA 1996]). Weitere Informationen zur Validierung von CERES finden sich auf der Internetseite:

<http://www-cave.larc.nasa.gov/cave/>.

#### 3.6.2 Validierung der langwelligen Strahlungsflussdichten

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Validierung wurden 12 Termine zufällig ausgewählt. Es wurden die ausgehende langwellige und kurzwellige Strahlungsflussdichte mit den CERES-Daten verglichen. Die CERES Daten wurden hierfür in eine äquidistante zylindrische Projektion transformiert. Um die Transformationsrechenzeit zu reduzieren, wurden die Daten in einer  $1^\circ \times 1^\circ$  Auflösung verglichen.

Die Vergleiche zeigen eine deutliche Übereinstimmung der langwelligen ausgehenden Strahlungsflussdichten. In Abb. 3.31 ist die Differenz der langwelligen CERES-Strahlungsflussdichten und MSG-Strahlungsflussdichten für einen Termin am 2004/02/01 dargestellt.

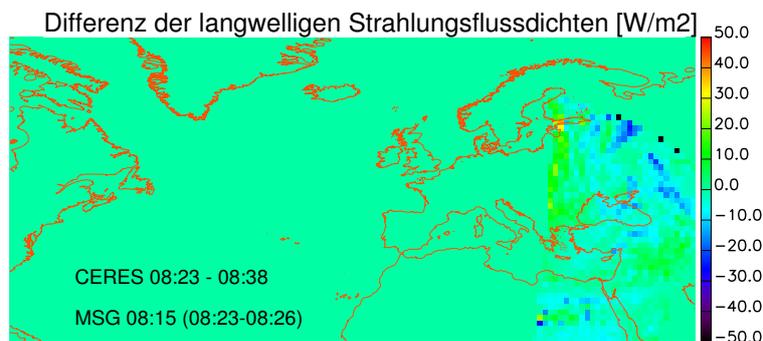


Abbildung 3.31: Differenz der ausgehenden langwelligen Strahlungsflussdichten am Oberrand der Atmosphäre, abgeleitet aus MSG Daten und CERES Daten.

In Abb. 3.32 sind die Ergebnisse der langwelligen Strahlungsflussdichte aus den beiden Instrumenten gegeneinander aufgetragen. Man sieht eine deutliche Übereinstimmung der beiden Berechnungen. Es zeigt sich keine systematische Abweichung der beiden Werte. Die Streuung ist ebenfalls gering. Zur Quantifizierung wurde die Steigung der Regression sowie das Bestimmtheitsmaß als Maß für die Streuung berechnet und in Tabelle 3.5 aufgelistet.

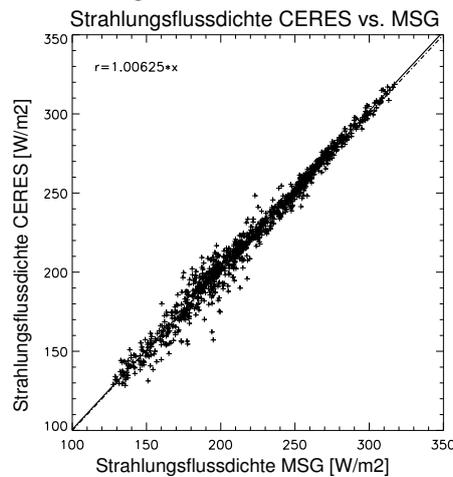


Abbildung 3.32: Vergleich der ausgehenden langwelligen Strahlungsflussdichten zwischen CERES und MSG.

Um eventuelle Unterschiede der Fehler für zirkusbedeckte und zirkusfreie Bildelemente zu erkennen, wurden diese teilweise getrennt untersucht. Dies ist vor allem für die kurzwelligen Strahlungsflussdichten wichtig, da die kurzwelligen MSG-Strahlungsflussdichten systematisch höher waren als die CERES Werte.

Der Vergleich im langwelligen Spektralbereich der mit Zirkuswolken bedeckten Bildelemente (siehe Abb. 3.33 links) Abb. 3.33 (rechts) und der zirkusfreien Bildelemente zeigt kein unterschiedliches Verhalten, der auf größere Fehler in einem der Fälle hindeutet.

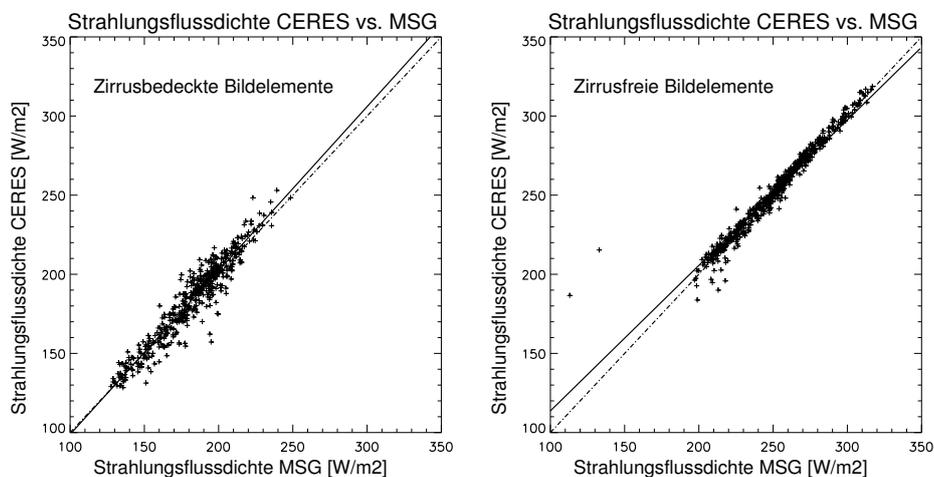


Abbildung 3.33: **Links:** Vergleich der ausgehenden langwelligen Strahlungsflussdichten der Zirkuswolken zwischen CERES und MSG. **Rechts:** Vergleich der ausgehenden langwelligen Strahlungsflussdichten ohne Zirkuswolken zwischen CERES und MSG (Neuronales Netz).

### 3.6.3 Validierung der kurzwelligen Strahlungsflussdichten

In Abb. 3.34 ist die Differenz der ausgehenden kurzwelligen Strahlungsflussdichten aus CERES und der mit dem neuronalen Netz berechneten kurzwelligen Strahlungsflussdichten dargestellt<sup>10</sup>.

<sup>10</sup>Da das Segment Nr. 6 des Kanals VIS006 nicht empfangen wurde, ist der Vergleich der kurzwelligen Strahlungsflussdichte auf die Segmente 7 und 8 beschränkt

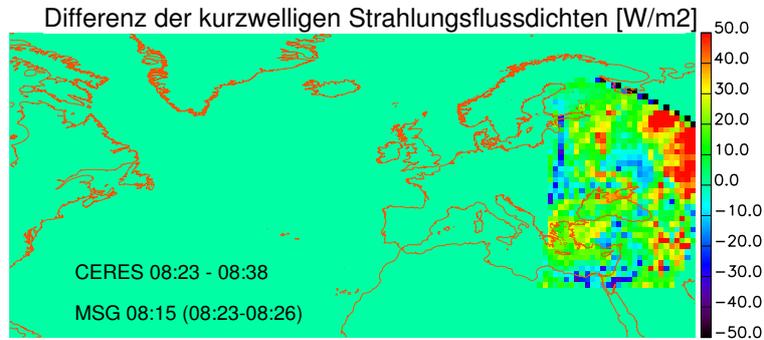


Abbildung 3.34: Differenz der ausgehenden kurzwelligen Strahlungsflussdichten am Oberrand der Atmosphäre, abgeleitet aus MSG Daten und CERES Daten.

In Abb. 3.35 sind die Ergebnisse der kurzwelligen Strahlungsflussdichten aus CERES und SEVIRI gegeneinander aufgetragen. Man sieht eine gute Übereinstimmung der beiden Berechnungen. Für andere Termine zeigt sich jedoch eine systematische Abweichung der beiden Werte. Die aus MSG berechnete kurzwellige ausgehende Strahlungsflussdichte ist höher als die kurzwellige Strahlungsflussdichte aus CERES Daten. Die Streuung ist größer als für die langwellige Strahlungsflussdichte.

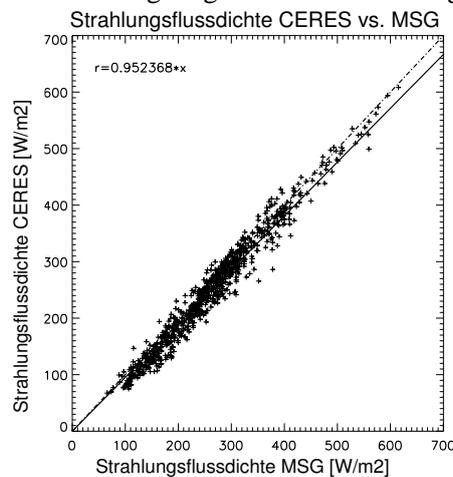


Abbildung 3.35: Vergleich der ausgehenden kurzwelligen Strahlungsflussdichten zwischen CERES und MSG (Neuronales Netz).

Vergleicht man die mit Zirkuswolken bedeckten Bildelemente (siehe Abb. 3.36 links) mit den Ergebnissen ohne Zirkusbedeckung (Abb. 3.36 rechts) zeigt sich kein deutlich größerer Fehler zwischen zirkusfreien und zirkusbedeckten Bildelementen.

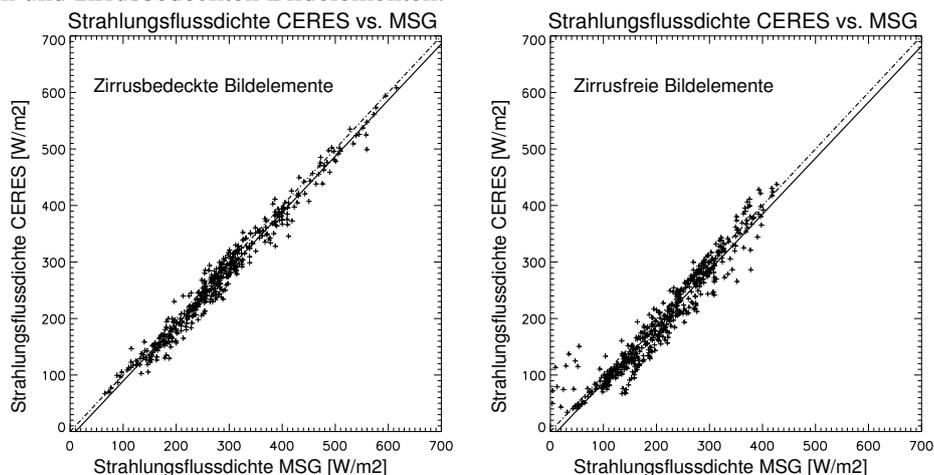


Abbildung 3.36: **Links:** Vergleich der ausgehenden kurzwelligen Strahlungsflussdichten der zirkusbedeckten Bildelemente zwischen CERES und MSG. **Rechts:** Vergleich der ausgehenden kurzwelligen Strahlungsflussdichten der zirkusfreien Bildelemente zwischen CERES und MSG (Neuronales Netz).

### 3.6.4 Zusammenfassung Validierung der Strahlungsflussdichten

In Tabelle 3.5 sind die Ergebnisse der Vergleiche zwischen CERES Strahlungsflussdichten und den aus MSG abgeleiteten kurzwelligen und langwelligen Strahlungsflussdichten dargestellt. Es wurden 12 Szenen verglichen. Für die Monate März bis Dezember 2004 wurde je eine Szene pro Monat zufällig ausgesucht. Für Februar 2004 wurden zwei Szenen verglichen. Drei mit Hilfe der multiliniaren Parametrisierung (MLP) berechnete Szenen wurden ebenfalls verglichen. Die Tabelle enthält die Steigung der linearen Regression und das Bestimmtheitsmaß als Maß für die Streuung.

Tabelle 3.5: Auswertung Validierung der Strahlungsflussdichten

MSG KNN	CERES	Steigung SW	Bestimmtheitsmaß SW	Steigung LW	Bestimmtheitsmaß LW
04/02/01 08:15	08:23 - 08:38	0.95	96.7	1.01	98.07
04/02/02 02:00	02:07 - 02:23	-	-	0.99	97.76
04/03/24 08:00	08:00 - 08:13	0.93	93.72	1.02	96.57
04/04/08 07:15	07:14 - 07:29	0.96	92.45	1.02	96.48
04/05/08 09:15	09:02 - 09:21	0.89	95.65	1	97.26
04/06/14 11:00	11:01 - 11:18	0.87	96.46	1	96.94
04/07/08 12:00	12:00 - 12:08	0.93	98.07	0.98	98.75
04/08/13 14:45	14:39 - 14:59	0.94	92.73	0.98	86
04/09/02 12:45	12:38 - 12:57	0.87	95.33	0.98	95.96
04/10/15 18:45	18:35 - 18:59	-	-	1.02	94.86
04/11/10 20:45	20:50 - 20:59	-	-	1	97.21
04/12/22 23:15	23:07 - 23:24	-	-	0.99	97.35
Arithmetisches	Mittel	0.92	95.14	1	96.1
MSG MLP	CERES	Steigung SW	Bestimmtheitsmaß SW		
04/05/08 09:15	09:02 - 09:21	0.88	96.35		
04/07/08 12:00	12:00 - 12:08	0.95	97.49		
04/09/02 12:45	12:38 - 12:57	0.89	95		
Arithmetisches	Mittel	0.91	96.28		

Für den langwellige Anteil ist die Übereinstimmung der Strahlungsflussdichten sehr gut. Die mit Hilfe des neuronalen Netzes berechnete kurzwellige Strahlungsflussdichte ist gegenüber CERES um ca. 8% größer. Die wolkenbedeckten Bildelemente zeigen eine höhere Abweichung als die unbedeckten Bildelemente. Die Abweichungen sind jedoch nicht von der Wolkenart abhängig.

Die mit Hilfe der multiliniaren Parametrisierung berechneten kurzwelligen Strahlungsflussdichten zeigten für die drei untersuchten Termine eine größere Überschätzung der ausgehenden Strahlungsflussdichte im Vergleich zu den Ergebnissen des neuronalen Netzes. Vor allem aus diesem Grund wurden für die weiteren Untersuchungen, insbesondere für die Abschätzung des Strahlungsantriebs des Flugverkehrs für den kurzwelligen Anteil, die mit neuronalem Netz berechneten kurzwelligen ausgehenden Strahlungsflussdichten verwendet.

Die Ableitung der CERES Strahlungsflussdichten basiert auf aus Messungen abgeleiteten Parametrisierungen und damit auf einem völlig anderem Verfahren als die Methoden zur Berechnung der SEVIRI Strahlungsflussdichten. Diese Methoden sind ausschließlich aus Modelldaten abgeleitet. Die Übereinstimmung vor allem der langwelligen Strahlung zeigt die hohe Qualität der in libRadtran implementierten Modelle zur Beschreibung der Strahlungsflussdichten in der Atmosphäre. Für die kurzwellige Strahlung zeigt sich der Einfluss der 3-D Effekte stärker als im langwelligen. Diese Effekte sind in den verwendeten 1-D Modellen nicht repräsentiert. Strahlungsflussdichten, die z.B. von Wolkenkanten reflektiert mit MSG gemessen werden, können zu einer Überschätzung der kurzwelligen Strahlungsflussdichten führen, da in dem verwendeten Modell immer von einer Reflexion an der Wolkenoberkante ausgegangen wird.

Die entwickelten Werkzeugen sind zuverlässig genug, um die notwendigen Strahlungsflussdichten für die Bestimmung des flugverkehrsinduzierten Strahlungsantriebs abzuschätzen. Aufgrund Schnelligkeit der entwickelten Berechnungsroutinen war es möglich, die Strahlungsflussdichten am Oberrand der Atmosphäre für die 11 Monate des Jahres 2004 mit einer zeitliche Auflösung von 15 Minuten in wenigen Monaten zu berechnen. Die entwickelten Methoden können auch für andere wissenschaftliche Anwendungen von hohem Nutzen sein.

Die Daten stehen auf einem RAID Archiv am Institut für Physik der Atmosphäre als IDL-SAV Dateien in Satelliten- und equidistanter Projektion ( $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ) zur Verfügung.

## Kapitel 4

# Der Einfluss des Flugverkehrs auf die Zirrusbedeckung

In diesem Kapitel wird der Zusammenhang zwischen Flugverkehrsdichte und einer Erhöhung des Zirrusbedeckungsgrad untersucht. Die Theorie zur Beschreibung der Abhängigkeit der zusätzlichen Zirrusbedeckung von der Flugverkehrsdichte von [MANNSTEIN und SCHUMANN 2005] wird vorgestellt und hergeleitet. Statistische Methoden zur Abschätzung der zusätzlichen Zirrusbedeckung werden vorgestellt und diskutiert. Anschließend werden die Ergebnisse der statistischen Untersuchungen für die Region  $80^{\circ}W - 50^{\circ}O$ ,  $20^{\circ}N - 75^{\circ}N$  sowie für Teilgebiete für das Jahr 2004 gezeigt und erläutert.

### 4.1 Theoretische Abhängigkeit des Bedeckungsgrades von der Flugverkehrsdichte

Flugzeugabgase induzieren Kondensstreifen, wenn die umgebende Luft kalt und feucht genug ist. Eine Quantifizierung solcher atmosphärischen Bedingungen bietet das Schmidt-Applemann Kriterium ([SCHMIDT 1941], [APPLEMAN 1953], [SCHUMANN 1996]). Wenn die umgebende Atmosphäre nicht eisübersättigt ist, verschwinden die Kondensstreifen nach wenigen Sekunden. Ist die Luft jedoch eisübersättigt, wachsen die Eiskristalle, indem sie die umgebende Feuchtigkeit aufnehmen, während sich die Kondensstreifen durch turbulente Vermischung und Windscherung ausbreiten.

Um einen theoretischen Zusammenhang zwischen der Flugverkehrsdichte und dem Zirrusbedeckungsgrad herzuleiten, wird zunächst ein eisübersättigtes Gebiet mit der Fläche  $A$  betrachtet. In diesem Gebiet können Flugzeuge beliebige Wege zurücklegen, die sich auch überlappen können. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass ein Flugzeug, welches dieses Gebiet überfliegt, innerhalb dieses Gebietes einen Kondensstreifen mit der Länge  $l$  und Breite  $r$  erzeugt. Der Bedeckungsgrad oder die Bedeckungswahrscheinlichkeit ist dann:  $c_k = \frac{lr}{A}$ .

Um die Überlappung zu berücksichtigen, wird der Gesamtflugweg  $L$  in dem Gebiet mit der Fläche  $A$  in  $N$  voneinander unabhängige Kondensstreifen mit der Länge  $\frac{L}{N}$  unterteilt. Die Bedeckungswahrscheinlichkeit ist dann für den einzelnen Kondensstreifen gegeben mit:  $\frac{c_k}{N} = \frac{Lr}{NA}$ . Für die Herleitung ist es zweckmäßig die Umkehrwahrscheinlichkeit  $1 - \frac{c_k}{N} = 1 - \frac{Lr}{NA}$  zu betrachten.

Da die Flugwege unabhängig sind, ist für  $N$  Kondensstreifen die Wahrscheinlichkeit gleich, das Gebiet  $A$  nicht zu überdecken. Damit ist die Wahrscheinlichkeit das Gebiet mit  $N$  Kondensstreifen nicht zu überdecken das Produkt der Einzelwahrscheinlichkeiten:

$$\left(1 - \frac{Lr}{NA}\right)^N = \left(1 - \frac{\left(\frac{Lr}{A}\right)}{N}\right)^N . \quad (4.1)$$

Führt man den Grenzübergang für  $N \rightarrow \infty$  durch, so erhält man  $e^{-\frac{Lr}{A}}$ , die Umkehrwahrscheinlichkeit nach einem Gesamtflugweg  $L$  in einem Gebiet der Fläche  $A$  ein infinitesimal kleines Teilsegment zu überdecken. Damit ist die Wahrscheinlichkeit das nach einem Flugweg  $L$  in dem Gebiet  $A$  ein Punkt bedeckt ist, bzw. der Bedeckungsgrad:

$$D(X > L) = c_f = 1 - e^{-\frac{Lr}{A}}. \quad (4.2)$$

Der mittlere Flugweg, um einen beliebigen Punkt zu überdecken, ist dann:

$$\bar{y} = \int_0^\infty l D'(l) dl = \frac{r}{A} \int_0^\infty l e^{-\frac{lr}{A}} dl = \frac{A}{r}. \quad (4.3)$$

Die Fläche, die überdeckt werden muss, ist also gerade  $\bar{y} \cdot r$  die Fläche  $A$  des Gesamtgebiets. (Würde keine Überlappung zugelassen, wäre dies  $\frac{A}{2}$ ).

Statt dem Flugweg verwendeten [MANNSTEIN und SCHUMANN 2005] die **Flugverkehrsdichten**  $d$ . Die Flugverkehrsdichte ist der Flugweg in einem Zeitintervall  $\Delta t$  pro Flächeneinheit. Die geflogene Wegstrecke ist somit  $L = d\Delta t A$ . Die Breite der Kondensstreifen hängt von der mittleren Ausbreitungsgeschwindigkeit  $s_h$  und dem mittleren Lebensalter  $\bar{t}$  des Kondensstreifens ab. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $s_h$  ist nach [FREUDENTHALER et al. 1995] zwischen 1 und 8 km/h und im Mittel 4 km/h. Damit ist

$$c_k = \frac{Lr}{A} = \frac{d\Delta t A s_h \bar{t}}{A}$$

Eingesetzt in die Gleichung 4.2 ergibt sich:

$$c_f = 1 - e^{-d\Delta t s_h \bar{t}}$$

bzw. mit  $d^* = (\Delta t s_h \bar{t})^{-1}$

$$c_f = 1 - e^{-\frac{d}{d^*}} \quad (4.4)$$

$d^*$  ist hierbei die mittlere Flugverkehrsdichte, um einen beliebigen Punkt zu überdecken.

In der obigen Betrachtung wurde angenommen, dass die Atmosphäre eisübersättigt ist. [GIERENS et al. 1999b] und [GIERENS et al. 2000] berechneten eine mittlere Eisübersättigung zwischen 11.2 % und 15.2 % innerhalb eines globalen Untersuchungsgebiets. Über Europa und dem Nordatlantik wurden Gebiete gefunden bis zu 33 % Eisübersättigung. Der Anteil der eisübersättigten Gebiete wurde dabei aus Messungen mit regulären Instrumenten in Verkehrsflugzeugen bestimmt. In den meisten Fällen war das Schmidt-Appleman-Kriterium erfüllt. Teilweise waren diese Gebiete mit natürlichen Zirren bedeckt.

Der Anteil an dem Gesamtgebiet, in dem sich Kondensstreifen bilden können sei  $c_{pot}$ . Den Anteil natürlicher Zirren, die sich ohne den Flugverkehr bilden sei  $c_0$ , so dass sich der Gesamtbedeckungsgrad in Abhängigkeit vom Flugverkehrsdichte ergibt:

$$c_{tot} = c_0 + c_{pot}(1 - e^{-\frac{d}{d^*}}) \quad (4.5)$$

Dies ist die von [MANNSTEIN und SCHUMANN 2005] hergeleitete Formel, zur Beschreibung der Abhängigkeit der zusätzlichen Zirrusbedeckung von der Flugverkehrsdichte.

## 4.2 Grundlagen und Methoden der statistischen Untersuchung

In Abb. 4.1 ist die aus SEVIRI abgeleitete Zirrusbedeckung für das untersuchte Teilgebiet  $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 30^{\circ}N - 60^{\circ}N$  dargestellt im Vergleich mit der Flugverkehrsdichte. Anhand dieser Einzelszene lässt sich der Zusammenhang zwischen Flugverkehrsdichte und erhöhtem Bedeckungsgrad nicht erkennen. Wenn ein Zusammenhang bestünde, müsste der Bedeckungsgrad der Bildelemente mit Flugverkehr größer sein als der der Bildelemente ohne Flugverkehr. Eine Einzelszene reicht nicht aus, um diese Werte zu berechnen. Bereits an diesem Beispiel ist zu erkennen, dass eine quantitative Aussage nur durch Vergleich vieler Daten getroffen werden kann.

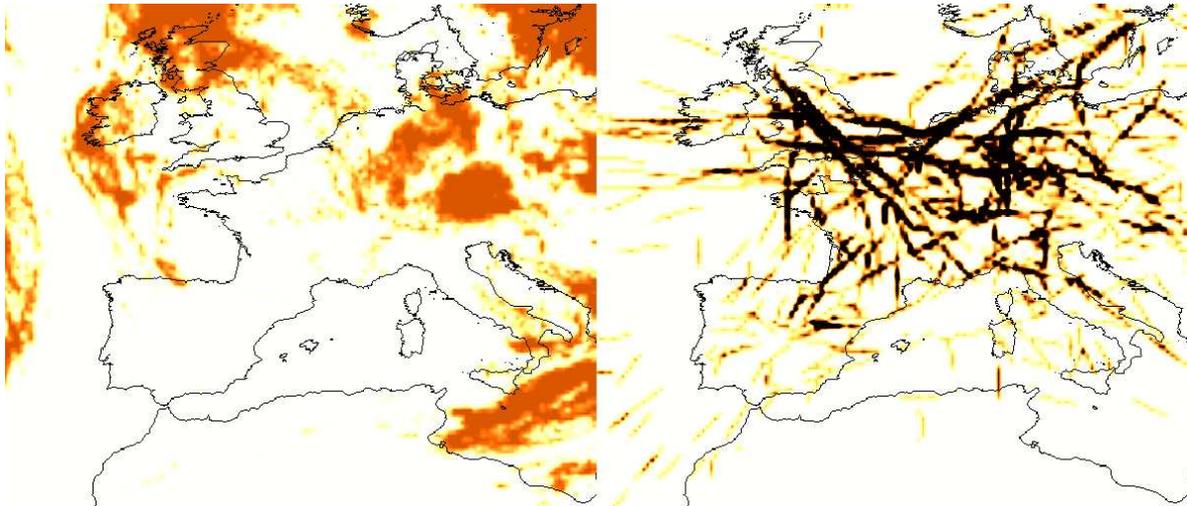


Abbildung 4.1: **Links:** Aus MSG-SEVIRI abgeleitete Zirrusmaske für das Teilgebiet  $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 30^{\circ}N - 60^{\circ}N$ , 2004/02/11 07:45 UTC. **Rechts:** Integrierte Flugverkehrsdichte im Zeitintervall 07:30 - 07:45 UTC, 2004/02/11.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden statistischen Methoden zur Abschätzung des zusätzlichen Bedeckungsgrades und der Korrelation der Zirrusbedeckung mit der Flugverkehrsdichte entwickelt, bzw. die in [MANNSTEIN und SCHUMANN 2005] verwendeten Methoden erweitert und verbessert. Sie werden in diesem Abschnitt vorgestellt. Mit Hilfe der verbesserten Methoden wurden Fehler durch mögliche Scheinkorrelationen, die durch den Tagesgang verursacht werden können, eliminiert und die Autokorrelation minimiert. Die Untersuchungen der Daten auf Scheinkorrelation und Autokorrelation werden in diesem Abschnitt dargestellt und diskutiert.

### 4.2.1 Verwendete Daten

Für die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Zirrusbedeckung und Flugverkehrsdichte wurden die mittleren Bedeckungsgrade der Zirren und Flugverkehrsdichten benötigt. Die Flugverkehrsdaten wurden von **EUROCONTROL** (European Organisation for the Safety of Air Navigation), der europäischen Flugverkehrssicherung, im Rahmen des CONTRAILS Projektes aufbereitet und zur Verfügung gestellt. Die Daten liegen in einer äquidistanten zylindrischen Projektion vor. Die zeitliche Auflösung beträgt 15 min. Die räumliche Auflösung ist  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ . Die Daten sind für das gesamte Jahr 2004 verfügbar. Die Flugverkehrsdaten umfassen das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ). Über Europa basieren diese auf Transpondermeldungen, die zwei- bis dreiminütige Abständen von allen zivilen Flugzeuge gesendet werden. Über den Nordatlantik basieren sie zum Teil auf Interpolationen. Dadurch ist die Qualität dieser Daten eingeschränkt. Der Flugverkehr zwischen Russland und den ehemaligen Republiken der UdSSR ist im Flugverkehrsdatensatz von EUROCONTROL teilweise nicht enthalten. Dies erschwert eine genaue Analyse dieser Region.

Die Daten enthalten eine Fluglänge im Flugverkehrsfenster 200-450 HF (Hektofuss), d.h. der geflogene Flugweg für das jeweilige Element ( $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ) integriert über 15 Minuten. Vertikalinformation des Flugverkehrs war nicht verfügbar. Die vertikale Verteilung der eisübersättigten Gebiete musste deshalb vernachlässigt werden. Damit beschränkte sich die Untersuchung auf einen zweidimensionalen Raum. Für alle in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurden die Flugverkehrsdaten in eine Flugverkehrsdichte mit der Einheit Flugverkehrslänge in Kilometern pro Quadratkilometer pro Stunde  $\left[\frac{\text{km}}{\text{km}^2\text{h}}\right]$  transformiert.

Die Zirusdaten wurden mit dem MeCiDA Algorithmus (siehe Abschnitt 3.3) aus den SEVIRI Daten abgeleitet. Für die Auswertung wurden die in zylindrischer Projektion zur Verfügung stehenden Daten verwendet. Die Zirusbedeckungsgrade wurden aus den MeCiDA-Zirusmasken flächengewichtet berechnet. Die Untersuchungen beschränken sich auf einen MSG-Satellitenzenitwinkel kleiner  $75^\circ$ , da die Zirusmasken in dem ausgewählten Gebiet bis zu diesem Satellitenzenitwinkel zur Verfügung stehen.

Die Zirusbedeckung und die Flugverkehrsdichte wurden zum gleichen Zeitpunkt untersucht. Dabei ist zu beachten, dass der Flugverkehr Kondensstreifen und Zirren erzeugt, die eine Lebensdauer von mehreren Stunden haben können. In dieser Zeit können sie durch Wind in Bildelemente verdriften, in denen z.B. kein Flugverkehr stattfindet. Die Wirkung des Flugverkehrs kann somit unterschätzt werden.

#### 4.2.2 Untersuchung der Daten

Um Fehler durch mögliche Scheinkorrelationen und die Autokorrelation der Daten zu vermeiden, wurden die Daten als erstes bezüglich dieser Punkte untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchungen auf Autokorrelation werden gezeigt und die daraus resultierenden Probleme diskutiert. Die Untersuchungen des Tagesgangs der Zirusbedeckung und der Flugverkehrsdichte werden vorgestellt und besprochen.

Zunächst wird die Anzahl der Bildelemente abgeschätzt, die für eine signifikante Aussage benötigt werden.

*Die zur Sicherung einer Mittelwertdifferenz durchschnittlich erforderliche Beobachtungszahl jeder Stichprobe ( $n = n_1 = n_2$ ) lässt sich nach*

$$n = 2 \left( \frac{z\sigma}{d} \right)^2 \quad (4.6)$$

*abschätzen. Wobei  $d$  die vermutete Differenz,  $\sigma$  die Standardabweichung der Einzelwerte in der Grundgesamtheit und  $z$  der für die gewünschte statistische Sicherheit gewählte Kennwert der Normalverteilung ist ([SACHS 1969], S. 252).*

Für eine statistische Sicherheit von 95% beträgt  $z = 1.96 \approx 2$ .  $\sigma$  kann man mit 0.5 schätzen (U-Verteilung<sup>1</sup>). Demnach wäre  $n$  für einen Unterschied des Bedeckungsgrades um 1%

$$n = 2 \left( \frac{2 \times 0.5}{0.01} \right)^2 = 20000. \quad (4.7)$$

Weder der Bedeckungsgrad noch die Flugverkehrsdichte sind **normalverteilte** Grundgesamtheiten. Abb. 4.1 (links) zeigt, dass Zirren in Clustern auftreten. In der Nachbarschaft eines zirusbedeckten Bildelementes ist die Wahrscheinlichkeit höher, ein zirusbedecktes Bildelement anzutreffen. Das liegt an den eisübersättigten Gebieten, die horizontal über mehrere hundert Kilometer ausgedehnt sein

<sup>1</sup>Die Bildelemente in der Satellitenprojektion sind entweder bedeckt oder zirusfrei. Durch die Projektion auf ein  $0.25 \times 0.25$  Gitter ergibt sich für die Verteilung der Daten eine U-Verteilung.

können. Die Eisübersättigung kann mehrere Stunden existieren. Daher ist auch für den nächsten Zeitschritt die Wahrscheinlichkeit hoch, dass ein bedecktes Bildelement weiterhin zirkusbedeckt bleibt. D.h. die Grundgesamtheit ist sowohl räumlich als auch zeitlich stark autokorreliert. Dies gilt auch für die Flugverkehrsdichte.

Für den Februar 2004 sind in Abb. 4.2 links die Koeffizienten  $k_{i,j,1}$   $i = 1 \dots 140, j = 1 \dots 120$  der Autokorrelationsmatrix der Zirkusbedeckung dargestellt. D.h. die räumliche Komponente der Autokorrelationsmatrix. Im rechten Teil der Abb. 4.2 sind die  $k_{1,1,l}$   $l = 1 \dots 1000$  dargestellt, die die zeitliche Komponente der Autokorrelation veranschaulicht. Zur Berechnung der Autokorrelation wurde der Zusammenhang der Fourier Transformation mit der Autokorrelation (Wiener-Khinchin Theorem) ausgenutzt. Die gesamte Matrix hat die Dimension  $140 \times 120 \times 2673$ .<sup>2</sup>

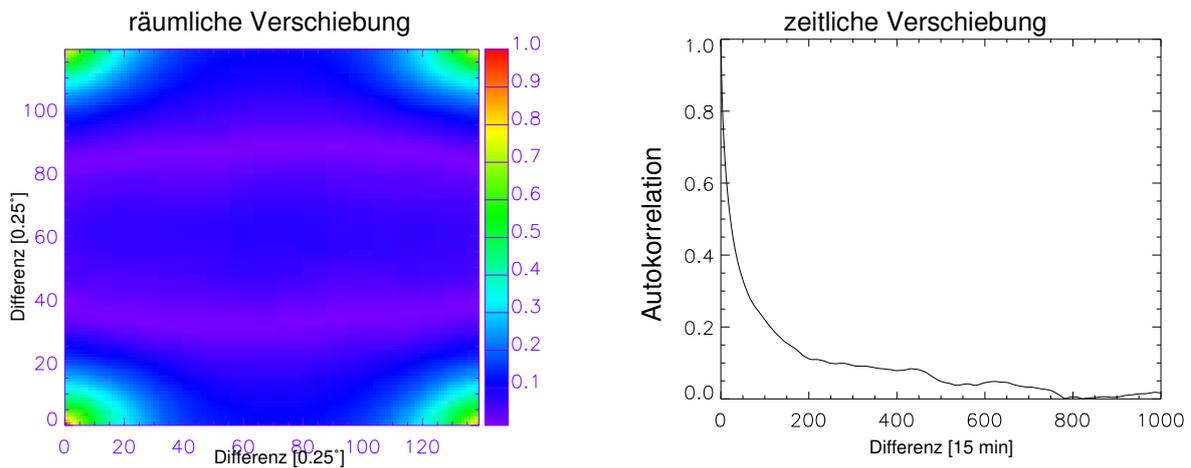


Abbildung 4.2: **Links:** Autokorrelationskoeffizienten  $k_{i,j,1}$  der Zirkusmaske für Februar 2004. **Rechts:** Autokorrelationskoeffizienten  $k_{0,0,1}$  der Zirkusmaske für Februar 2004

Anhand der Autokorrelationskoeffizienten in Abb. 4.2 sieht man die räumliche und zeitliche Autokorrelation der Zirren. Räumlich wie zeitlich klingt die Autokorrelation der Zirren näherungsweise exponentiell ab.

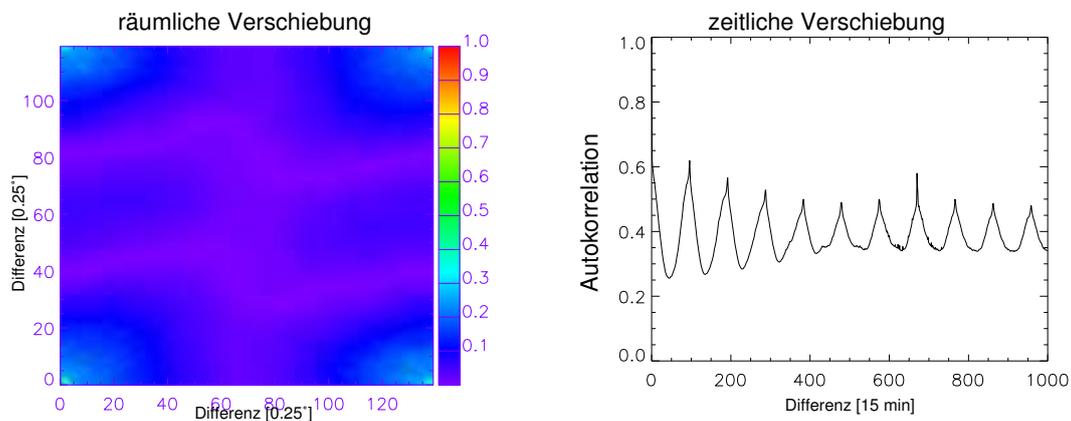


Abbildung 4.3: **Links:** Autokorrelationskoeffizienten  $k_{i,j,1}$  der Flugverkehrsdichte für Februar 2004. **Rechts:** Autokorrelationskoeffizienten  $k_{0,0,1}$  der Flugverkehrsdichte für Februar 2004

In Abb. 4.3 sind die Autokorrelationskoeffizienten der Flugverkehrsdichte veranschaulicht. Die räumliche Autokorrelation (Abb. 4.3 links) ist sehr viel kleiner als die der Zirren. Bildelemente in einer Entfernung von ca. 20 Bildelementen, d.h. ca. 600km zeigen keinen Zusammenhang mehr.

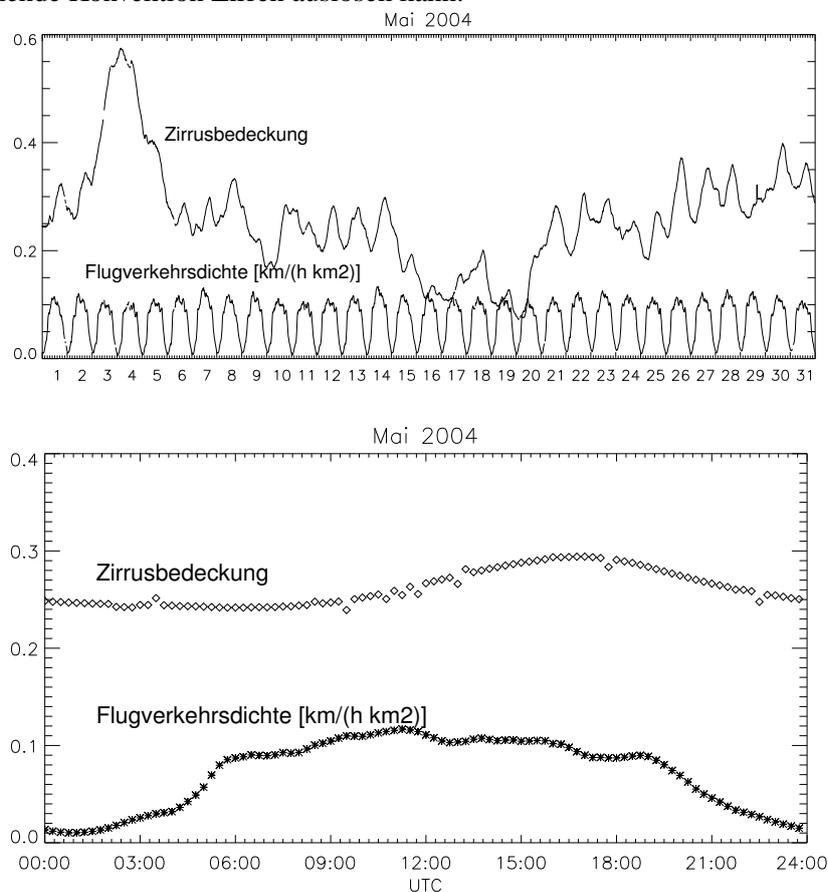
Um die Autokorrelation zu reduzieren, kann man die Daten ausdünnen und nur jedes 400. Bildelement ( $20 \times 20$ ) für die Auswertungen verwenden. Die zeitliche Komponente nimmt während eines Tages sehr schnell ab, steigt jedoch für den nächsten Tag wieder an. Durch das Ausdünnen verringert sich

<sup>2</sup>Die Gesamtzahl der Bilder beträgt  $29 \times 96 = 2784$ . 111 Bilder sind fehlerhaft oder wurden von EUMETSAT nicht versandt. Diese Bilder wurden aus der Statistik eliminiert.

auch die zeitliche Autokorrelation. Um die zeitliche Autokorrelation zusätzlich zu reduzieren, kann man aus jedem Tag nur vier<sup>3</sup> Zeitpunkte zufällig auswählen.

Autokorrelation kann zu einer Überschätzung der Präzision von Testparametern führen. Dies führt tendenziell dazu, dass die Nullhypothese (die Mittelwerte der Gesamtheiten sind gleich) verworfen wird, wenn sie tatsächlich beibehalten werden sollte. Da in Folge verschiedene Tests verwendet werden, die normalverteilte Grundgesamtheiten oder unabhängige Stichproben erfordern, muss die Autokorrelation reduziert werden.

Bei der Untersuchung des Zusammenhangs der Zirkusbedeckung und der Flugverkehrsdichte muss desweiteren berücksichtigt werden, dass die Zirkusbedeckung einen natürlichen Tagesgang hat und auch die Flugverkehrsdichte abhängig von der Tageszeit variiert. Die Flugverkehrsdichte steigt um 05:00 UTC stark an und verringert sich ab ca. 21:00 UTC. In Abb. 4.4 (oben) sind für die einzelnen Tage des Monat Mai 2004 die mittlere Zirkusbedeckung und die mittlere Flugverkehrsdichte für das Gebiet  $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 30^{\circ}N - 60^{\circ}N$  (siehe Abb. 4.1) dargestellt. In der Abb. 4.4 ist der Tagesgang der Flugverkehrsdichte und der Zirkusbedeckung für Mai 2004 aufgetragen. Die natürliche Zirkusbedeckung hat im Winter einen geringen Tagesgang, für die Sommermonate vergrößert sich dieser, da auch hochreichende Konvektion Zirren auslösen kann.

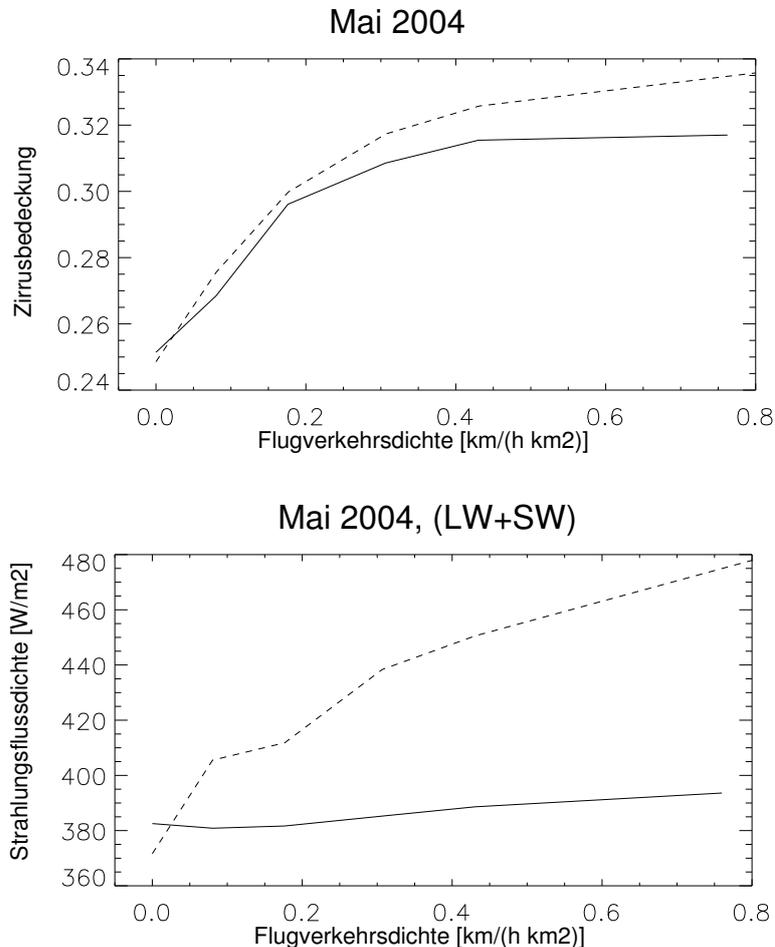


**Abbildung 4.4:** **Obere Grafik:** Mittlere Zirkusbedeckung (oben) und mittlere Flugverkehrsdichte für das Teilgebiet für den Zeitraum Mai 2004. **Untere Grafik:** Tagesgang des mittleren Bedeckungsgrades der Zirren (Rauten) und Tagesgang der Flugverkehrsdichte (Sterne) gemittelt aus 31 Tagen des Mai 2004.

Die Tagesabhängigkeit beider Grössen könnte zu einer Scheinkorrelation führen, wenn man ohne Beachtung dieser Zusammenhänge die mittlere Zirkusbedeckung für Bildelemente mit einer Flugverkehrsdichte größer Null mit dem Mittelwert der Zirkusbedeckung für die Bildelemente ohne Flugver-

<sup>3</sup>Wählt man aus 335 Tagen vier Zeitpunkte zufällig, ist nahezu sichergestellt, dass jeder der 96 Zeitpunkte mindestens einmal ausgewählt wird. Zieht man nur einmal wäre die Wahrscheinlichkeit mindestens einmal einen bestimmten Zeitpunkt auszuwählen gleich 97.003980 %. Dies würde eine unnötige Unsicherheit zur Folge haben. Bei zwei Zeitpunkten pro Tag ist die Wahrscheinlichkeit 99.910239 %. Dies ist theoretisch ausreichend. Bei vier Zeitpunkten erhält man 99.999919 %, so dass nahezu ausgeschlossen ist, dass ein Zeitpunkt nicht berücksichtigt wird. (Berechnet mit der BINOMIAL(V, N, P) IDL-Funktion. V=1, N=335 · Z, Z=1,2 und 4 und P=1/96.)

kehr vergleichen würde. Die mittlere Zirrusbedeckung für alle Bildelemente mit einer Flugverkehrsdichte größer Null würde hauptsächlich aus den Messungen zwischen 05:00-21:00 UTC berechnet werden. Damit wäre die Wahrscheinlichkeit höher, dass die Zirrusbedeckung größer ist als für die Bildelemente ohne Flugverkehr. Um diesen Fehler zu vermeiden, muss die Anzahl der ausgewählten Bildelemente für jeden Zeitpunkt gleich sein.



**Abbildung 4.5: Obere Grafik:** Zirrusbedeckung in Abhängigkeit der mittleren Flugverkehrsdichte für das Teilgebiet für den Zeitraum Mai 2004. Die gestrichelte Linie ist die Abhängigkeit der Zirrusbedeckung ohne Berücksichtigung des Tagesgangs. Die durchgezogene Linie ist die Abhängigkeit mit Berücksichtigung des Tagesgangs. **Untere Grafik:** Zirrusbedeckung in Abhängigkeit der mittleren Flugverkehrsdichte für das Teilgebiet für den Zeitraum Mai 2004. Die gestrichelte Linie ist die Abhängigkeit der Zirrusbedeckung ohne Berücksichtigung des Tagesgangs. Die durchgezogene Linie ist die Abhängigkeit mit Berücksichtigung des Tagesgangs.

In Abb. 4.5 sieht man die Ergebnisse der in [MANNSTEIN und SCHUMANN 2005] verwendeten Methoden und der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Methode gegenübergestellt. Im oberen Bild ist die Abhängigkeit der Zirrusbedeckung von der Flugverkehrsdichte aufgetragen. Die gestrichelte Kurve ist ohne die Eliminierung des Tagesgangeinflusses berechnet worden (Methode von [MANNSTEIN und SCHUMANN 2005]). Die durchgezogene Linie zeigt den Zusammenhang ohne den Einfluß des Tagesgangs. Man sieht eine steilere Zunahme der Zirrusbedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte, wenn der Einfluss des Tagesgangs nicht eliminiert wird. Die Unterschiede sind jedoch im Vergleich zu den statistischen Unsicherheiten vernachlässigbar. Für die Untersuchung der Strahlungsflussdichte kann dieser Effekt nicht mehr vernachlässigt werden. Im unteren Bild ist die Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte aufgetragen. Die gestrichelte Linie ist mit der Methode von [MANNSTEIN und SCHUMANN 2005] berechnet worden. Die durchgezogene Linie wurde mit den im Anschluss vorgestellten Verfahren berechnet. Der Zusammenhang zwischen der Flugverkehrsdichte und der Strahlungsflussdichte wird in Kapitel 5 genau untersucht und erläutert. An dieser Stelle soll an einem Beispiel demonstriert werden, dass der Einfluss des natürlichen Tagesgangs des Flugverkehrs und der ausgehenden Strahlungsflussdichte eliminiert werden muss. In

der Nacht wird nur der langwellige Anteil emittiert. Für das Teilgebiet ist die mittlere emittierte Strahlungsflussdichte näherungsweise  $250 \frac{W}{m^2}$ . Tagsüber steigt die mittlere ausgehende Strahlungsflussdichte auf über  $500 \frac{W}{m^2}$ , da der kurzwellige Anteil hinzukommt. Die Flugverkehrsdichte ist in der Nacht völlig unabhängig davon sehr viel geringer als bei Tag. Es ergibt sich wie in Abbildung 4.5 unten (gestrichelte Linie) eine deutliche Korrelation. Interpretiert man diese Kurve als kausalen Zusammenhang zwischen Flugverkehr und Strahlungsflussdichte, dann würde der Flugverkehr in den oberen Flugverkehrsdichteklassen im Mai in einer Größenordnung von bis zu  $100 \frac{W}{m^2}$  kühlen. Diese Interpretation ist jedoch nicht zulässig. Für die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Flugverkehr und Strahlungsflussdichte ist eine Verbesserung der statistischen Methode notwendig. Für die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Zirkusbedeckung und Flugverkehrsdichte kann der Fehler, der durch die Scheinkorrelation bedingt wird, vernachlässigt werden. Aus Konsistenzgründen und um soviel Fehler als möglich auszuschließen, wurden auch für die Untersuchung der Zirkusbedeckung Methoden verwendet, die den Tagesgang eliminieren.

### 4.2.3 Verwendete Methoden

Die Ergebnisse der statistischen Untersuchungen (Abschnitt 4.3) beruhen auf zwei Methoden. Zum einen wird der durch den Flugverkehr verursachte zusätzliche Bedeckungsgrad abgeschätzt. Zum anderen wird die Abhängigkeit der Bedeckung von der Zunahme der Flugverkehrsdichte untersucht. Die Methoden zur Berechnung dieser Werte werden vorgestellt und kurz diskutiert. Die Methoden sind eine Verbesserung der von [MANNSTEIN und SCHUMANN 2005] verwendeten Verfahren und berücksichtigen den natürlichen Tagesgang der Zirkusbedeckung.

#### 4.2.3.1 Abschätzung des zusätzlichen durch den Flugverkehr bedingten Bedeckungsgrads

Um vor allem die durch den Tagesgang bedingte Scheinkorrelation, die im vorhergehenden Abschnitt besprochen wurde, zu berücksichtigen, wurde der zusätzliche Bedeckungsgrad mit Hilfe folgender Methode abgeschätzt:

Zuerst werden für jeden Zeitpunkt die Bildelemente ohne Flugverkehr, mit Flugverkehr und ohne Unterscheidung ausgewählt. Aus diesen Bildelementen werden für jeden Zeitpunkt eine bestimmte Anzahl an Bildelemente zufällig (mit Zurücklegen<sup>4</sup>) ausgewählt. Die Größe ist abhängig von der Größe des untersuchten Gebietes. Es wird jedes 400. Element ausgewählt. Für das Teilgebiet  $15^\circ W - 20^\circ O, 30^\circ N - 60^\circ N$  beträgt die Anzahl der ausgewählten Elemente 40 ( $140 \times 120 / 400 = 42$ ). Für das gesamte Untersuchungsgebiet  $80^\circ W - 50^\circ O, 20^\circ N - 75^\circ N$  ist die Anzahl 200. Dies reduziert die räumliche Autokorrelation. Gleichzeitig ist sichergestellt, dass zu jedem Zeitpunkt die gleiche Anzahl an Bildelementen in den ausgewählten Mengen vorhanden ist. Damit wird die zeitliche Scheinkorrelation, die mit dem Tagesgang zusammenhängt, eliminiert. Da die Bildelemente in jedem Zeitschritt zufällig ausgewählt werden, vergrößert sich deren Abstand zu den in dem vorhergehenden oder nachfolgenden Zeitschritt ausgewählten Bildelementen. D.h. auch die zeitliche Autokorrelation ist erheblich geringer. Für die Abschätzung der zusätzlichen Zirkusbedeckung für das gesamte Jahr werden nur vier Zeitpunkte pro Tag zufällig ausgewählt.

Für die Abschätzung des zusätzlichen Bedeckungsgrades wird der Mittelwert der Zirkusbedeckung der Bildelemente ohne Flugverkehr mit dem Mittelwert über alle Bildelemente verglichen. Dabei wird der Mittelwert ohne Flugverkehr als natürliche Zirkusbedeckung (100%) angenommen. Relativ dazu wird die Erhöhung der Zirkusbedeckung berechnet

$$100 \cdot (\text{BE Gesamt} - \text{BE ohne Flugverkehr}) / \text{BE ohne Flugverkehr}.$$

Der Mittelwert der Bildelemente mit Flugverkehr wird ebenfalls berechnet und dient der Konsistenzprüfung.

<sup>4</sup>Bei diesem Auswahlverfahren kann ein Element der Grundgesamtheit, das bereits in eine Stichprobe aufgenommen wurde, bei den nächsten Ziehungen wieder ausgewählt werden.

Die Vertrauensbereiche der Mittelwerte (siehe [SACHS 1969] S. 248ff) werden für eine statistische Sicherheit von 95% mit

$$a = z \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = 2 \frac{\sigma}{\sqrt{115200}} \quad (4.8)$$

( $z = 1.96 \approx 2$ ,  $n \approx 40 \cdot 96 \cdot 30 = 115200$ ) berechnet. Die Mittelwerte werden nach der Formel ([SACHS 1969], S. 266):

$$\hat{t} = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{s_1^2 + s_2^2}{n}}} \quad (4.9)$$

auf Gleichheit getestet ( $2n - 2$  Freiheitsgrade). Ist der Prüfquotient kleiner als die Schranke (siehe C.2) [SACHS 1969] Tab. 27, S. 140), dann kann die Nullhypothese, die Mittelwerte der Gesamtheiten sind gleich, nicht abgelehnt werden.

#### 4.2.3.2 Zirrusbedeckung als Funktion der Flugverkehrsdichte

Mit dieser Methode wird der Zusammenhang zwischen der mittleren Zirrusbedeckung und der Flugverkehrsdichte gezeigt. Die Flugverkehrsdichte wird dazu in sechs Flugverkehrsdichteklassen aufgeteilt. Die jeweiligen Klassengrenzen sind in Tabelle 4.1 dargestellt. Sie sind äquidistant aufsteigend und so gewählt, dass genügend Bildelemente in den einzelnen Klassen enthalten sind, und die Anzahl der Bildelemente pro Klasse in der Summe die gleiche Größenordnung hat.

Tabelle 4.1: Definition der Flugverkehrsdichteklassen, (mit FVD = Flugverkehrsdichte in  $\left[\frac{km}{km^2h}\right]$ )

Klassen	Grenzen	
Klasse 1		$FVD = 0.0$
Klasse 2	$0.0 <$	$FVD \leq 0.125$
Klasse 3	$0.125 <$	$FVD \leq 0.25$
Klasse 4	$0.25 <$	$FVD \leq 0.375$
Klasse 5	$0.375 <$	$FVD \leq 0.5$
Klasse 6		$FVD > 0.5$

Es werden als erstes in jedem Zeitschritt die Bildelemente der jeweiligen Flugverkehrsdichteklasse ausgewählt. Aus diesen Bildelementen werden im zweiten Schritt wieder 40 Bildelemente zufällig mit Zurücklegen ausgewählt<sup>5</sup> Damit wird sichergestellt, dass zu jedem Zeitpunkt die gleiche Anzahl an Bildelementen in die Statistik eingeht. Dabei ist zu beachten, dass die Klasse 5 und 6 für die Zeitpunkte zwischen 23:45 und 0:30 UTC in dem Teilgebiet  $15^\circ W - 20^\circ O, 30^\circ N - 60^\circ N$  sehr dünn besetzt waren. In einigen Fällen enthielt die Klasse 6 nur zwei Bildelemente. Da mit Zurücklegen ausgewählt wird, wurden diese Bildelemente überbewertet. Damit war die Statistik für diese Klasse weniger aussagekräftig. Auf der anderen Seite traten diese Fälle nur selten auf, so dass die Werte trotzdem dargestellt werden. Für das Gesamtgebiet  $80^\circ W - 50^\circ O, 20^\circ N - 75^\circ N$  sind für alle Zeitpunkte alle Klassen ausreichend besetzt.

Die Mittelwerte der Zirrusbedeckung der einzelnen Flugverkehrsdichteklassen wurden in Abhängigkeit der Mittelwerte der Flugverkehrsdichte aufgetragen. Die Vertrauensbereiche der mittleren Zirrusbedeckungen und die Mittelwerte in den einzelnen Flugverkehrsdichteklassen werden hierbei aus einer geringeren Anzahl der Bildelemente berechnet als die Mittelwerte der flugverkehrsfreien Bildelemente und die Mittelwerte der Gesamtbedeckung. Durch die vorhergehende Auswahl der Flugverkehrsdichteklassen ist die räumliche Autokorrelation, im Vergleich zum Auswählen der 40 Bildelemente aus dem gesamten Bild, größer. Es ist wahrscheinlicher, dass die Bildelemente aus der einzelnen Flugverkehrsdichteklassen räumlich näher aneinander liegen, da auch die Flugverkehrsdichte autokorreliert ist. Um Fehler zu vermeiden, werden erneut aus diesen Mengen 20000<sup>6</sup> Bildelemente pro

<sup>5</sup>Für das größere Gesamtgebiet  $80^\circ W - 50^\circ O, 20^\circ N - 75^\circ N$  wurden 200 Bildelemente ausgewählt

<sup>6</sup> 20000 Bildelemente werden benötigt, um einen Unterschied des Bedeckungsgrades um 1% mit einer statistischen Sicherheit von 95% abzuschätzen.

Flugverkehrsdichteklasse zufällig ausgewählt. Bedingt durch die geringere Anzahl der ausgewählten Bildelemente vergrößern sich die Unsicherheiten der Mittelwerte. Das zusätzliche Ausdünnen trägt jedoch dazu bei, die Autokorrelation soweit als möglich zu reduzieren.

Die Korrelation zwischen der Flugverkehrsdichte und der Zirkusbedeckung wird mit dem **Spearman-schen Rang-Korrelationskoeffizient** (siehe Anhang C.1) quantifiziert. Dieses Maß bietet sich an, wenn ein Verdacht auf einen monotonen Trend besteht ([SACHS 1969], S. 394) und erfordert keine normalverteilten Gesamtheiten ([SACHS 1969], S. 390). Die Korrelation wird für alle (ausgewählten) Bildelemente berechnet. Zusätzlich wird der Korrelationskoeffizient für den Zusammenhang der mittleren Zirkusbedeckungen der Flugverkehrsdichteklassen mit den mittleren Flugverkehrsdichten der Klassen bestimmt. Die Signifikanz wird mit Werten aus [SACHS 1969], S. 391, Tabelle 103 (siehe Anhang C.1, Abb. C.1) für eine statistische Sicherheit von 95% ( $\alpha = 0.05^7$ ) geprüft<sup>8</sup>.

Da Flugverkehr in dem ausgewählten Gebiet stärker über Land stattfindet und die Zirkusbedeckung über Land höher sein kann als über Wasser, ist es möglich, dass eine Scheinkorrelation die Ergebnisse verfälscht. Deshalb wurde zusätzlich die Korrelationsuntersuchung über Land und über Wasser getrennt durchgeführt.

Die beschriebene Untersuchung wurde für die Monate Februar bis Dezember 2004 durchgeführt.<sup>9</sup>

---

<sup>7</sup>Soll geprüft werden, ob sich die Korrelation signifikant von Null unterscheidet so ist das Signifikanzniveau zu verdoppeln (zweiseitige Fragestellung) [SACHS 1969] S. 390. D.h. ist der Korrelationswert größer als der in Spalte  $\alpha = 0.025$  angegebene Wert, gilt das die Korrelation sich signifikant auf dem Signifikanzniveau  $\alpha = 0.05$  von Null unterscheidet.

<sup>8</sup>Für große  $n$  ( $n > 30$ ) wurde im Rahmen dieser Arbeit die IDL-Funktion R\_CORRELATE [IDL5.6 2002] zur Prüfung der Signifikanz verwendet.

<sup>9</sup>MSG ist seit Ende Januar 2004 im operationellen Betrieb.

### 4.3 Ergebnisse der statistischen Untersuchungen

Die statistischen Untersuchungen wurden für verschiedene Teilregionen und für das gesamte Gebiet  $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$  durchgeführt. Als erstes wurde das Teilgebiet über Europa und Nordafrika ( $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 30^{\circ}N - 60^{\circ}N$ ) ausführlich untersucht. Dieses Gebiet enthält Regionen mit einer sehr hohen Flugverkehrsdichte. Sowohl die Flugverkehrsdichtedaten als auch die Zirrusdaten haben innerhalb dieses Gebietes eine hohe Zuverlässigkeit. Da die natürliche Zirrusbedeckung während des Jahres variiert, war es notwendig, einzelne Monate des Jahres zu untersuchen. Die Untersuchung des Tagesgangs veranschaulicht den unterschiedlichen Einfluss der Flugverkehrsdichte auf die Zirrusbedeckung für verschiedene Zeitpunkte.

Anschließend werden Untersuchungen über den gesamten Zeitraum von 11 Monaten des Jahres 2004 für die Teilregion sowie für das gesamte Gebiet vorgestellt. Die Untersuchungen wurden zusätzlich getrennt für Land und Wasser durchgeführt, um mögliche Scheinkorrelationen auszuschließen. Zunächst wird die Untersuchung der einzelnen Monate betrachtet und diskutiert.

#### 4.3.1 Untersuchung des Jahresgangs für das Teilgebiet

Um die unterschiedlichen Auswirkungen des Flugverkehrs abhängig vom Jahresgang zu veranschaulichen, werden in diesem Abschnitt die Ergebnisse für die einzelnen Monate vorgestellt. Der Monat Februar wird ausführlich diskutiert. Für die Monate März bis Dezember werden die Ergebnisse zusammengefasst dargestellt.

##### 4.3.1.1 Statistiken Februar 2004

In Tabelle 4.2 sind für den Monat Februar die mittleren Bedeckungsgrade der Zirren der Bildelemente mit Flugverkehr, ohne Flugverkehr und der Mittelwert der Zirrusbedeckung über alle Bildelemente dargestellt.

Tabelle 4.2: Statistiken der Zirrusbedeckung für Februar 2004

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	42.29%	43.94%	0.27%
Bildelemente ohne Flugverkehr	37.29%	42.92%	0.26%
Bildelemente gesamt	38.36%	43.17%	0.26%

Nimmt man an, der mittlere Bedeckungsgrad der Bildelemente (BE) ohne Flugverkehr wäre der natürliche Bedeckungsgrad (100%) wenn kein Flugverkehr stattfinden würde, dann bewirkt der Flugverkehr relativ dazu in dem ausgewählten Gebiet eine Erhöhung um **2.86%**. Die beiden Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

Für die Bestimmung des Zusammenhangs zwischen Zirrusbedeckung und Flugverkehrsdichte wird der Flugverkehr in sechs Klassen aus Tabelle 4.1 unterteilt und die Zirrusbedeckung in Abhängigkeit der Flugverkehrsdichteklassen in Abb. 4.6 aufgetragen.

Die Zirrusbedeckung zeigt einen exponentiell sättigenden Zusammenhang in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte. Der Spearman'sche Rang-Korrelationskoeffizient der in Abb. 4.6 dargestellten Mittelwerte ergibt 0.8286. Der Korrelationskoeffizient ist **signifikant** verschieden von Null auf einem 5% Niveau. Verwendet man statt der sechs Mittelwerte alle (ausgewählten) Bildelemente, ergibt sich für den Korrelationskoeffizienten 0.037. Dieser Wert ist ebenfalls **signifikant** verschieden von Null auf einem 5% Niveau. <sup>10</sup>

<sup>10</sup>Der Wert wäre auch signifikant verschieden von Null auf einem 1% Niveau. Zur besseren Übersicht werden alle Signifikanztests auf einem 5% Niveau durchgeführt.

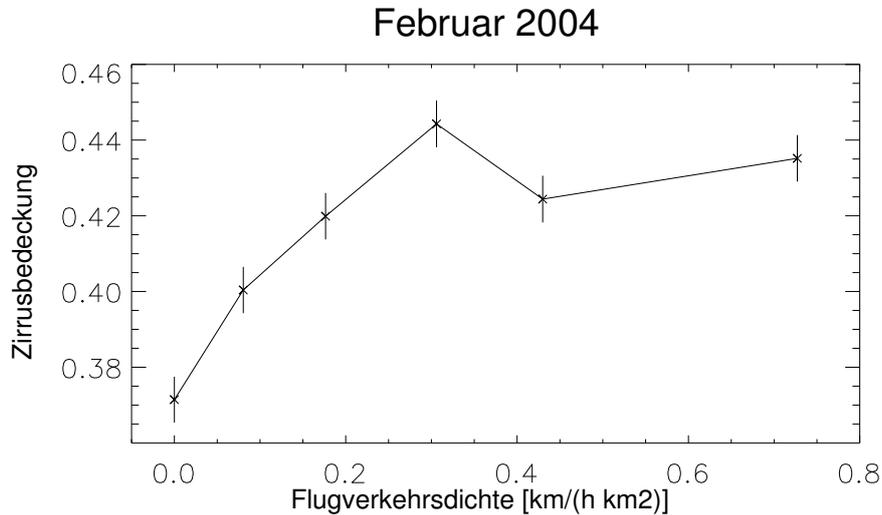


Abbildung 4.6: Mittlerer Bedeckungsgrad in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für Februar 2004. Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) wurden aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet.

### Untersuchung über Land

Betrachtet man nur die Bildelemente über Land, ergibt sich der in Abb. 4.7 dargestellte Zusammenhang zwischen Flugverkehrsdichte und mittlerer Zirrusbedeckung. In Tabelle 4.3 sind die Mittelwerte der Bildelemente mit Flugverkehr über Land, ohne Flugverkehr und der Mittelwert der Zirrusbedeckung über alle Bildelemente dargestellt.

Tabelle 4.3: Statistiken der Zirrusbedeckung für Februar 2004 (nur Land)

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	44.83%	44.24%	0.27%
Bildelemente ohne Flugverkehr	37.99%	43.08%	0.26%
Bildelemente gesamt	39.76%	43.49%	0.27%

Über Land bewirkt der Flugverkehr in dem ausgewählten Gebiet relativ zu den flugverkehrsfreien Gebieten eine Erhöhung um 4.66%. Dies ist ein **signifikanter** Unterschied.

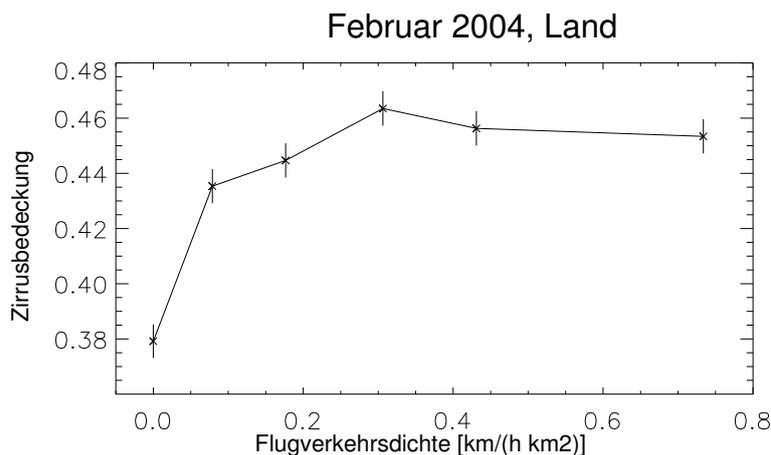


Abbildung 4.7: Mittlere Zirrusbedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für Februar 2004 für die Bildelemente über Land aus dem Gebiet ( $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 30^{\circ}N - 60^{\circ}N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) wurden aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet.

Eine Trennung der Flugverkehrsdichten in verschiedene Klassen, wie in Tabelle 4.1 dargestellt, ergibt den in Abb. 4.7 gezeigten Zusammenhang zwischen der Zunahme der Zirrusbedeckung und der Zunahme der Flugverkehrsdichte. Die Mittelwerte werden aus einer Teilmenge von zufällig ausgewählten 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet. Zuvor werden für jeden Zeitpunkt 40 Bildelemente zufällig ausgewählt. Dabei ist zu beachten, dass nicht alle Zeitpunkte vertreten sind, da es in der

Nacht für dieses Gebiet Zeitpunkte ohne Flugverkehr in den oberen Flugverkehrsdichteklassen gibt. Diese Zeitpunkte sind aus der Statistik für die jeweilige Klasse ausgeschlossen. Die Untersuchung zeigt einen klaren Zusammenhang zwischen Flugverkehrsdichte und Zirrusbedeckung über Land.

#### Untersuchung über Wasser

Als nächstes werden die Bildelemente über Wasser betrachtet. Die Flugverkehrsdichte über Wasser ist in dem ausgewählten Gebiet sehr viel geringer als über Land. Die Flugwege sind auf wenige Flugverkehrsstraßen beschränkt. Diese sind zum Teil sehr dicht beflogen, jedoch räumlich kaum ausgedehnt. In Tabelle 4.4 sind die Mittelwerte der Bildelemente ohne Flugverkehr, mit Flugverkehr und der Mittelwerte über alle (ausgewählten) Bildelemente dargestellt. Sie zeigen **keinen signifikanten** Unterschied. Über Wasser lässt sich innerhalb der ausgewählten Region keine Korrelation für den Monat Februar nachweisen.

Tabelle 4.4: Statistiken der Zirrusbedeckung für Februar 2004 (nur Wasser)

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	36.29%	42.66%	0.26%
Bildelemente ohne Flugverkehr	36.36%	42.65%	0.26%
Bildelemente gesamt	36.36%	42.69%	0.26%

Auch die Einteilung in Flugverkehrsdichteklassen liefert keinen klaren Zusammenhang zwischen Flugverkehrsdichte und Zirrusbedeckung. In Abb. 4.8 ist die mittlere Zirrusbedeckung in Abhängigkeit von den Flugverkehrsdichten der einzelnen Klassen aufgetragen. Auch hier ist **kein signifikanter** Zusammenhang zwischen Flugverkehr und Zirrusbedeckung erkennbar.

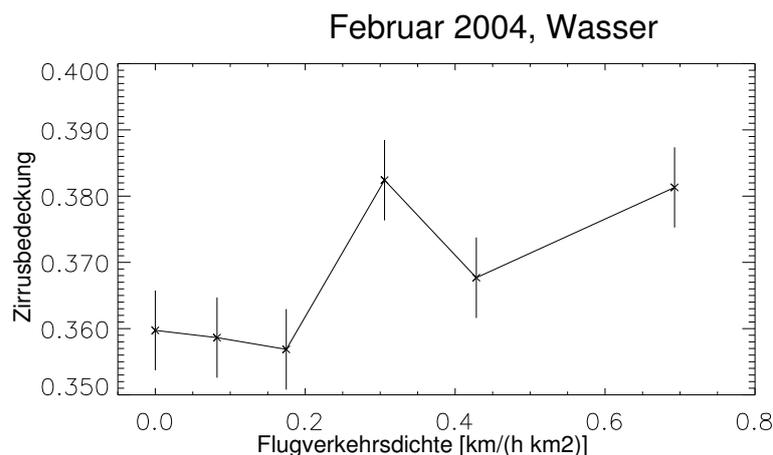


Abbildung 4.8: Mittlere Zirrusbedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für Februar 2004 für die Bildelemente über Wasser aus dem Gebiet ( $15^{\circ}W - 20^{\circ}O$ ,  $30^{\circ}N - 60^{\circ}N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) wurden aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet.

Da die Flugverkehrswege über Wasser räumlich sehr viel weniger ausgedehnt sind als über Land, ist die Anzahl der Bildelemente, in denen Flugverkehr über Wasser stattfindet sehr gering. Die durch den Flugverkehr induzierten Zirren können zu Bildelementen mit Flugverkehrsdichte Null verdriften. Über Land sind die Flugverkehrsstraßen breiter, so dass die in die Nachbarbildelemente verlagerte Bewölkung zur Korrelation zusätzlich beitragen kann. Über Wasser ist die Wahrscheinlichkeit dafür geringer.

#### 4.3.1.2 Auswertung der Monate März bis Dezember 2004

Wie für den Monat Februar wurden die Monate März bis Dezember untersucht. Die berechneten Mittelwerte wurden zur besseren Lesbarkeit ausführlich im Anhang B.1 aufgelistet. In diesem Abschnitt werden nur die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst, sowie die Zusammenhänge zwischen Zirrusbedeckung und Flugverkehrsdichteklassen graphisch dargestellt. Abb. 4.9 zeigt die Ergebnisse für

die gesamte Teilregion  $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 30^{\circ}N - 60^{\circ}N$ . In Abb. 4.10 sind die Untersuchungen auf die Bildelemente über Land beschränkt und in Abb. 4.11 sieht man die Ergebnisse der Untersuchung über Wasser.

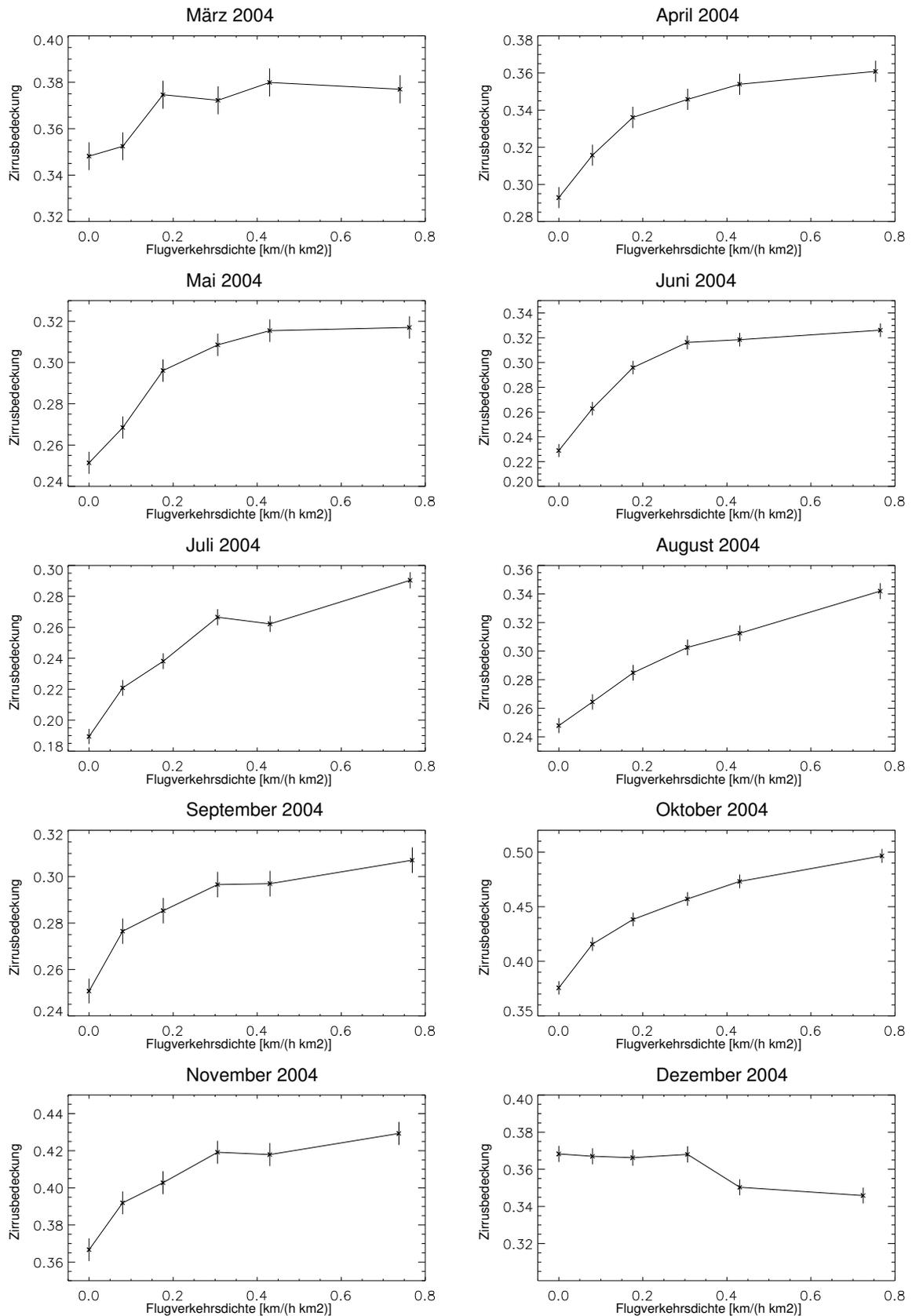


Abbildung 4.9: Mittlere Zirkusbedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für März bis Dezember 2004 für die Bildelemente aus dem Gebiet ( $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 30^{\circ}N - 60^{\circ}N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) wurden aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet.

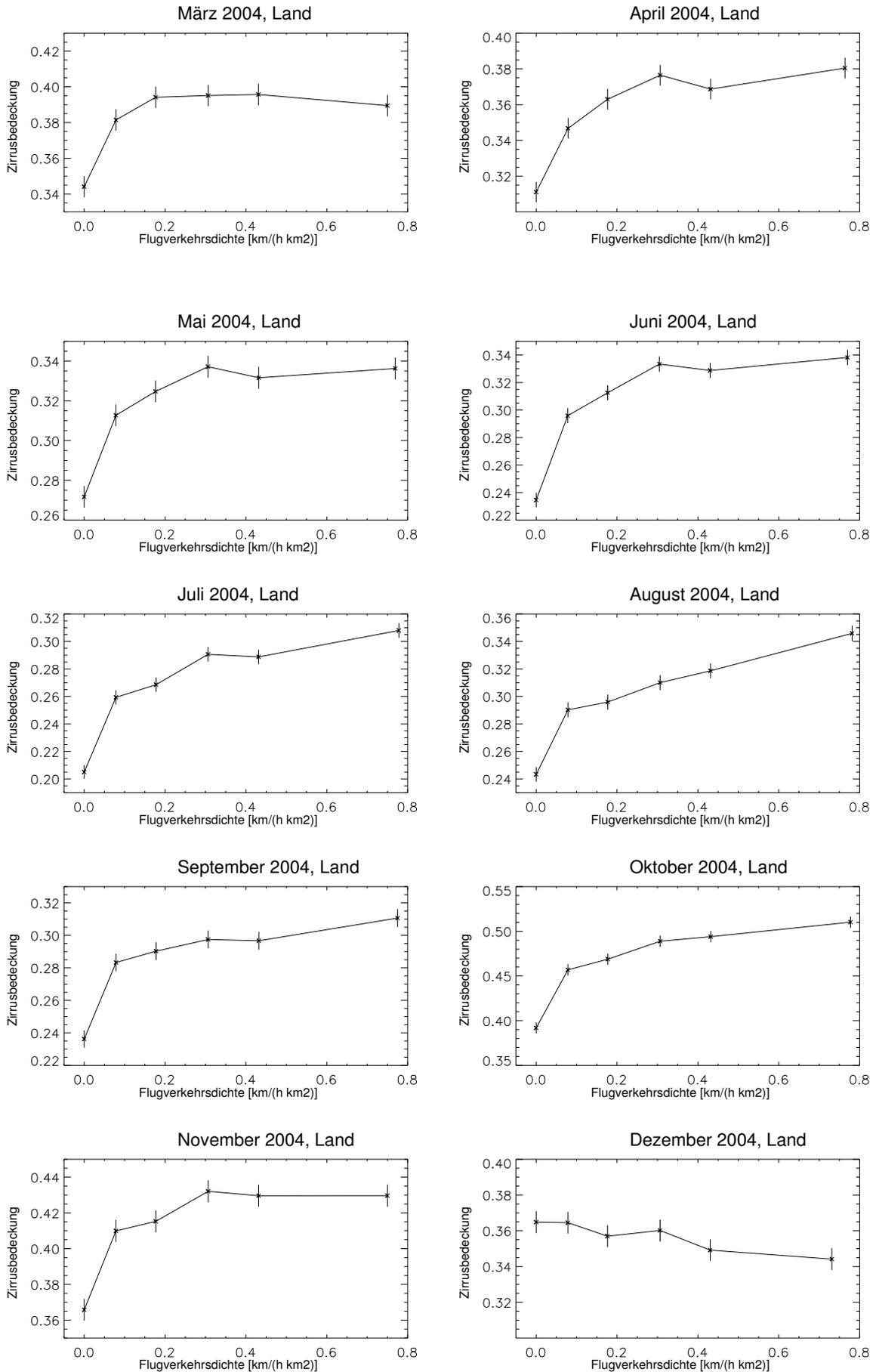


Abbildung 4.10: Mittlere Zirrusbedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für März bis Dezember 2004 für die Bildelemente über Land aus dem Gebiet (15°W – 20°O, 30°N – 60°N). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) wurden aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet.

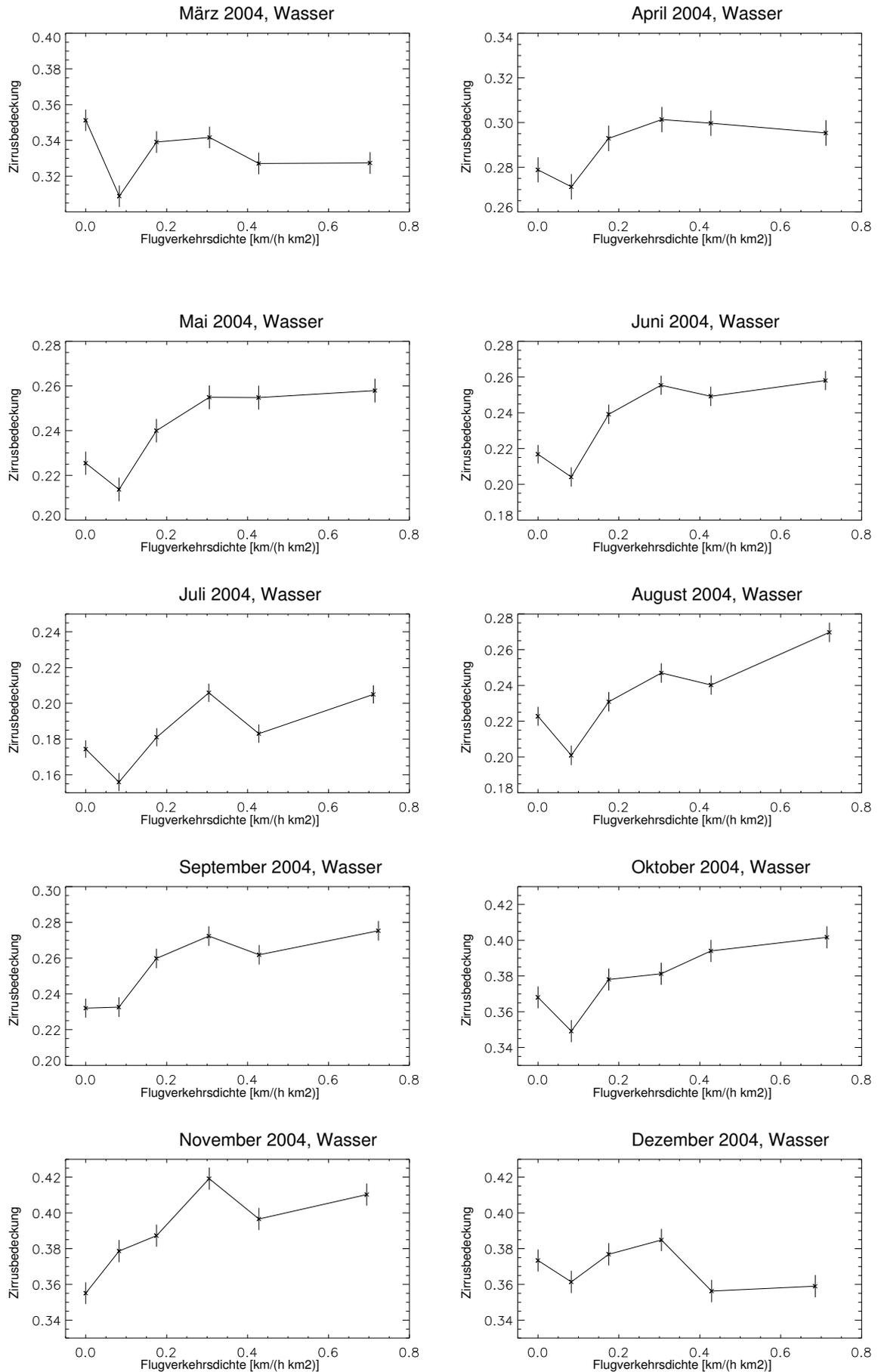


Abbildung 4.11: Mittlere Zirrusbewölkung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für März bis Dezember 2004 für die Bildelemente über Wasser aus dem Gebiet ( $15^{\circ}\text{W} - 20^{\circ}\text{O}$ ,  $30^{\circ}\text{N} - 60^{\circ}\text{N}$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) wurden aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet.

#### 4.3.1.3 Zusammenfassung der Untersuchung des Jahresgangs

In diesem Abschnitt wurde der Zusammenhang zwischen Flugverkehrsdichte und Zirkusbedeckung für das Teilgebiet  $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 30^{\circ}N - 60^{\circ}N$  für die Monate Februar bis Dezember untersucht. In Tabelle 4.5 sind die Ergebnisse zusammengefasst.

Tabelle 4.5: Zusammenfassung der Untersuchung des Jahresgangs (Land und Wasser)

Monat	Bildelemente ohne Flugverkehr	Bildelemente gesamt	relativer Unterschied der Mittelwerte	signifikanter Unterschied
Februar	37.29%	38.36%	2.86%	ja
März	34.85%	35.24%	1.12%	ja
April	28.82%	30.45%	5.66%	ja
Mai	24.90%	26.28%	5.52%	ja
Juni	22.80%	24.66%	8.17%	ja
Juli	18.77%	20.40%	8.67%	ja
August	22.98%	24.22%	5.38%	ja
September	23.48%	24.65%	5.00%	ja
Oktober	38.08%	39.67%	4.19%	ja
November	36.57%	37.47%	2.46%	ja
Dezember	36.60%	36.66%	0.17%	nein
Mittelwert	29.56%	30.73%	4.47%	ja

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen den unterschiedlichen Einfluss des Flugverkehrs für unterschiedliche natürliche Zirkusbedeckungen. Die natürliche Zirkusbedeckung variiert für verschiedene Monate. Die Zirkusbedeckung in den Wintermonaten ist höher als in den Sommermonaten. Da flugverkehrsinduzierte zusätzliche Bedeckung, wie in Abschnitt 4.1 angesprochen, von der natürlichen Bedeckung abhängt, sind die Unterschiede der Mittelwerte zwischen der Zirkusbedeckung ohne Flugverkehr und der gesamten Zirkusbedeckung wesentlich kleiner in den Wintermonaten als in den Sommermonaten. In den Monaten mit einer sehr hohen natürlichen Zirkusbedeckung kann der Flugverkehr weniger zu einer Erhöhung des Bedeckungsgrades beitragen. Zusätzlich ist die mittlere Flugverkehrsdichte in den Sommermonaten höher als in den Wintermonaten. Dies führt ebenfalls zu einem höheren Bedeckungsgrad.

Betrachtet man die mittleren Zirkusbedeckungen abhängig von den Flugverkehrsdichteklassen (Abb. 4.9) zeigt sich für die meisten Monate der theoretisch erwartete Zusammenhang. Die Zirkusbedeckung steigt mit zunehmender Flugverkehrsdichte exponentiell bis zu einer Sättigung an. Eine Ausnahme ist der Monat Dezember. Für diesen Monat lässt sich der erwartete Zusammenhang nicht zeigen. Die Zirkusbedeckung sinkt überraschenderweise mit zunehmender Flugverkehrsdichte. Eine signifikante Abnahme der Zirkusbedeckung zeigt sich jedoch nicht. Dennoch ist dies ein Beispiel, dass die synoptischen Bedingungen für einen bestimmten Monat die Zunahme der Bewölkung durch den Flugverkehr verhindern. Zudem ist die Beurteilung für diesen Monat schwierig, da auch die Zirkuserkennung, wie sich im Vergleich mit MODIS-Daten gezeigt hat, im Dezember die höchste Falscherkennung aufweist. Die anderen Monate, insbesondere die Monate April bis Oktober zeigen deutlich den erwarteten Anstieg der Zirkusbedeckung mit der Zunahme der Flugverkehrsdichte.

Zusätzlich wurden innerhalb dieses Gebietes die Regionen über Land und Wasser getrennt betrachtet. Über Land zeigt sich ein deutlicherer Zusammenhang als über Wasser (siehe Abb. 4.10 und 4.11). Über Land zeigen die Kurven bedingt durch die höhere natürliche Zirkusbedeckung eine schnellere Sättigung. Der Wert der natürlichen Zirkusbedeckung ist über Land unterschätzt. Er wurde aus der gesamte Region (über Land) bestimmt. Die Gebiete in denen Flugverkehr stattfindet sind jedoch größtenteils beschränkt auf Flugverkehrsstraßen. Der Wert der natürlichen Zirkusbedeckung für diese Flugverkehrsstraßen ließe sich aus der Extrapolation der Kurven abschätzen. Man sieht aus den Darstellungen, dass dieser für die meisten Monate höher wäre. Umgekehrt sieht man, dass der Wert der natürlichen Zirkusbedeckung über Wasser überschätzt ist. Lässt man diesen Wert weg, erkennt man auch über Wasser z.B. für den Monat Mai oder Oktober einen Anstieg der mittleren Zirkusbedeckung mit der Zunahme der Flugverkehrsdichte.

### 4.3.2 Untersuchung des Tagesgangs

Wie in Abb. 4.4 veranschaulicht, variiert die Flugverkehrsdichte mit der Tageszeit. Um den Einfluss des Flugverkehrs zu unterschiedlichen Zeitpunkten zu untersuchen, wurden vier Zeitpunkte ausgewählt. Das ausgewählte Teilgebiet  $15^{\circ}W - 30^{\circ}N, 20^{\circ}O - 60^{\circ}N$  wurde für den gesamten Zeitraum des Jahres 2004 untersucht (335 Tage)<sup>11</sup>. Die jeweiligen Zeitpunkte wurden für den Zeitraum 1. Februar bis 31. Dezember mit einer ähnlichen Methode wie in Abschnitt 4.2.2 untersucht. Der Flugverkehr wurde in sechs verschiedene Klassen (siehe Tab. 4.1) unterteilt. Aus jeder Klasse werden 40 Bildelemente zufällig ausgewählt. Durch die Beschränkung auf einen Zeitpunkt pro Tag wurde die zeitliche Autokorrelation der Zirren und der Tagesgang des Flugverkehrs für den jeweiligen Zeitpunkt eliminiert. Die Gesamtanzahl der ausgewählten Datenpunkte beträgt  $335 \times 40 = 13400$ . Da die Flugverkehrsdichte zur gleichen Zeit stark autokorrelliert ist, war es notwendig, die Anzahl der Datenpunkte zu reduzieren, um die Autokorrelation der Flugverkehrsdichte zu eliminieren. Es werden 2000 Datenpunkte aus jeder Flugverkehrsdichteklasse ausgewählt. Dies entspricht ca. 1/6 der Daten und vergrößert den mittleren Abstand der Bildelemente innerhalb der Flugverkehrsklassen auf 200 km. Es wurden für jeden der Zeitpunkte das gesamte Gebiet untersucht, sowie eine Trennung nach Land und Wasser durchgeführt und untersucht.

#### 4.3.2.1 Auswertung Untersuchung des Tagesgangs

In Abb. 4.12 sind die Zusammenhänge zwischen Flugverkehrsdichteklassen und Zirrusbedeckung für das Untersuchungsgebiet für die einzelnen Zeitpunkte dargestellt. Abb. 4.13 zeigt die Ergebnisse über Land. In Abb. 4.14 sind die Ergebnisse über Wasser dargestellt. Anschließend werden die mittleren Bedeckungsgrade zusammenfassend dargestellt. Die ausführliche Auflistung aller Ergebnisse für die einzelnen Zeitpunkte ist zur besseren Lesbarkeit in Anhang B.2 dargestellt.

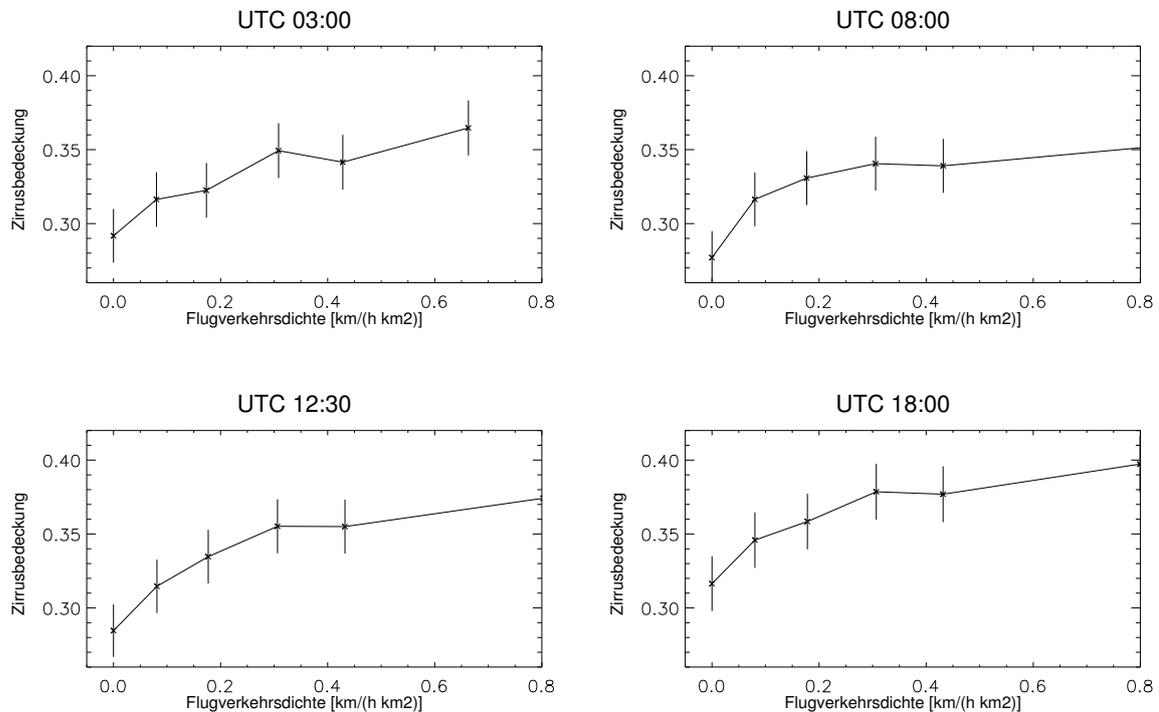


Abbildung 4.12: Zirrusbedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für UTC 03:00, 08:00, 12:30 und 18:00 für das Jahr 2004 für die Bildelemente aus dem Gebiet ( $15^{\circ}W - 30^{\circ}N, 20^{\circ}O - 60^{\circ}N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) wurden aus 2000 Bildelementen pro Klasse berechnet.

<sup>11</sup>Für Januar 2004 sind keine MSG Daten verfügbar.

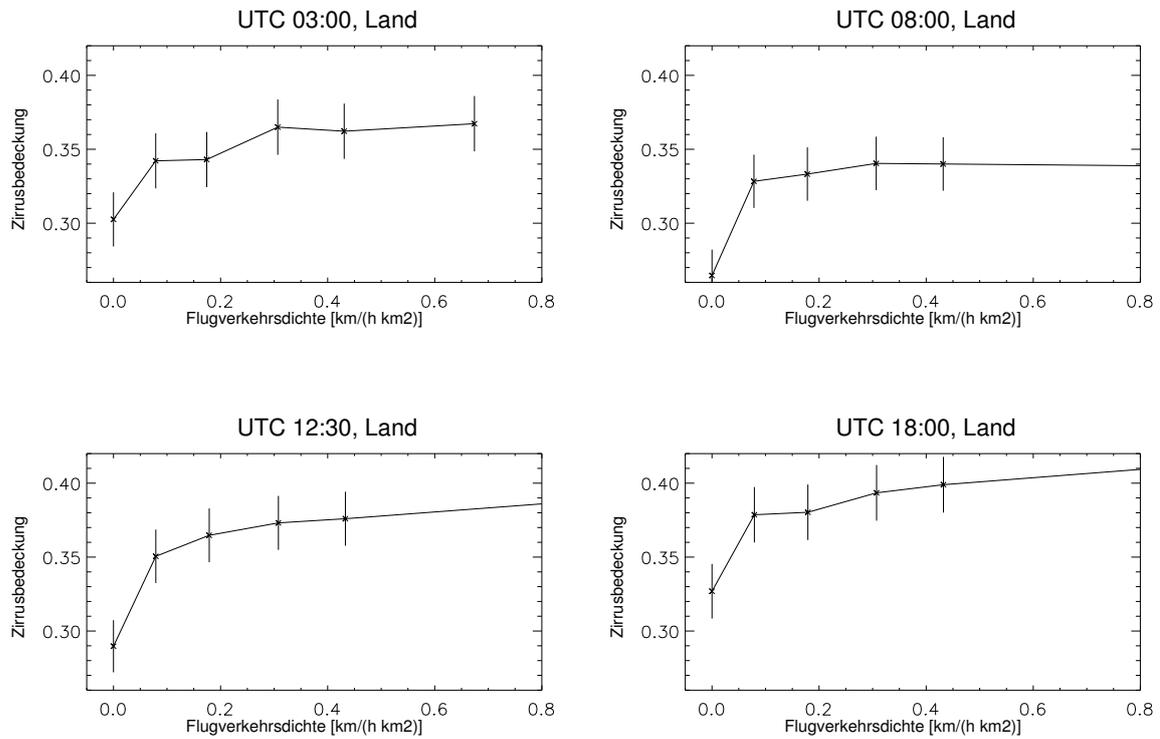


Abbildung 4.13: Zirusbedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für UTC 03:00, 08:00, 12:30 und 18:00 für das Jahr 2004 für die Bildelemente über Land aus dem Gebiet ( $15^{\circ}W - 30^{\circ}N, 20^{\circ}O - 60^{\circ}N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) wurden aus 2000 Bildelementen pro Klasse berechnet.

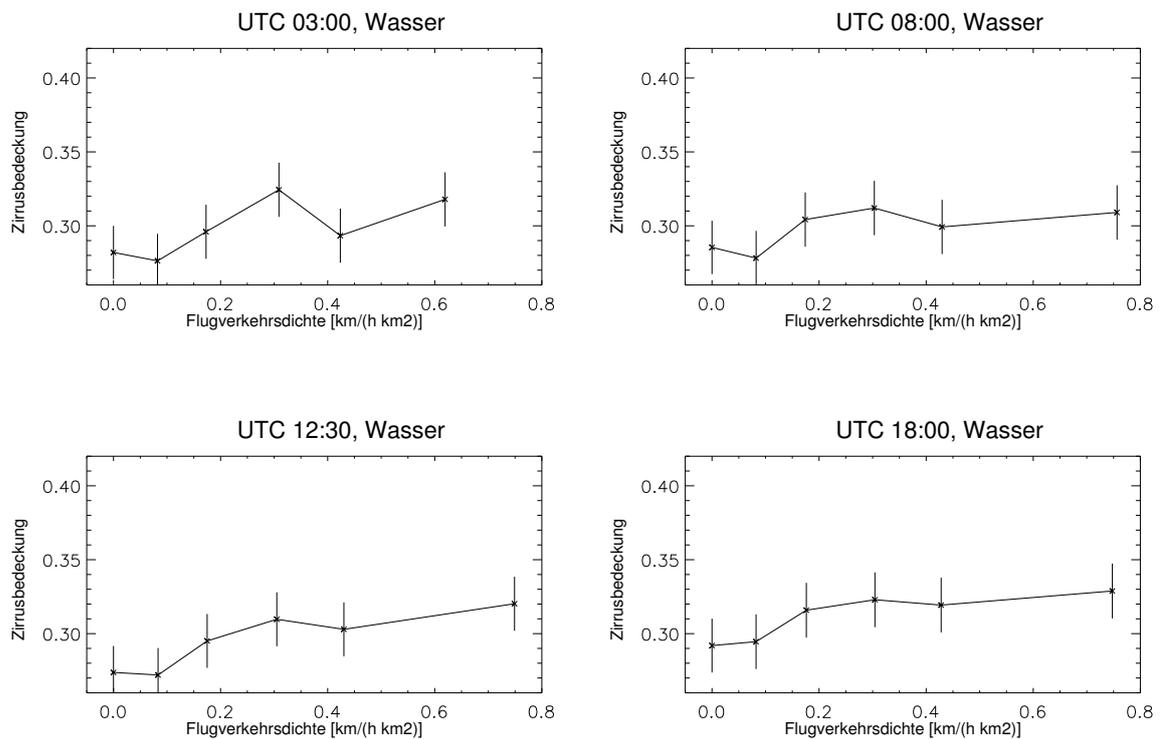


Abbildung 4.14: Zirusbedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für UTC 03:00, 08:00, 12:30 und 18:00 für das Jahr 2004 für die Bildelemente über Wasser aus dem Gebiet ( $15^{\circ}W - 30^{\circ}N, 20^{\circ}O - 60^{\circ}N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) wurden aus 2000 Bildelementen pro Klasse berechnet.

#### 4.3.2.2 Zusammenfassung Untersuchung des Tagesgangs

In diesem Abschnitt ist die zusätzlichen Zirusbedeckung abhängig vom Tagesgang vorgestellt. In Tabelle 4.6 sind die Ergebnisse zusammengefasst dargestellt. In Anhang B.2 sind alle Ergebnisse aus der Untersuchung des Tagesgangs ausführlich aufgelistet.

Tabelle 4.6: Zusammenfassung der Untersuchung des Tagesgangs (Land und Wasser)

Zeit	Bildelemente ohne Flugverkehr	Bildelemente gesamt	relativer Unterschied der Mittelwerte	signifikanter Unterschied
03:00 UTC	29.17%	29.75%	2.01%	nein
08:00 UTC	27.70%	29.48%	6.44%	ja
12:30 UTC	28.46%	30.87%	8.49%	ja
18:00 UTC	31.64%	32.98%	4.23%	ja
Mittelwert	29.24%	30.77%	5.29%	ja

Für die Zeitpunkte mit geringer Flugverkehrsdichte zeigt sich für die gesamte Region  $15^{\circ}W, 30^{\circ}N, 20^{\circ}O, 60^{\circ}N$  eine geringere zusätzliche Zirusbedeckung. Die zusätzliche Bedeckung für 03:00 UTC ist nicht signifikant, dennoch sieht man auch für diesen Zeitpunkt in Abb. 4.12 eine Erhöhung der mittleren Bedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte. Für die übrigen Zeitpunkte 08:00, 12:30 und 18:00 ist dieser Zusammenhang deutlicher.

### 4.3.3 Untersuchung des gesamten Jahres 2004 für das Teilgebiet

Um den Einfluss des Flugverkehrs im Jahresmittel zu bestimmen, wurde das ausgewählte Teilgebiet  $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 30^{\circ}N - 60^{\circ}N$  für den gesamten Zeitraum des Jahres 2004 untersucht (335 Tage)<sup>12</sup>. Um alle Zeitpunkte zu berücksichtigen und gleichzeitig die zeitliche Autokorrelation zu minimieren, werden aus jedem Tag vier Zeitpunkte zufällig ausgewählt. Dann wurde die Flugverkehrsdichte wieder in sechs verschiedene Klassen (siehe Tab. 4.1) unterteilt. Aus jeder Klasse werden 40 Bildelemente zufällig mit Zurücklegen ausgewählt. Aus den Klassen werden 20000 Bildelemente für die Bestimmung der Mittelwerte und der Vertrauensintervalle der Zirrusbedeckungen der jeweiligen Klasse zufällig ausgewählt. Es wurde das gesamte Gebiet untersucht sowie eine Trennung nach Land und Wasser durchgeführt und untersucht.

#### 4.3.3.1 Auswertung

##### Ergebnisse für das gesamte Teilgebiet

Table 4.7: Statistiken der Zirrusbedeckung für 2004 für Teilgebiet  $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 30^{\circ}N - 60^{\circ}N$

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	33.82%	42.10%	0.37%
Bildelemente ohne Flugverkehr	29.31%	40.47%	0.36%
Bildelemente gesamt	30.42%	40.91%	0.36%

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **3.79%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**. Die zusätzliche Bedeckung durch flugverkehrsinduzierte Zirren beträgt  **$1.1 \pm 0.5\%$** .

Die mittlere Zirrusbedeckung in Abhängigkeit von Flugverkehrsklassen ist in Abb. 4.15 aufgetragen. Der Zusammenhang zwischen Flugverkehrsdichte und Zirrusbedeckung ist deutlich erkennbar.

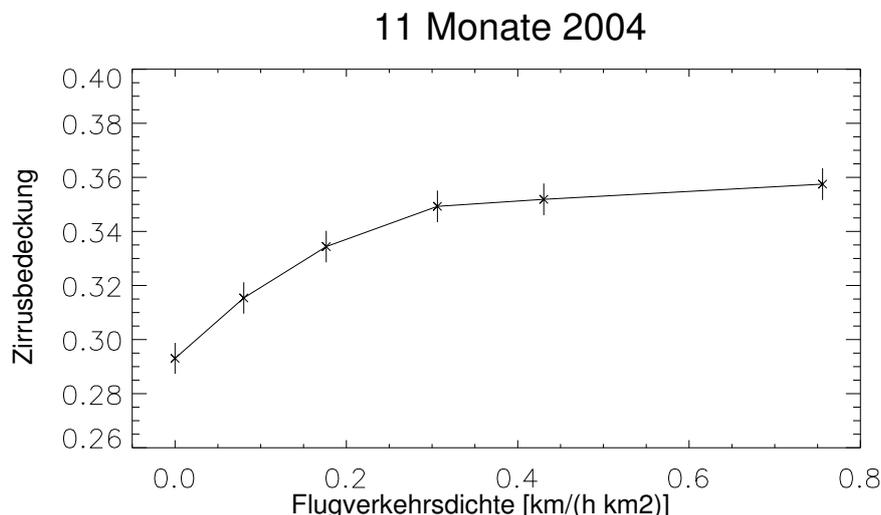


Abbildung 4.15: Zirrusbedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für 2004 für das Gebiet ( $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 30^{\circ}N - 60^{\circ}N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) wurden aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet.

Der Spearman'sche Rang-Korrelationskoeffizient beträgt für die sechs Klassen: 1.0. Der Korrelationskoeffizient für alle (ausgewählten) Bildelemente ist 0.0393. Beide Werte sind **signifikant** verschieden von Null.

<sup>12</sup>Für Januar 2004 sind keine MSG Daten verfügbar.

### Untersuchung über Land

Tabelle 4.8: Statistiken der Zirkusbedeckung für 2004 für Teilgebiet  $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 30^{\circ}N - 60^{\circ}N$  (nur Land)

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	35.96%	42.51%	0.37%
Bildelemente ohne Flugverkehr	30.17%	40.40%	0.36%
Bildelemente gesamt	31.98%	41.27%	0.36%

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **5.99%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

11 Monate 2004, Land

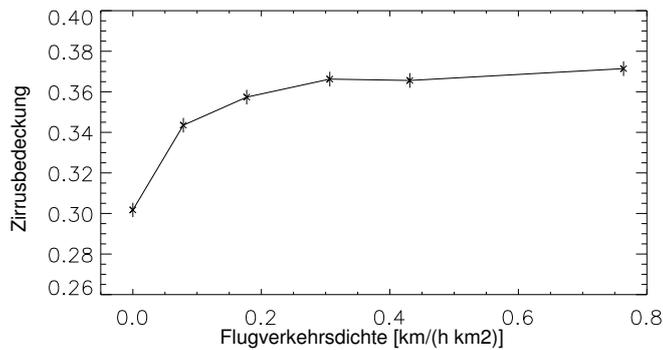


Abbildung 4.16: Zirkusbedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für 2004 für die Bildelemente über Land aus dem Gebiet ( $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 30^{\circ}N - 60^{\circ}N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) wurden aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet.

Die mittlere Zirkusbedeckung in Abhängigkeit von Flugverkehrsklassen ist in Abb. 4.16 aufgetragen. Der Zusammenhang zwischen Flugverkehrsdichte und Zirkusbedeckung ist deutlich erkennbar.

### Untersuchung über Wasser

Tabelle 4.9: Statistiken der Zirkusbedeckung für 2004 Teilgebiet  $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 30^{\circ}N - 60^{\circ}N$  (nur Wasser)

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	29.19%	40.63%	0.36%
Bildelemente ohne Flugverkehr	28.31%	39.40%	0.35%
Bildelemente gesamt	28.74%	40.54%	0.36%

Die Mittelwerte unterscheiden sich **nicht signifikant**.

11 Monate 2004, Wasser

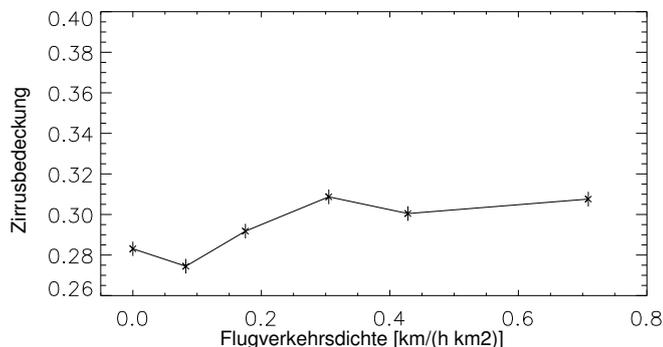


Abbildung 4.17: Zirkusbedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für 2004 für die Bildelemente über Wasser aus dem Gebiet ( $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 30^{\circ}N - 60^{\circ}N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) wurden aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet.

In Abb. 4.17 ist den Zusammenhang zwischen Flugverkehrsdichteklassen und Zirkusbedeckung dargestellt. Man sieht eine leichte Erhöhung der Zirkusbedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte.

#### 4.3.3.2 Zusammenfassung der Untersuchung des Teilgebiets

Der Zusammenhang zwischen der Zirrusbedeckung und den Flugverkehrsdichteklassen ist in Abb. 4.15 dargestellt. Man sieht eine deutliche Korrelation zwischen der Zirrusbedeckung und den Flugverkehrsdichteklassen. Die Abschätzung des zusätzlichen Bedeckungsgrades für das Teilgebietes  $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 30^{\circ}N - 60^{\circ}N$  für 11 Monate des Jahres 2004 ergibt eine Erhöhung der Zirrusbedeckung um  $1.1 \pm 0.5\%$ . Da nur vier Zeitpunkte pro Tag zufällig ausgewählt wurden, ist die zeitliche Autokorrelation auf ein Minimum reduziert.

Da eine räumliche Scheinkorrelation die Ergebnisse verfälschen kann, wurden für weitere Teilregionen dieses Gebiets Sensitivitätsstudien durchgeführt. Die Bildelemente ohne Flugverkehr sind nicht gleichverteilt über der untersuchten Region. Da die Flugverkehrsdichte über Europa sehr hoch ist, stammt ein größerer Teil der flugverkehrsfreien Daten aus Nordafrika. Dies wird zusätzlich verstärkt, wenn nur Bildelemente über Land untersucht werden. Nimmt man dieses Gebiet aus der Untersuchung heraus, indem man die südliche Grenze der Region um  $5^{\circ}$  nach Norden verschiebt, verändern sich die Statistiken. Zum einen wird die natürliche Zirrusbedeckung größer. Die Differenz der Bedeckungsgrade damit geringer. Desweiteren kann der Flugverkehr über Nordafrika sehr viel mehr zur Erhöhung der Zirrusbedeckung aufgrund der geringen natürlichen Zirrusbedeckung über Nordafrika beitragen. Es zeigt sich auch für die Region ( $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 35^{\circ}N - 60^{\circ}N$ ) eine signifikante Erhöhung des Bedeckungsgrades. Der Wert ist jedoch geringer und beträgt  $0.7\%$ .

Innerhalb der Teilregion wurden weitere sehr viel kleinere Gebiete untersucht, die häufig zu klein waren, um signifikante Aussagen ableiten zu können. Sie dienten für Sensitivitätsstudien. Für Gebiete mit einer hohen natürlichen Zirrusdichte, z.B. im zwischen  $50^{\circ}N - 60^{\circ}$  war eine Erhöhung der Zirrusbedeckung nicht erkennbar. Für die anderen Teilregionen zeigte sich eine Zunahme des Bedeckungsgrades abhängig von der Flugverkehrsdichte. Für zu kleine Gebiete mit einer hohen Flugverkehrsdichte war es schwierig Bildelemente auszuwählen, in denen keine flugverkehrsinduzierten Zirren existieren, da die Zirruswolken länger als 15 Minuten weiterleben können und auch in Bildelemente mit der Flugverkehrsdichte Null verdriften können. Die Folge ist eine Überschätzung des Mittelwerts der Zirrusbedeckung für flugverkehrsfreie Gebiete. Die Differenz mit dem Mittelwert über die Gesamtregion verringert sich dadurch. Die zusätzliche Bedeckung wird unterschätzt.

Um den Einfluss der Breitenabhängigkeit der Zirrusbedeckung abzuschätzen, wurde der Datensatz der Zirrusbedeckungen gespiegelt und damit der Zusammenhang mit der Flugverkehrsdichte untersucht. Es zeigte sich auch für den gespiegelten Datensatz eine Zunahme der Zirrusbedeckungen mit der Flugverkehrsdichte, jedoch war die Steigung sehr viel niedriger. Dennoch zeigte diese Untersuchung, dass auch Flugverkehrsklassen eine Breitenabhängigkeit aufweisen. Die Abschätzung des zusätzlichen Bedeckungsgrads betrug  $0.4\%$ . Dies ist kein signifikanter Unterschied der Mittelwerte und zeigt, dass die räumliche Scheinkorrelation durch eine breitenabhängige Zirrusbedeckung und Flugverkehrsdichte innerhalb der Fehlerschranken liegt.

Um die räumliche Scheinkorrelation durch eine natürliche höhere Zirrusbedeckung über Land bei gleichzeitig höherer Flugverkehrsdichte über Land auszuschließen, wurden zusätzlich die Untersuchungen für Land und Wasser getrennt durchgeführt. Über Land zeigte sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen Flugverkehrsdichteklassen und Zirrusbedeckung (Abb. 4.16). Über Wasser (Abb. 4.17) sieht man einen leichten Anstieg der Zirrusbedeckung mit der Flugverkehrsdichte. Der Trend ist jedoch nicht so eindeutig wie über Land. Die Flugverkehrsdichte über Land ist wesentlich höher als über Wasser, so dass dieser über Land mehr zur zusätzlichen Bedeckung beitragen kann als über Wasser.

Hinzu kommt, dass der Wert der natürlichen Zirrusbedeckung aus anderen Regionen abgeschätzt wird als die Zirrusbedeckungen der Flugverkehrsdichteklassen. Diese wurden für die Regionen entlang der Flugverkehrsstraßen berechnet. Der Wert der natürlichen Zirrusbedeckung für Regionen mit Flugverkehrsstraßen ist über Land höher als in den Abbildungen dargestellt, da dieser Wert für die gesamte Region über Land gilt. Über Wasser ist dieser Wert unterschätzt. Die natürliche Zirrusbedeckung ließe sich für die Regionen mit Flugverkehrsstraßen aus der Extrapolation der Kurven abschätzen. Aus der

Differenz des Wertes mit der Zirkusbedeckung für Gebiete mit Flugverkehr ließe sich die zusätzliche Bedeckung für die Regionen mit Flugverkehrsstraßen abschätzen. Der Wert wurde in den Tabellen der Statistiken zusätzlich angegeben. Diese Methode ist jedoch sehr fehleranfällig, so dass die Werte nur zu Plausibilitätsüberprüfungen herangezogen wurden.

Insgesamt zeigen die Untersuchungen, dass trotz der beschriebenen Fehler der Methoden die Untersuchung gute Resultate liefert und dass Flugverkehrsdichte und Zirkusbedeckung eine signifikante Korrelation innerhalb der Region  $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 30^{\circ}N - 60^{\circ}N$  für 11 Monate des Jahres 2004 aufweisen.

#### 4.3.4 Untersuchung des Gesamtgebiets

Für die Abschätzung des globalen flugverkehrsinduzierten Bedeckungsgrades war eine Untersuchung einer möglichst großen Region notwendig. In diesem Schritt wurde für das Gebiet  $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$  der gesamte Zeitraum des Jahres 2004 untersucht (335 Tage). Das Gebiet umfasst die gesamte Region, für die im Rahmen dieser Arbeit Flugverkehrsdaten zur Verfügung standen (siehe Abb. 4.18).

Um die bestmögliche Fehlerabschätzung zu gewährleisten, werden aus jedem Tag vier Zeitpunkte zufällig ausgewählt. Die Flugverkehrsdichte wird in sechs Klassen (siehe Tab. 4.1) unterteilt. Da das untersuchte Gebiet ca. fünf mal mehr Bildelemente hat als die in den vorhergehenden Abschnitten beschriebene Region, werden aus jeder Klasse 200 Bildelemente pro Zeitpunkt zufällig mit Zurücklegen ausgewählt. Es wurde wieder das gesamte Gebiet untersucht sowie eine Trennung nach Land und Wasser durchgeführt und untersucht.

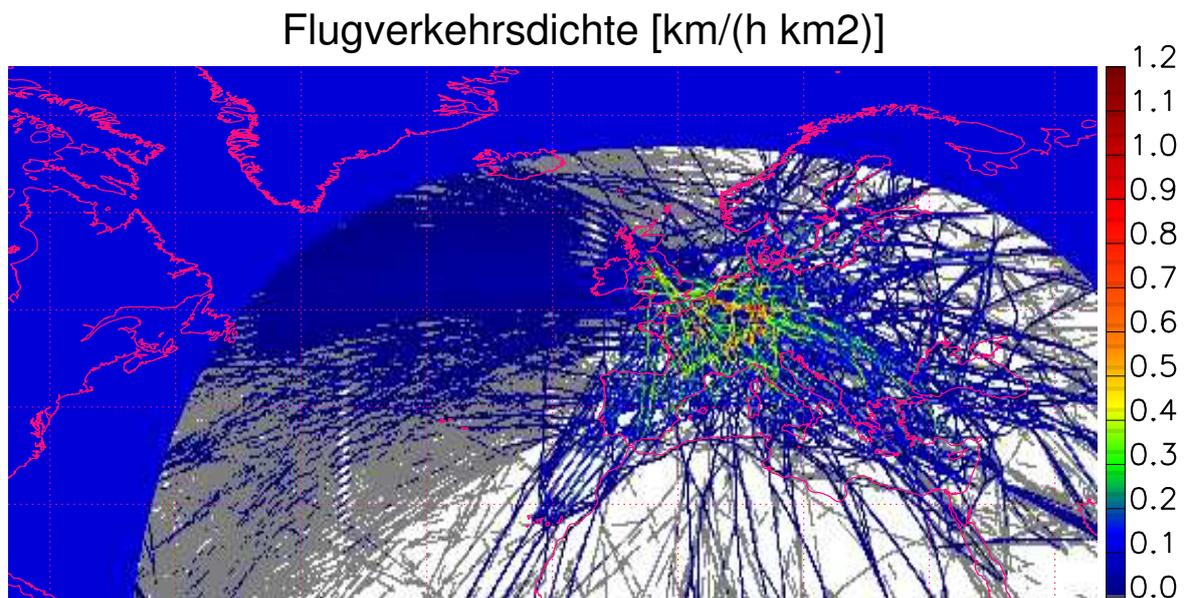


Abbildung 4.18: Mittlere Flugverkehrsdichte pro  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ -Box für das Jahr 2004 (11 Monate) für das Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ).

##### 4.3.4.1 Auswertung

###### Ergebnisse für das Gesamtgebiet

In Tabelle 4.10 sind die mittlere Zirrusbedeckung der Bildelemente mit Flugverkehr, ohne Flugverkehr und der Mittelwert der Zirrusbedeckung über alle Bildelemente dargestellt.

Tabelle 4.10: Statistiken der Zirrusbedeckung für das Gesamtgebiet  $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ , 2004

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	34.26%	42.68%	0.17%
Bildelemente ohne Flugverkehr	28.67%	40.97%	0.16%
Bildelemente gesamt	29.29%	41.20%	0.16%

Der relative Unterschied der Mittelwerte beträgt **2.17%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**. Das ergibt eine zusätzliche Bedeckung von  **$0.6 \pm 0.2\%$** .

Die mittlere Zirrusbedeckung in Abhängigkeit von den Flugverkehrsdichteklassen ist in Abb. 4.19 aufgetragen. Der Zusammenhang zwischen Flugverkehrsdichte und der Zirrusbedeckung ist deutlich erkennbar.

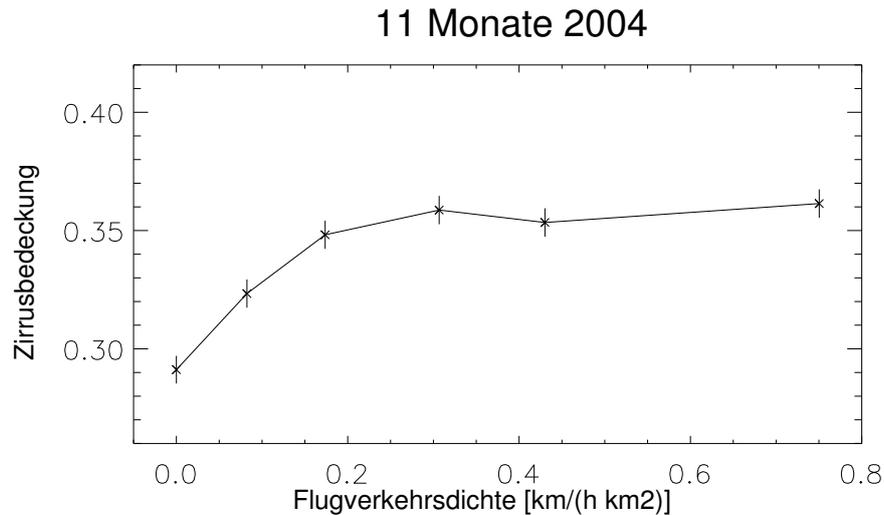


Abbildung 4.19: Zirrusbedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für 2004 für das Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) wurden aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet.

Der Spearman'sche Rang-Korrelationskoeffizient beträgt für die 6 Klassen: 1.0. Der Korrelationskoeffizient für alle (ausgewählten) Bildelemente ist 0.0286. Beide Werte sind **signifikant** verschieden von Null.

### Untersuchung über Land

Tabelle 4.11: Statistiken der Zirrusbedeckung für das Gesamtgebiet  $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ , 2004 (nur Land)

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	35.07%	42.63%	0.16%
Bildelemente ohne Flugverkehr	26.65%	39.64%	0.16%
Bildelemente gesamt	27.67%	40.10%	0.16%

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **3.81%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

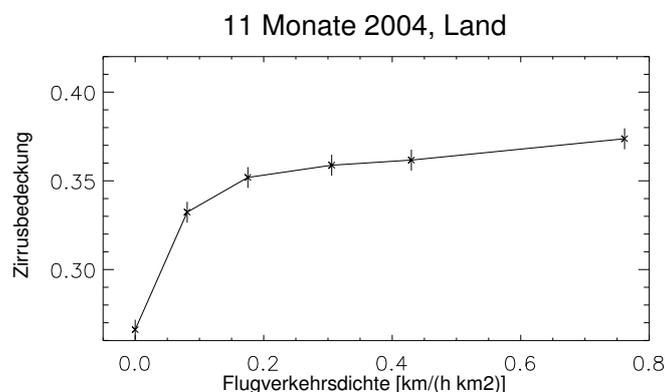


Abbildung 4.20: Zirrusbedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für 2004 für die Bildelemente über Land aus dem Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) wurden aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet.

Die Abhängigkeit der Zirrusbedeckung von den Flugverkehrsklassen ist in Abb. 4.20 dargestellt. Man sieht einen deutlichen Zusammenhang zwischen Flugverkehrsdichte und Zirrusbedeckung.

### Untersuchung über Wasser

Tabelle 4.12: Statistiken der Zirrusbedeckung für das Gesamtgebiet  $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ , 2004 (nur Wasser)

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	32.73%	42.65%	0.17%
Bildelemente ohne Flugverkehr	30.15%	41.74%	0.16%
Bildelemente gesamt	30.31%	41.96%	0.16%

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **0.52%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **nicht signifikant**.

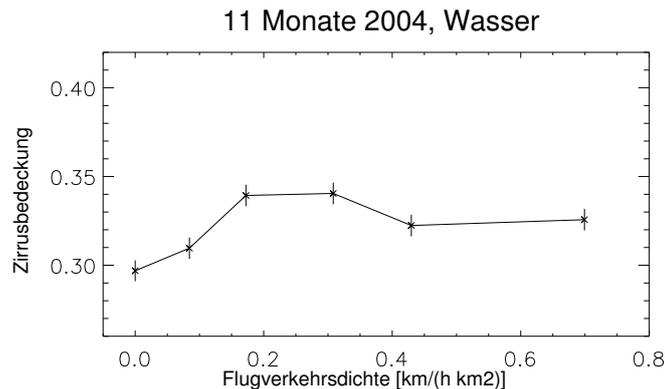


Abbildung 4.21: Zirrusbedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für 2004 für die Bildelemente über Wasser aus dem Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) wurden aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet.

In Abb. 4.21 ist der Zusammenhang zwischen den Flugverkehrsdichteklassen und Zirrusbedeckung dargestellt. Man sieht eine Erhöhung der Zirrusbedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte.

#### 4.3.4.2 Zusammenfassung Untersuchung des Gesamtgebiets

In diesem Abschnitt sind die Ergebnisse der Untersuchung des Gesamtgebiets vorgestellt. Für das gesamte Untersuchungsgebiet  $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$  konnte eine deutliche Korrelation zwischen Zirrusbedeckung und Flugverkehrsdichte gezeigt werden. Die Abschätzung des zusätzlichen Bedeckungsgrades beträgt  $0.6 \pm 0.2\%$ . Über Land lässt sich ein deutlicherer Zusammenhang zwischen Flugverkehrsdichte und Zirrusbedeckung zeigen als über Wasser. Die Abhängigkeit der Zirrusbedeckung von den Flugverkehrsdichteklassen ist in der gesamten Region jedoch deutlicher über Wasser als in der Europa-Nordafrika-Region über Wasser. Eine ausführliche Diskussion und die Zusammenfassung aller Ergebnisse folgt im anschließenden Abschnitt 4.4.

## 4.4 Zusammenfassung Einfluss auf die Zirusbedeckung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde erstmals für das Gebiet Europa, Nordatlantik und Nordafrika und für einen Zeitraum von 11 Monaten der direkte Einfluss des Flugverkehrs auf die Zirusbedeckung untersucht. Aufgrund der hohen zeitlichen Auflösung von SEVIRI konnte dabei die zeitliche Variabilität des Flugverkehrs berücksichtigt werden. Eine mögliche Scheinkorrelation durch natürliche tagesabhängige Variabilität der Zirusbedeckung konnte eliminiert werden. Dazu wurde die statistische Methode von [MANNSTEIN und SCHUMANN 2005] erweitert und verbessert.

Für das gesamte Untersuchungsgebiet  $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$  konnte eine deutliche Korrelation zwischen Zirusbedeckung und Flugverkehrsdichte gezeigt werden. Die Abschätzung des zusätzlichen Bedeckungsgrades beträgt  $0.6 \pm 0.2\%$ . Das untersuchte Gebiet umfasst ca. 8% der Erde. Da in dem Untersuchungsgebiet ca. 30% des globalen Flugverkehrs stattfindet, liefert eine lineare Extrapolation dieser Daten eine globale zusätzliche Bedeckung von  $0.17 \pm 0.06\%$ . Diese Abschätzung des zusätzlichen Bedeckungsgrades ist im Bereich des in *Aviation and the Global Atmosphere, A Special Report of IPCC* [FAHEY et al. 1999] angenommenen zusätzlichen flugverkehrsinduzierten Bedeckungsgrades von 0.2% [SCHUMANN 2005]. Der Strahlungsantrieb wurde in [FAHEY et al. 1999] mit einer optischen Dicke von 0.3 mit  $40 \frac{mW}{m^2}$  abgeschätzt. Der auf dem abgeschätzten Bedeckungsgrad basierende Strahlungsantrieb lässt sich demnach mit  $34 \frac{mW}{m^2}$  abschätzen.

Diese lineare Extrapolation berücksichtigt jedoch nicht die Tatsache, dass die Wirkung des Flugverkehrs auch von den klimatischen Bedingungen abhängt. So kann der Flugverkehr über den Tropen eine ganz andere Wirkung auf den Bedeckungsgrad haben als über dem Untersuchungsgebiet.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Europa-Nordafrika-Region  $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 30^{\circ}N - 60^{\circ}N$  ausführlich untersucht. Diese Region hat eine sehr hohe Flugverkehrsdichte. Sowohl die Flugverkehrsdaten als auch die Ergebnisse des Ziruserkennungsalgorithmus haben innerhalb dieser Region eine sehr hohe Zuverlässigkeit. Für diese Region wurde der durch den Flugverkehr induzierte Bedeckungsgrad für 11 Monate des Jahres 2004 mit  $1.1 \pm 0.5\%$  abgeschätzt. Für diese Region wurde eine deutliche Korrelation zwischen Flugverkehrsdichte und Zirusbedeckung gezeigt.

Da der flugverkehrsinduzierte Bedeckungsgrad von der Jahreszeit abhängt, wurde die Region für verschiedene Monate untersucht. Im Winter lässt sich eine geringere Zunahme der Bedeckung zeigen als in den Sommermonaten. Die Ursache hierfür ist wahrscheinlich der Jahresgang der natürlichen Zirusbedeckung. In den Monaten mit einer relativ hohen Zirusbedeckung kann der Flugverkehr nur geringfügig zu einer Erhöhung beitragen. Eine weitere Ursache könnten die jahreszeitlichen Veränderungen der Tropopausenhöhe liefern. Durch Absinken der Tropopause in den Wintermonaten könnte ein Teil des Flugverkehrs in dieser Region über den eisübersättigten Gebieten stattfinden. Eine ausführliche Untersuchung war jedoch aufgrund der fehlenden Information über die genaue Höhe des Flugverkehrs im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

Die Tageszeitabhängigkeit der flugverkehrsinduzierten Zirusbedeckung wurde ebenfalls untersucht. Nur eine hohe Flugverkehrsdichte liefert einen signifikanten Unterschied der mittleren Bedeckungsgrade. Zeitpunkte mit einer niedrigen Flugverkehrsdichte wie z.B. 03:00 UTC zeigen eine geringere Erhöhung des Bedeckungsgrades.

Zusätzlich zu dem Europa-Nordafrika Teilgebiet und dem gesamten Untersuchungsgebiet  $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$  wurden auch andere Regionen innerhalb dieses Gebiets untersucht. Dabei lässt sich für Gebiete mit einer hohen natürlichen Zirusdichte und gleichzeitig geringen Flugverkehrsdichte kein Anstieg der Zirusbedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte zeigen. Insbesondere Regionen über Nordosteuropa können auch eine Abnahme der Zirusbedeckung zeigen, da über den Ballungszentren dieser Region weniger Zirren detektiert wurden als in den nördlichen und östlichen Gebieten. In diesen Gebieten wurde aufgrund des hohen Satellitenzenitwinkels die Zirusbedeckung überbewertet. Die Flugverkehrsdichtedaten dieser Region sind außerdem weniger zuverlässig. Der Flugverkehr zwischen Russland und den ehemaligen Republiken der UdSSR ist im Flugverkehrsdatensatz von EUROCONTROL teilweise nicht enthalten. Dies erschwert eine genaue

Analyse dieser Region. Für die Untersuchung des Gesamtgebiets ist der Beitrag dieser fehlenden Flüge jedoch vernachlässigbar. Dies gilt auch für den militärischen Flugverkehr, der ebenfalls in dem Datensatz nicht enthalten ist. In Regionen mit einer niedrigen natürlichen Zirkusbedeckung zeigt sich ein deutlicher Anstieg der Zirkusbedeckung abhängig von der Flugverkehrsdichte. Solche Regionen sind z.B. Nordafrika und Süd-West-Asien.

Über Land lässt sich ein deutlicherer Zusammenhang zwischen Flugverkehrsdichte und Zirkusbedeckung zeigen als über Wasser. Der Grund hierfür ist die größere Flugverkehrsdichte. Über Wasser zeigt sich in der Europa-Nordafrika-Region  $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 30^{\circ}N - 60^{\circ}N$  kein signifikanter Unterschied der Mittelwerte. Dies gilt auch für das gesamte Untersuchungsgebiet  $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$  über Wasser. Die Abhängigkeit der Zirkusbedeckung von den Flugverkehrsdichteklassen ist in der gesamten Region jedoch deutlicher über Wasser als in der Europa-Nordafrika-Region über Wasser.



## Kapitel 5

# Einfluss des Flugverkehrs auf den Strahlungshaushalt

In diesem Kapitel wird der Einfluss des Flugverkehrs auf den Strahlungshaushalt für die Region  $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$  und Teilregionen untersucht. Es werden die in Kapitel 4 vorgestellten statistische Methoden zur Abschätzung des durch den Flugverkehr induzierten zusätzlichen Bedeckungsgrades auch zur Abschätzung des Strahlungsantriebs verwendet. Der Einfluss des Flugverkehrs auf den Strahlungshaushalt wird aus der Änderung der ausgehenden Strahlungsflussdichten abgeschätzt. Das Verfahren wird kurz vorgestellt und diskutiert. Anschließend werden die Ergebnisse der statistischen Untersuchungen für die gesamte Region sowie Teilgebiete gezeigt und erläutert.

### 5.1 Methoden zur Abschätzung des Strahlungsantriebs

Für die Abschätzung des Strahlungsantriebs durch den Flugverkehr wurde die ausgehende langwellige und kurzwellige Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit vom Flugverkehr untersucht. Dazu wurden die mittleren Strahlungsflussdichten der Bildelemente ohne Flugverkehr mit den Strahlungsflussdichten des jeweiligen Untersuchungsgebiets verglichen. Aus der Differenz wurde die Wirkung des Flugverkehrs auf den Strahlungshaushalt abgeschätzt. Wie für die Untersuchung der Korrelation zwischen Zirrusbedeckungsgrad und Flugverkehrsdichteklassen wurde die Korrelation der ausgehenden Strahlungsflussdichten in Abhängigkeit von den Flugverkehrsdichteklassen untersucht.

Die Wirkung des Flugverkehrs auf den Strahlungshaushalt hängt vor allem von der Tageszeit und von der Albedo unterhalb der durch den Flugverkehr induzierten Zirren und Kondensstreifen ab. Zirren absorbieren langwellige Strahlung und wirken auf das System Erde/Atmosphäre nachts immer erwärmend. Tagsüber kann der abschattende Effekt auf die solare Einstrahlung vor allem über Oberflächen mit geringer Albedo überwiegen. Deshalb ist es notwendig den Flugverkehr in verschiedenen Regionen und zu verschiedenen Tageszeiten zu untersuchen. Desweiteren kann der Flugverkehr in den Monaten mit mehr solarer Einstrahlung, wie im Sommer (in der nördlichen Hemisphäre), einen kühlenden und in den Wintermonaten einen erwärmenden Beitrag liefern. Deshalb wurden Untersuchungen für verschiedene Monate durchgeführt.

In Abb. 5.1 sind die über 11 Monate gemittelte<sup>1</sup> ausgehenden langwelligigen und kurzwelligigen Strahlungsflussdichten, sowie die summierten ausgehenden (kurzwelligigen+langwelligigen) Strahlungsflussdichten dargestellt. Eine Erhöhung der ausgehenden kurzwelligigen Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit vom Flugverkehr würde eine Kühlung des System Erde/Atmosphäre durch den Flugverkehr bedeuten, die Verringerung der langwelligigen Strahlung eine Erwärmung. Verringert sich die Summe der ausgehenden Strahlungsflussdichte (kurzwellig + langwellig), wirkt der Flugverkehr erwärmend.

---

<sup>1</sup>Zur Berechnung der Mittelwerte wurden 4 Zeitpunkte pro Tag für 335 Tage zufällig gezogen

Diese Schlussfolgerung gilt nur, wenn die solare Einstrahlung und der Flugverkehr unkorreliert sind. Jedoch existiert eine Scheinkorrelation, da der Flugverkehr tageszeitabhängig ist. Der Tagesgang wird bei der Abschätzung der Veränderung des ausgehenden Strahlungsflusses berücksichtigt. Es werden, wie für die Abschätzung des Bedeckungsgrades, zu jedem Zeitpunkt die gleiche Anzahl an Bildelementen ohne Flugverkehr, mit Flugverkehr und ohne Unterscheidung ausgewählt. Aus diesen Bildelementen werden die Mittelwerte der ausgehenden kurzwelligen und langwelligen Strahlung berechnet. Dadurch wird die zeitliche Scheinkorrelation eliminiert.

Es existiert jedoch auch eine räumliche Scheinkorrelation, da die solare Einstrahlung in dem Untersuchungsgebiet eine Nord-Süd-Abhängigkeit aufweist. Im Süden trifft mehr Strahlung ein als im Norden und es wird daher mehr Strahlung reflektiert und emittiert, da sich im Süden dieser Region wärmere Gebiete befinden. Deshalb sieht man für den langwelligen Anteil (Abb. 5.1) einen deutlichen Nord-Süd Gradienten der ausgehenden langwelligen Strahlungsflussdichte. Die kurzwellige ausgehende Strahlungsflussdichte ist stärker von den Oberflächeneigenschaften und vom Wolkenbedeckungsgrad abhängig. Betrachtet man die Bildelemente nur über Land hat auch die kurzwellige Strahlungsflussdichte einen deutlichen Nord-Süd Gradienten. Diese Abhängigkeiten erschweren die Interpretation der Ergebnisse, da auch die Flugverkehrsdichte im Norden, insbesondere in Europa, größer ist als z.B. über Afrika.

Der Flugverkehr wirkt regional unterschiedlich auf den Strahlungshaushalt. Insbesondere zwischen Gebieten über Wasser und Land gibt es große Unterschiede. Im Untersuchungsgebiet ist z.B. über Nordafrika die Albedo sehr hoch, so dass eine Zirkuswolke kaum zu einer Erhöhung beiträgt, d.h. der kurzwellige abschattende Anteil ist gering. Auf der anderen Seite ist die Temperaturdifferenz der Zirkuswolke zum Boden sehr hoch, damit ist der langwellige wärmende Anteil ebenfalls hoch. Über Nordafrika ist eine Erwärmung abhängig vom Flugverkehr zu erwarten. Wasser hat eine sehr niedrige Albedo, eine Zirkuswolke erhöht diese und wirkt daher abkühlend. Ist das Wasser relativ kalt, wie z.B. in den Regionen der Europa-Nordamerika-Route im Nordatlantik, dann ist der langwellige Anteil geringer, so dass in Summe eine Abkühlung zu erwarten wäre. Aufgrund der Unterschiede wurden Land und Wasser zusätzlich getrennt untersucht.

Die Zusammenhänge sind jedoch komplexer. Befände sich z.B. über dem Wasser eine tiefe Wasserwolke, wäre die Albedoänderung durch den Zirkus vernachlässigbar. In der Summe würde der Flugverkehr über Gebieten mit einem hohem Bedeckungsgrad von tiefen Wasserwolken auch über Wasser erwärmen. Sehr große Gebiete der Europa-Nordamerika-Route haben einen hohen Bedeckungsgrad von tiefen Wasserwolken (siehe ISCCP-Datensatz: <http://isccp.giss.nasa.gov/>, [ROSSOW und SCHIFFER 1991]) und ein bedeutender Anteil des Flugverkehrs auf dieser Route findet in der Nacht statt.

Das Problem hängt von vielen Faktoren gleichzeitig ab, und es stehen mit dem Datensatz nicht genügend Datenpunkte zur Verfügung, um alle Faktoren getrennt zu untersuchen. Dennoch konnten einzelne Faktoren wie der Tages- und Jahresgang eliminiert werden. Die Untersuchungen zeigen erstmals den direkten Einfluss des Flugverkehrs auf den Strahlungshaushalt der Erde.

Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass in diesen Untersuchungen der Flugverkehr und die ausgehende Strahlungsflussdichte immer gleichzeitig betrachtet werden. Die Lebenszeit flugverkehrs-induzierter Zirren wird nicht berücksichtigt. Flugverkehr kann z.B. über Wasser am Tag stattfinden und Kondensstreifen und Zirren erzeugen, die bis in die Nacht existieren können (siehe z.B. [http://www.pa.op.dlr.de/contrails/loops/CANAR\\_MOVIE.gif](http://www.pa.op.dlr.de/contrails/loops/CANAR_MOVIE.gif)). In der Beispielszene verdriften die Zirren, die über Wasser entstanden, in Gebiete mit einer sehr hohen Bodentemperatur. Damit kann ein Flugzeug Zirren erzeugen, die während ihrer Lebenszeit sowohl kühlend als auch erwärmend wirken.

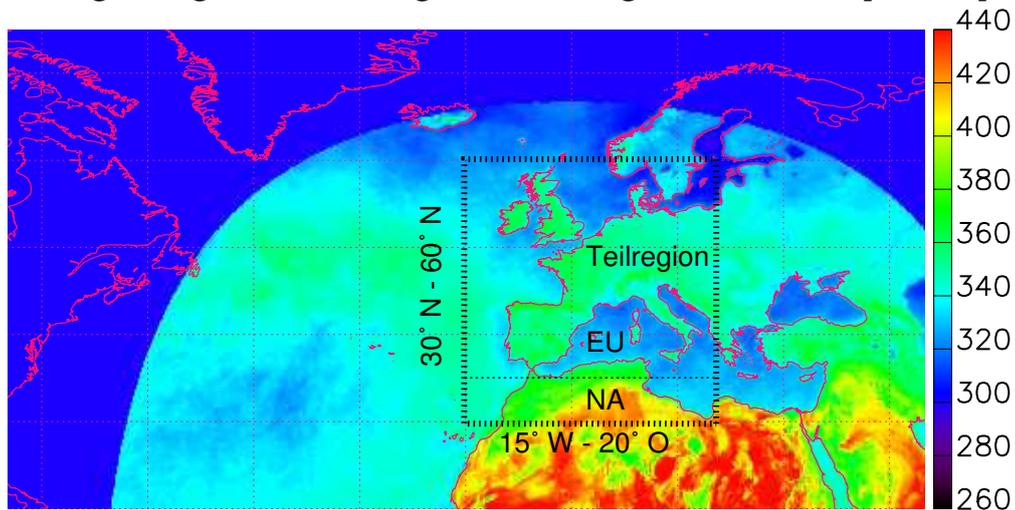
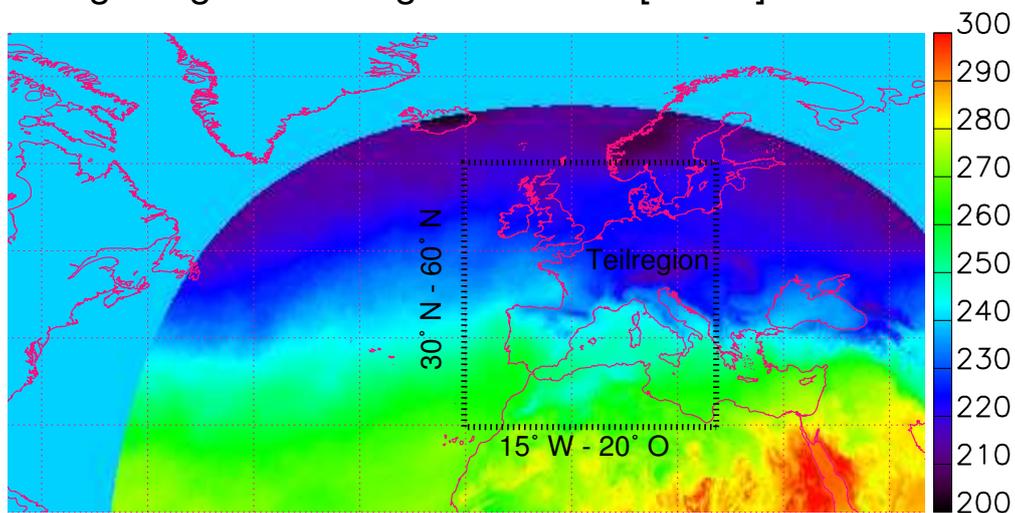
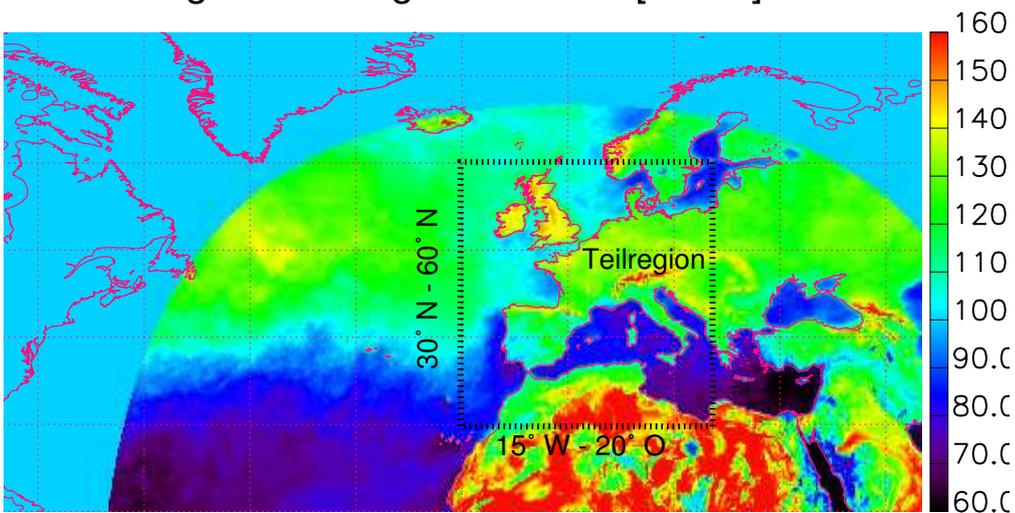
langwellige+kurzwellige Strahlungsflussdichte [W/m<sup>2</sup>]langwellige Strahlungsflussdichte [W/m<sup>2</sup>]kurzwellige Strahlungsflussdichte [W/m<sup>2</sup>]

Abbildung 5.1: **Oben:** Mittlere ausgehende Strahlungsflussdichte (langwellig + kurzwellig) am Oberrand der Atmosphäre [ $\frac{W}{m^2}$ ] pro  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ -Box für das Jahr 2004 (11 Monate) für das gesamte Untersuchungsgebiet ( $80^\circ W - 50^\circ O, 20^\circ N - 75^\circ N$ ) und Europa-Nordafrika-Teilregion ( $15^\circ W - 20^\circ O, 20^\circ N - 60^\circ N$ ). **Mitte:** Langwelliger Anteil der Strahlungsflussdichte [ $\frac{W}{m^2}$ ]. **Unten:** Kurzwelliger Anteil der Strahlungsflussdichte [ $\frac{W}{m^2}$ ].

## 5.2 Ergebnisse der statistischen Untersuchungen

In Folge werden die Ergebnisse der Untersuchungen vorgestellt. Die ausgehende langwellige und kurzwellige Strahlungsflussdichte wurde für verschiedene Regionen untersucht. Um die unterschiedliche Wirkung des Flugverkehrs abhängig vom Jahrgang zu veranschaulichen werden die Untersuchungen der unterschiedlichen Monate gezeigt. Die Ergebnisse des Einflusses des Flugverkehrs in Abhängigkeit von der Tageszeit werden dargestellt. Die langwellige und kurzwellige ausgehende Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit vom Flugverkehr wurde sowohl als Summe als auch getrennt betrachtet.

### 5.2.1 Untersuchung des Jahrgangs für die Europa-Nordafrika-Teilregion

In diesem Abschnitt wird die Teilregion  $15^{\circ}W - 20^{\circ}O$ ,  $20^{\circ}N - 60^{\circ}N$  (siehe Abb. 5.1) für den Monat Februar, Mai, Juli und Oktober 2004 untersucht. Dabei werden zu jedem Zeitpunkt 40 Bildelemente ausgewählt. Der Flugverkehr wird in sechs Flugverkehrsdichteklassen (siehe Tab. 4.1) unterteilt. Für die Bestimmung eines Zusammenhangs der ausgehenden Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre mit der Zunahme der Flugverkehrsdichte werden aus den Klassen 20000 Bildelemente zufällig mit Zurücklegen ausgewählt.

#### 5.2.1.1 Ergebnisse

In Abb. 5.2 sind die Ergebnisse der Untersuchungen für die einzelnen Monate dargestellt.

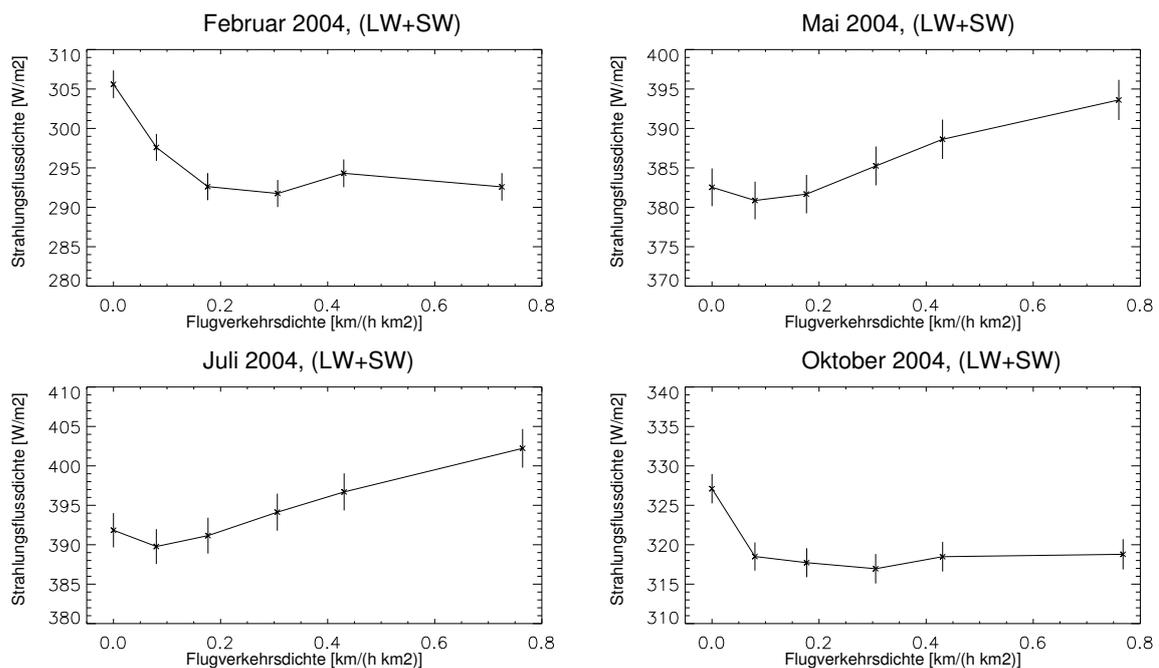


Abbildung 5.2: Mittlere ausgehende Strahlungsflussdichte (kurzwellig + langwellig) am Oberrand der Atmosphäre für Februar, Mai, Juli und Oktober 2004 in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte. Bildelemente sind zufällig aus dem Gebiet ( $15^{\circ}W - 20^{\circ}O$ ,  $20^{\circ}N - 60^{\circ}N$ ) ausgewählt. Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet.

Es wird angenommen, die ausgehende Strahlungsflussdichte ohne Flugverkehr wäre die natürliche ausgehende Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre. Die Differenz zwischen diesem Wert und der ausgehenden Strahlungsflussdichte aus dem Gesamtgebiet wird als flugverkehrsinduzierter Strahlungsantrieb interpretiert. Eine Verringerung der ausgehenden Strahlungsflussdichte bedeutet eine Erwärmung durch den Flugverkehr, eine Vergrößerung bedeutet, dass mehr Strahlung in den Weltraum zurückreflektiert wird und somit eine Abkühlung. Ein negativer Wert bedeutet damit eine Erwärmung, ein positiver einen kühlenden Effekt. In Anhang B.3 werden die berechneten

ausgehenden Strahlungsflussdichten ohne Flugverkehr, mit Flugverkehr und für die gesamte Region tabellarisch aufgelistet.

### 5.2.1.2 Zusammenfassung Untersuchung des Jahresgangs

In diesem Abschnitt wurde die Wirkung des Flugverkehrs auf den Strahlungsbilanz für vier verschiedene Monate untersucht. In Tabelle 5.1 sind die Ergebnisse zusammengefasst.

Tabelle 5.1: Zusammenfassung der Untersuchung des Jahresgang

Monat	Bildelemente ohne Flugverkehr	Bildelemente gesamt	Unterschied der Mittelwerte	signifikanter Unterschied
Februar	304.84 $W/m^2$	302.34 $W/m^2$	$-2.49 \pm 1.26 W/m^2$	ja
Mai	384.29 $W/m^2$	384.19 $W/m^2$	$-0.10 \pm 1.51 W/m^2$	nein
Juli	394.21 $W/m^2$	394.88 $W/m^2$	$+0.67 \pm 1.41 W/m^2$	nein
Oktober	327.33 $W/m^2$	325.23 $W/m^2$	$-2.09 \pm 1.34 W/m^2$	ja
Mittelwert	352.67 $W/m^2$	351.66 $W/m^2$	$-1.00 W/m^2$	-

Für den Monat Februar zeigt sich eine Abnahme der ausgehenden Strahlungsflussdichte mit der Zunahme der Flugverkehrsdichte (siehe Abb. 5.2). Der Flugverkehr wirkt mit  $2.49 \frac{W}{m^2}$  wärmend. Im Oktober überwiegt ebenfalls der erwärmende Anteil. Der Flugverkehr wärmt mit  $2.09 \frac{W}{m^2}$ . Für die Monate Mai und Juli 2004 zeigen die Vergleiche der Mittelwerte keine signifikanten Unterschiede. Betrachtet man in Abb. 5.2 die Kurven für Mai und Juli sieht man eine deutliche Zunahme der ausgehenden Strahlungsflussdichte mit der Zunahme des Flugverkehrs. D.h. für diese Monate wirkt der Flugverkehr kühlend.

Die Unterschiede zwischen den Monaten beruhen vor allem auf den unterschiedlichen Anteilen der solaren Einstrahlung pro Monat. Die solare Einstrahlung ist in den Wintermonaten für die untersuchte Region deutlich geringer als im Sommer. Damit ist der kühlende kurzwellige Anteil ebenfalls geringer. Die langwellige Wirkung des Flugverkehrs ist zwar ebenfalls geringer, da der Temperaturunterschied zwischen Erdboden und Zirrus geringer ist, es überwiegt dennoch der langwellige Anteil. Der Flugverkehr wirkt erwärmend. In den Sommermonaten überwiegt hingegen der kurzwellige Anteil. Der Flugverkehr kühlt.

## 5.2.2 Untersuchung der Europa-Nordafrika-Teilregion für 11 Monate des Jahres 2004

Im diesem Abschnitt wird die Teilregion  $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 20^{\circ}N - 60^{\circ}N$  für 11 Monate des Jahres 2004 untersucht. Für jeden Tag werden vier Zeitpunkte zufällig mit Zurücklegen ausgewählt. Zu jedem Zeitpunkt werden 40 Bildelemente ausgewählt. Der Flugverkehr wird in sechs Flugverkehrsdichteklassen (siehe Tab. 4.1) unterteilt. Für die Bestimmung der Zunahme der ausgehenden Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre mit der Zunahme der Flugverkehrsdichte werden aus den Klassen 20000 Bildelemente zufällig mit Zurücklegen ausgewählt.

### 5.2.2.1 Ergebnisse

In Tabelle 5.2 sind die Statistiken für 11 Monate des Jahres 2004 dargestellt.

Tabelle 5.2: Statistiken der gesamten (kurzwellig + langwellig) ausgehenden Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre für die Teilregion  $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 20^{\circ}N - 60^{\circ}N, 2004$

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	$349.46 \text{ W/m}^2$	$153.84 \text{ W/m}^2$	$1.35 \text{ W/m}^2$
Bildelemente ohne Flugverkehr	$355.11 \text{ W/m}^2$	$151.57 \text{ W/m}^2$	$1.33 \text{ W/m}^2$
Bildelemente Gesamt	$353.03 \text{ W/m}^2$	$151.72 \text{ W/m}^2$	$1.33 \text{ W/m}^2$

Unterschied der Mittelwerte =  $-2.08 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

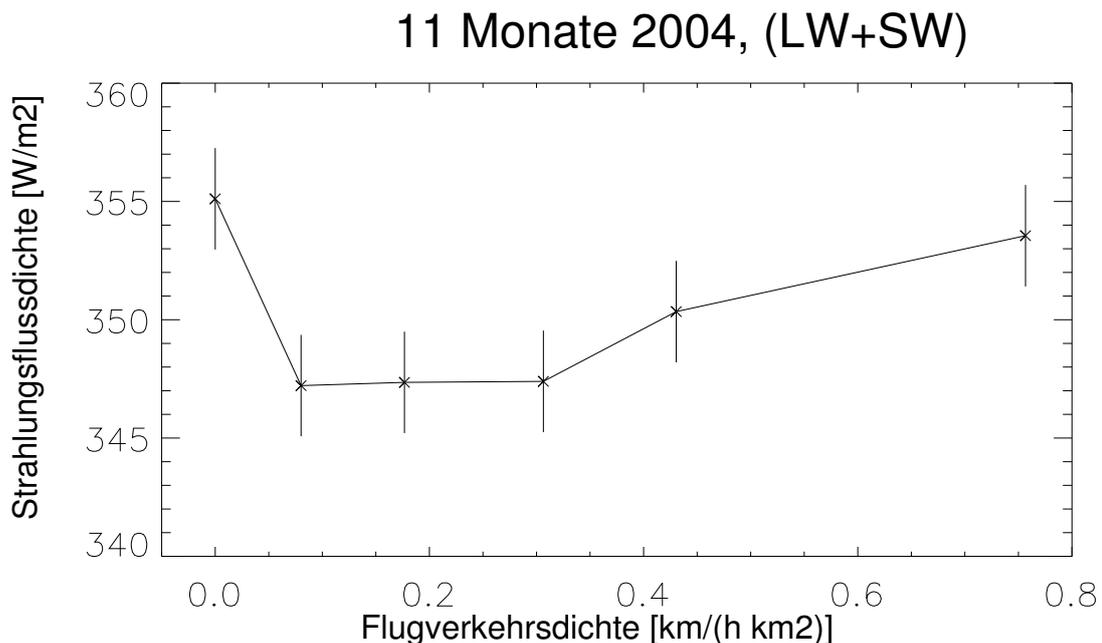


Abbildung 5.3: Mittlere ausgehende Strahlungsflussdichte (kurzwellig + langwellig) am Oberrand der Atmosphäre für 11 Monate des Jahres 2004 in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte. Bildelemente sind zufällig aus dem Gebiet ( $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 20^{\circ}N - 60^{\circ}N$ ) ausgewählt. Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet.

Die mittlere ausgehende Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit von Flugverkehrsklassen ist in Abb. 5.3 aufgetragen. Die aus den Bildelementen ohne Flugverkehr berechneten ausgehende Strahlungsflussdichte ist höher als die Strahlungsflussdichten aus den Bildelementen der einzelnen Flugverkehrsklassen. Für die verschiedenen Flugverkehrsdichteklassen steigt die ausgehende Strahlungsflussdichte mit zunehmender Flugverkehrsdichte.

### 5.2.2.2 Zusammenfassung Untersuchung der 11 Monate des Teilgebiets Europa-Nordafrika

Für das Gebiet  $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 20^{\circ}N - 60^{\circ}N$  zeigt sich für 11 Monate eine **Erwärmung** um  $2.1 \frac{W}{m^2}$ . Beachtet man die vorhergehenden Untersuchungen der einzelnen Monate, wäre für Januar ebenfalls eine Erwärmung zu erwarten. Der erwärmende Anteil wäre wahrscheinlich höher, wenn dieser Monat bei der Untersuchung berücksichtigt werden hätte können.

Jedoch zeigte die Untersuchung von Teilgebieten des Untersuchungsgebiets, dass der größte Teil der Erwärmung in der Region  $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 30^{\circ}N - 35^{\circ}N$  (das ist die Nordafrika Region) stattfindet. Innerhalb dieses Gebietes ist die Differenz der mittleren Strahlungsflussdichten der flugverkehrsfreien Bildelemente und der Bildelemente über das gesamte Teilgebiet:  $1.3 \frac{W}{m^2}$ .

Die Erwärmung über Nordafrika erklärt jedoch nicht vollständig den sehr hohen Wert von  $2.1 \frac{W}{m^2}$ . In der Nordafrika Region ist die mittlere Flugverkehrsdichte ca.  $0.01 \frac{km}{km^2h}$ , während in der gesamten Region die Flugverkehrsdichte ca.  $0.07 \frac{km}{km^2h}$  beträgt. Für das gesamte Gebiet  $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 30^{\circ}N - 60^{\circ}N$  kommt hinzu, dass aufgrund des sehr starken Nord-Süd Gradienten der ausgehenden Strahlungsflussdichten die mittleren Strahlungsflussdichte für die Bildelemente ohne Flugverkehr systematisch überschätzt wird, da im Süden dieses Gebiets die Wahrscheinlichkeit höher ist, ein flugverkehrsfreies Bildelement auszuwählen.

Die Untersuchung der nördlichen Teilregion  $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 35^{\circ}N - 60^{\circ}N$  (nur Europa, ohne Nordafrika) ergibt eine **Abkühlung** von  $1.5 \frac{W}{m^2}$ . Man muss jedoch auch für diese Untersuchung beachten, dass durch das Ausschließen des Januar 2004 der kühlende Effekt überschätzt werden kann.

Desweiteren können in Gebieten mit einer sehr hohen Flugverkehrsdichte, wie in der untersuchten Region und vor allem in dem nördlichen Anteil dieser Region, in die flugverkehrsfreien Bildelemente Zirren aus benachbarten Bildelementen mit Flugverkehr verdriften. Dies erhöht die Unsicherheit des Wertes für die Strahlungsflussdichte flugverkehrsfreier Bildelemente.

### 5.2.3 Untersuchung des Tagesgangs in der Gesamtregion

Die Wirkung des Flugverkehr auf den Strahlungshaushalt hängt stark von der Tageszeit ab, zu der der Flugverkehr stattfindet. Für diese Untersuchung wurden aus jedem Tag die Zeitpunkte 03:00, 06:00, 09:00, 12:00, 15:00, 18:00 und 21:00 UTC ausgewählt. Um die statistische Unsicherheit zu verringern, wurde das gesamte Untersuchungsgebiet  $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$  (siehe Abb. 5.1) untersucht. Der Flugverkehr wurde in sechs Flugverkehrsdichteklassen (siehe Tab. 4.1) unterteilt. Da das untersuchte Gebiet ca. fünf mal größer ist als das untersuchte Europa-Nordafrika-Teilgebiet, wurden aus jeder Klasse 200 Bildelemente pro Zeitpunkt zufällig ausgewählt. Da der Flugverkehr zu einem Zeitpunkt stark autokorreliert ist, wurden aus den Flugverkehrsdichteklassen wieder 2000 Bildelemente zufällig ausgewählt, um die Autokorrelation zu reduzieren.

#### 5.2.3.1 Ergebnisse

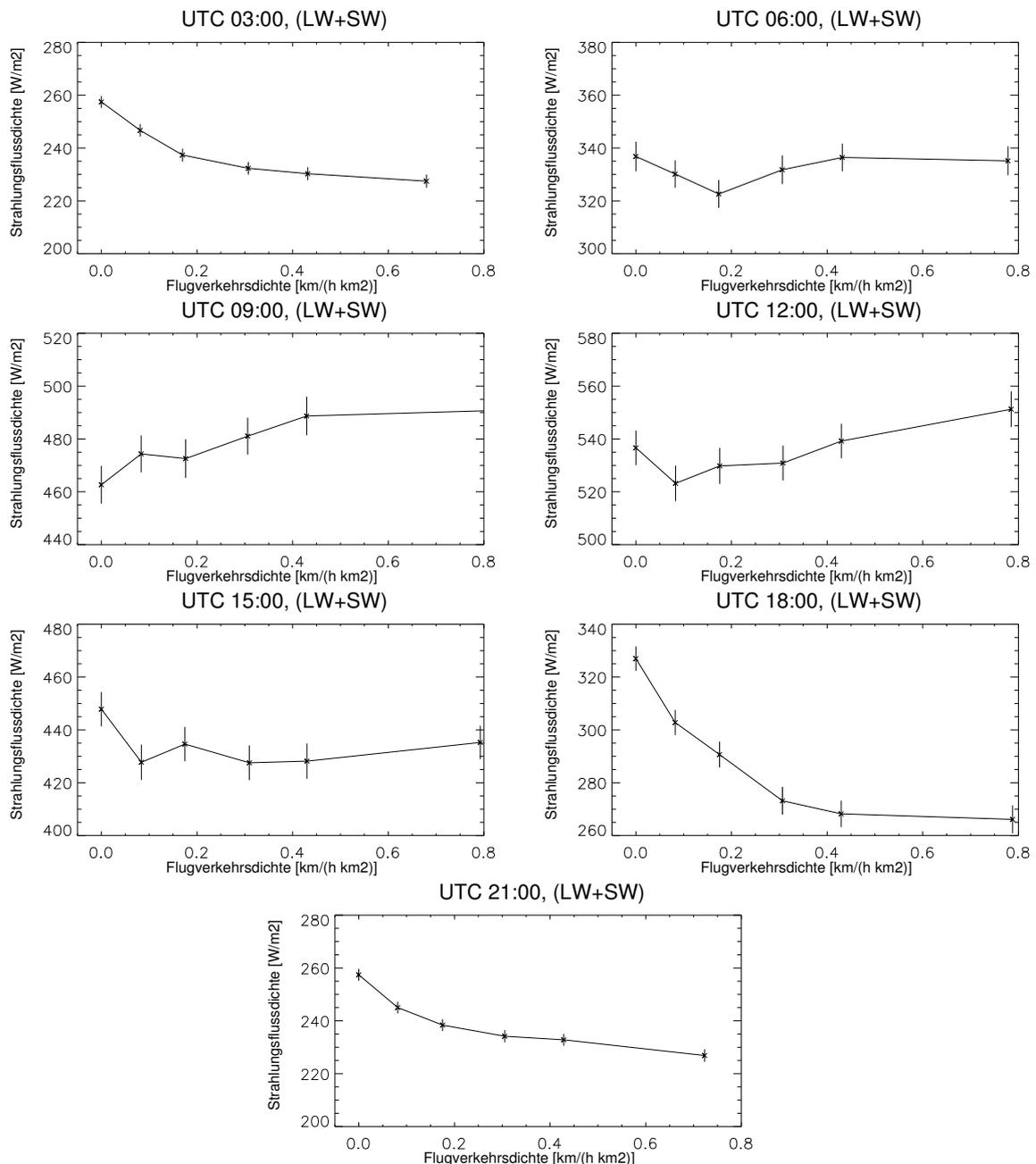


Abbildung 5.4: Mittlere ausgehende Strahlungsflussdichte (kurzwellig + langwellig) am Oberrand der Atmosphäre um 03:00, 06:00, 09:00, 12:00, 15:00, 18:00 und 21:00 UTC 2004 in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte. Bildelemente sind zufällig aus dem Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ) ausgewählt. Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) aus 2000 Bildelementen pro Klasse berechnet.

Die Ergebnisse der Abhängigkeit der Strahlungsflussdichte von den Flugverkehrsdichteklassen sind in Abbildung 5.4 dargestellt. Für jeden der ausgewählten Zeitpunkte wurde die ausgehende Strahlungsflussdichte ohne Luftverkehr und für das gesamte Untersuchungsgebiet berechnet. Zur besseren Lesbarkeit wurden die Tabellen mit den Einzelergebnissen in Anhang B.4 gelistet.

### 5.2.3.2 Zusammenfassung Untersuchung des Tagesgangs

In diesem Abschnitt wurde die Wirkung des Flugverkehrs auf den Strahlungshaushalt in Abhängigkeit von der Tageszeit gezeigt. In Tabelle 5.3 sind die gezeigten Ergebnisse zusammengefasst in Abbildung 5.5 ist der Tagesgang veranschaulicht. Eine ausführliche Auflistung aller Ergebnisse ist in Anhang B.4 dargestellt.

Tabelle 5.3: Zusammenfassung der Untersuchung des Tagesgangs

Monat	Bildelemente ohne Flugverkehr	Bildelemente gesamt	Unterschied der Mittelwerte	signifikanter Unterschied
03:00 UTC	255.81 $W/m^2$	254.50 $W/m^2$	$-1.30 \pm 0.57W/m^2$	ja
06:00 UTC	333.85 $W/m^2$	333.50 $W/m^2$	$-0.34 \pm 1.36W/m^2$	nein
09:00 UTC	465.70 $W/m^2$	465.64 $W/m^2$	$-0.05 \pm 1.60W/m^2$	nein
12:00 UTC	533.45 $W/m^2$	533.82 $W/m^2$	$+0.37 \pm 1.64W/m^2$	nein
15:00 UTC	447.90 $W/m^2$	446.39 $W/m^2$	$-1.51 \pm 1.63W/m^2$	nein
18:00 UTC	324.90 $W/m^2$	320.70 $W/m^2$	$-3.39 \pm 1.16W/m^2$	ja
21:00 UTC	256.18 $W/m^2$	254.84 $W/m^2$	$-1.34 \pm 0.54W/m^2$	ja
Mittelwert	373.97 $W/m^2$	372.77 $W/m^2$	$-1.08W/m^2$	-

Die Wirkung des Flugverkehrs variiert sehr stark mit der Tageszeit. In Abb. 5.4 sind die ausgehenden Strahlungsflussdichten in Abhängigkeit von den Flugverkehrsdichteklassen zu verschiedenen Tageszeiten aufgetragen. Die Vertrauensintervalle variieren dabei abhängig von der Tageszeit, da die hohe Standardabweichung des reflektierten solaren Anteils für die Tagestermine dominierend ist. Die Standardabweichung der langwelligen Strahlung ist geringer. Der Wertebereich der langwelligen Strahlungsflussdichten ist sehr viel kleiner als für den solare Anteil.

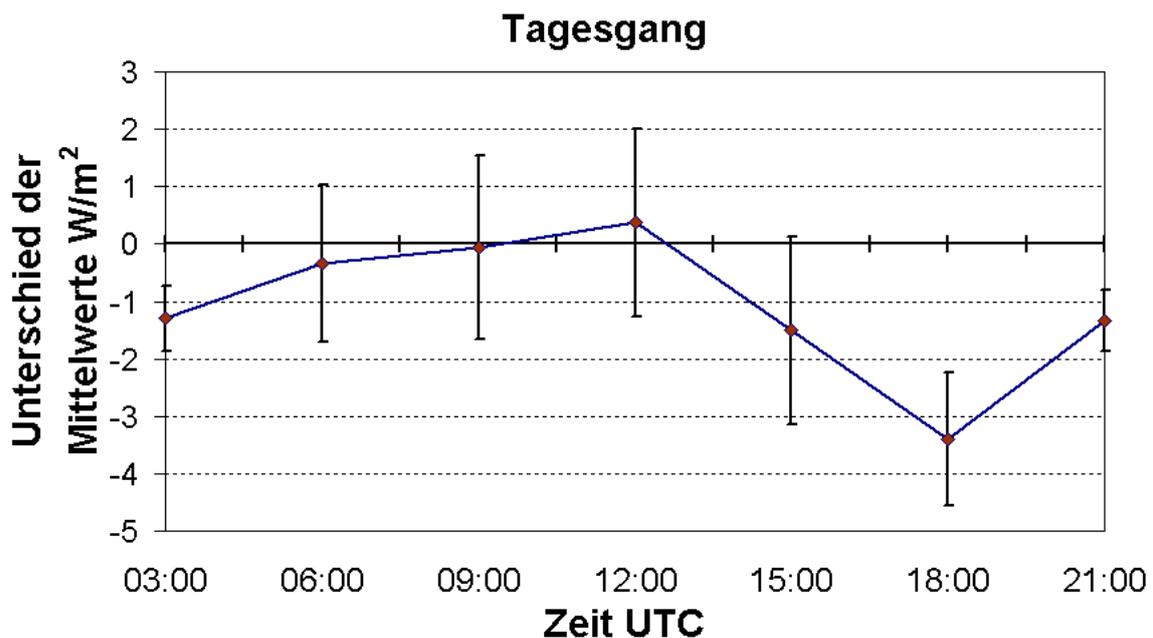


Abbildung 5.5: Tagesgang der Wirkung des Flugverkehrs auf den Strahlungsantrieb

Man sieht eine deutliche Abnahme der ausgehenden Strahlungsflussdichte mit zunehmender Flugverkehrsdichte um 03:00 UTC. Um 06:00 UTC ist kein eindeutiger Trend erkennbar, während um 9:00 UTC ein deutlicher Anstieg der ausgehenden Strahlungsflussdichte mit der Zunahme der Flugverkehrsdichte zu sehen ist. Für diesen Zeitpunkt überwiegt der kühlende Anteil des Flugverkehrs. Der Mittelwert der ausgehenden Strahlungsflussdichte ohne Flugverkehr und der Mittelwert über alle Bildelemente unterscheiden sich allerdings nicht signifikant. Die statistische Unsicherheit ist wegen der hohen Standardabweichung der reflektierten Strahlung zu hoch. Um 12:00 UTC ist ebenfalls ein Anstieg der Strahlungsflussdichte mit der Zunahme der Flugverkehrsdichte zu beobachten. Ab 15:00 UTC ist kein eindeutiger Trend erkennbar. Der kühlende und erwärmende Anteil kompensieren sich.

Um 18:00 UTC sieht man den deutlichsten Abfall der ausgehenden Strahlungsflussdichte. Der erwärmende Anteil überwiegt. Die Erwärmung durch den Flugverkehr ist zu diesem Zeitpunkt am höchsten:  $3.4 \frac{W}{m^2}$ . Der kurzwellige abschattende Anteil ist sehr gering. Auf der anderen Seite ist die Erdoberfläche durch die solare Einstrahlung erwärmt, so dass der Gradient zwischen Bodentemperatur und Zirrustemperatur sehr hoch ist. Die Flugverkehrsdichte ist zu diesem Zeitpunkt ebenfalls sehr hoch. Am Abend ist daher die erwärmende Wirkung des Flugverkehrs auf das System Erde/Atmosphäre am höchsten. Da die flugverkehrsinduzierten Zirren, die um 18:00 UTC entstehen in der Nacht weiter existieren können, könnte dieser Effekt noch größer sein.

Für 21:00 UTC ist für den größten Teil des Untersuchungsgebietes die solare Einstrahlung gleich Null, so dass nur der langwellige Anteil zum Strahlungshaushalt beiträgt. Der Flugverkehr erwärmt in der Nacht. Der Gradient zwischen Bodentemperatur und Zirrustemperatur ist jedoch geringer als um 18:00 UTC, so dass die Erwärmung auf  $1.3 \frac{W}{m^2}$  zurückgeht.

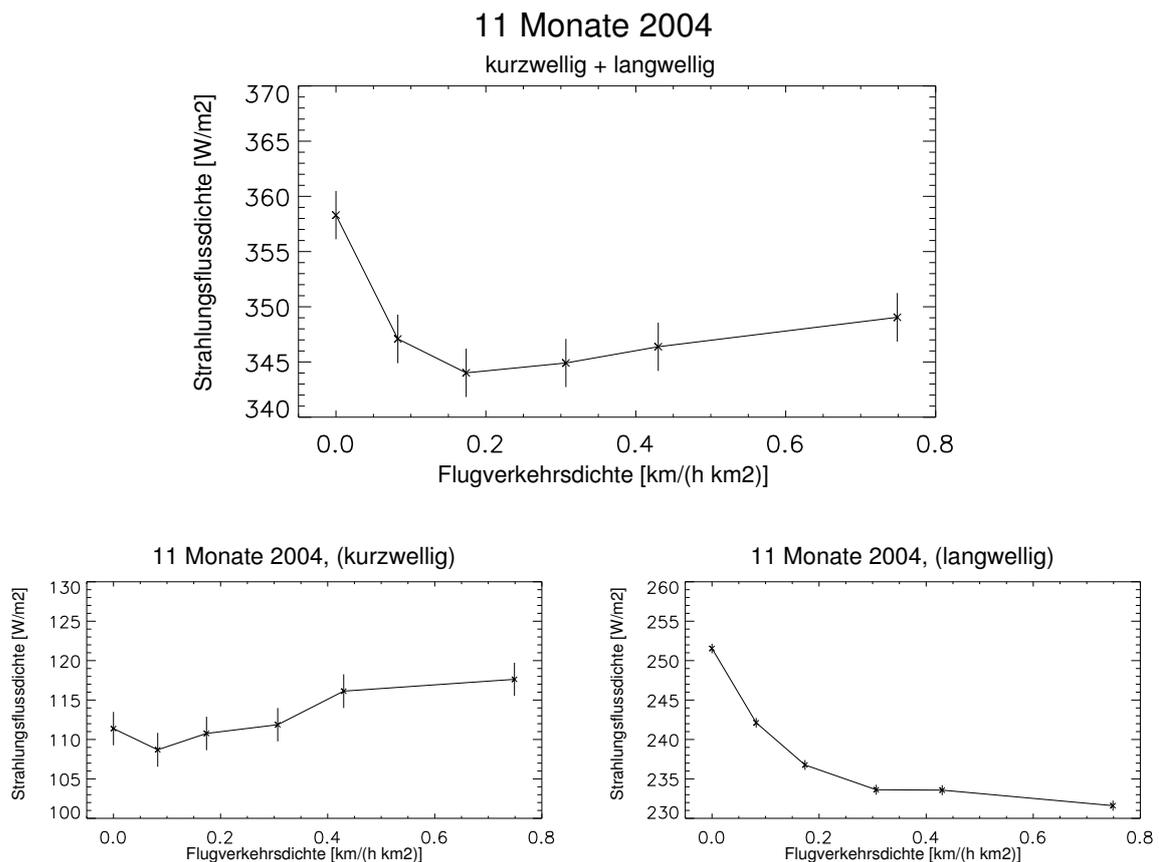
### 5.2.4 Untersuchung der Gesamtregion für 11 Monate des Jahres 2004

Im letzten Schritt wird das gesamte Untersuchungsgebiet (siehe Abb. 5.1) für den gesamten Zeitraum des Jahres 2004 untersucht (335 Tage), um Ergebnisse aus dem größtmöglichen Gebiet für das Daten zur Verfügung stehen zu erhalten. Um die zeitliche Autokorrelation zu reduzieren, werden aus jeden Tag nur vier Zeitpunkte zufällig ausgewählt. Der Flugverkehr wird in sechs Flugverkehrsdichteklassen (siehe Tab. 4.1) unterteilt. Pro Zeitpunkt werden aus jeder Klasse 200 Bildelemente zufällig ausgewählt. Dies ist konsistent mit der Untersuchung des Einflusses des Flugverkehrs auf die Zirrusbedeckung. Um den Einfluss einer möglichen Scheinkorrelation zwischen Land und Wasser zu untersuchen, wird zusätzliche eine Trennung nach Land und Wasser durchgeführt und untersucht. Desweiteren wird, um den kurzwelligen und langwelligen Anteil getrennt zu quantifizieren, der kurzwellige und langwellige Anteil getrennt untersucht. Für die Untersuchung der Korrelation zwischen Strahlungsflussdichten und der Flugverkehrsdichteklassen werden aus den Klassen 20000 Bildelemente zufällig mit Zurücklegen ausgewählt. Es werden die Ergebnisse aufgelistet und kurz beschrieben. Anschließend werden sie in Abschnitt 5.3 ausführlich diskutiert.

#### 5.2.4.1 Untersuchung des Gesamtgebiets

Als erstes werden die Ergebnisse der Untersuchung des Gesamtgebiets vorgestellt.

#### Ausgehende Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte



**Abbildung 5.6: Oben:** Ausgehende Strahlungsflussdichte (kurzwellig + langwellig) am Oberrand der Atmosphäre in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für 2004 für die Bildelemente aus dem Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O$ ,  $20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet. **Unten links:** Kurzwellige ausgehende Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte. **Unten rechts:** Langwellige ausgehende Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte.

Wie die Abb. 5.6, **unten links** zeigt nimmt für das gesamte Gebiet die kurzwellige Strahlungsflussdichte mit der Zunahme der Flugverkehrsdichte zu. Der langwellige Anteil nimmt ab (Abb. 5.6,

**unten rechts**). In Abb. 5.6 **oben** ist die gesamte (kurzwellig + langwellig) ausgehende Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit der Flugverkehrsdichte dargestellt. Die ausgehende gesamte Strahlungsflussdichte nimmt mit der Zunahme der Flugverkehrsdichte ab (Abb. 5.6 oben). Der langwellige, wärmende Einfluss überwiegt. D.h. der Flugverkehr wirkt erwärmend. Der Trend ist jedoch nicht eindeutig. Für höhere Flugverkehrsdichten steigt die ausgehende Strahlungsflussdichte in geringem Maße wieder an. In Abschnitt 5.3 wird dieser Effekt ausführlich diskutiert.

Der Vergleich der mittleren ausgehenden Strahlungsflussdichte der Gebiete ohne Flugverkehr mit dem Gesamtgebiet (siehe Tabelle 5.4) ergibt eine positive Differenz von  $1.07 \pm 0.86 \frac{W}{m^2}$ . D.h. der erwärmende Anteil überwiegt. In den Tabellen 5.5 und 5.6 sind die Einzelergebnisse der Untersuchung des Gesamtgebietes nur für den langwelligen bzw. nur für den kurzwelligen Anteil gelistet dargestellt. Anschließend werden die Ergebnisse für die Land bzw. Wasser gezeigt. Eine ausführliche Diskussion folgt in Abschnitt 5.3.

### Statistiken gesamte (kurzwellig + langwellig) ausgehende Strahlungsflussdichte

Tabelle 5.4: Statistiken der gesamten (kurzwellig + langwellig) ausgehenden Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^\circ W - 50^\circ O, 20^\circ N - 75^\circ N$ ), 2004

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	$345.98 \frac{W}{m^2}$	$153.40 \frac{W}{m^2}$	$0.61 \frac{W}{m^2}$
Bildelemente ohne Flugverkehr	$356.61 \frac{W}{m^2}$	$154.22 \frac{W}{m^2}$	$0.61 \frac{W}{m^2}$
Bildelemente Gesamt	$355.53 \frac{W}{m^2}$	$154.00 \frac{W}{m^2}$	$0.61 \frac{W}{m^2}$

Unterschied der Mittelwerte =  $-1.07 \frac{W}{m^2}$ . Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

### Statistiken langwellige Strahlungsflussdichte

Tabelle 5.5: Statistiken der ausgehenden langwelligen Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^\circ W - 50^\circ O, 20^\circ N - 75^\circ N$ ), 2004

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	$237.00 \frac{W}{m^2}$	$39.43 \frac{W}{m^2}$	$0.16 \frac{W}{m^2}$
Bildelemente ohne Flugverkehr	$250.94 \frac{W}{m^2}$	$43.01 \frac{W}{m^2}$	$0.17 \frac{W}{m^2}$
Bildelemente Gesamt	$249.56 \frac{W}{m^2}$	$42.75 \frac{W}{m^2}$	$0.17 \frac{W}{m^2}$

Unterschied der Mittelwerte =  $-1.38 \frac{W}{m^2}$ . Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

### Statistiken kurzwellige Strahlungsflussdichte

Tabelle 5.6: Statistiken der ausgehenden kurzwelligen Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^\circ W - 50^\circ O, 20^\circ N - 75^\circ N$ ), 2004

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	$112.83 \frac{W}{m^2}$	$154.93 \frac{W}{m^2}$	$0.61 \frac{W}{m^2}$
Bildelemente ohne Flugverkehr	$110.93 \frac{W}{m^2}$	$149.63 \frac{W}{m^2}$	$0.59 \frac{W}{m^2}$
Bildelemente Gesamt	$111.08 \frac{W}{m^2}$	$150.11 \frac{W}{m^2}$	$0.59 \frac{W}{m^2}$

Unterschied der Mittelwerte =  $+0.15 \frac{W}{m^2}$ . Die Mittelwerte unterscheiden sich **nicht signifikant**.

### 5.2.4.2 Untersuchung der Bildelemente nur über Land

In diesem Abschnitt werden für das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O$ ,  $20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ) die Bildelemente über Land untersucht. In Tabelle 5.7 sind die Mittelwerte der ausgehenden Strahlungsflussdichten der Bildelemente mit Flugverkehr, ohne Flugverkehr und der Mittelwert der ausgehenden Strahlungsflussdichten über alle Bildelemente über Land dargestellt. In Tabelle 5.8 werden die Statistiken für den langwelligen Anteil bzw. in Tabelle 5.9 für den kurzwelligen Anteil gelistet.

#### Statistiken gesamte (kurzwellig + langwellig) ausgehende Strahlungsflussdichte

Tabelle 5.7: Statistiken der gesamten (kurzwellig + langwellig) ausgehenden Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O$ ,  $20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ), 2004 (nur Land).

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	354.29 $W/m^2$	164.16 $W/m^2$	0.65 $W/m^2$
Bildelemente ohne Flugverkehr	381.10 $W/m^2$	175.21 $W/m^2$	0.69 $W/m^2$
Bildelemente Gesamt	377.62 $W/m^2$	173.76 $W/m^2$	0.69 $W/m^2$

Unterschied der Mittelwerte =  $-3.49 \frac{W}{m^2}$ . Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

#### Statistiken langwellige Strahlungsflussdichte

Tabelle 5.8: Statistiken der ausgehenden langwelligen Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O$ ,  $20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ), 2004 (nur Land).

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	234.68 $W/m^2$	40.05 $W/m^2$	0.16 $W/m^2$
Bildelemente ohne Flugverkehr	255.74 $W/m^2$	46.43 $W/m^2$	0.18 $W/m^2$
Bildelemente Gesamt	252.91 $W/m^2$	45.95 $W/m^2$	0.18 $W/m^2$

Unterschied der Mittelwerte =  $-2.83 \frac{W}{m^2}$ . Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

#### Statistiken kurzwellige Strahlungsflussdichte

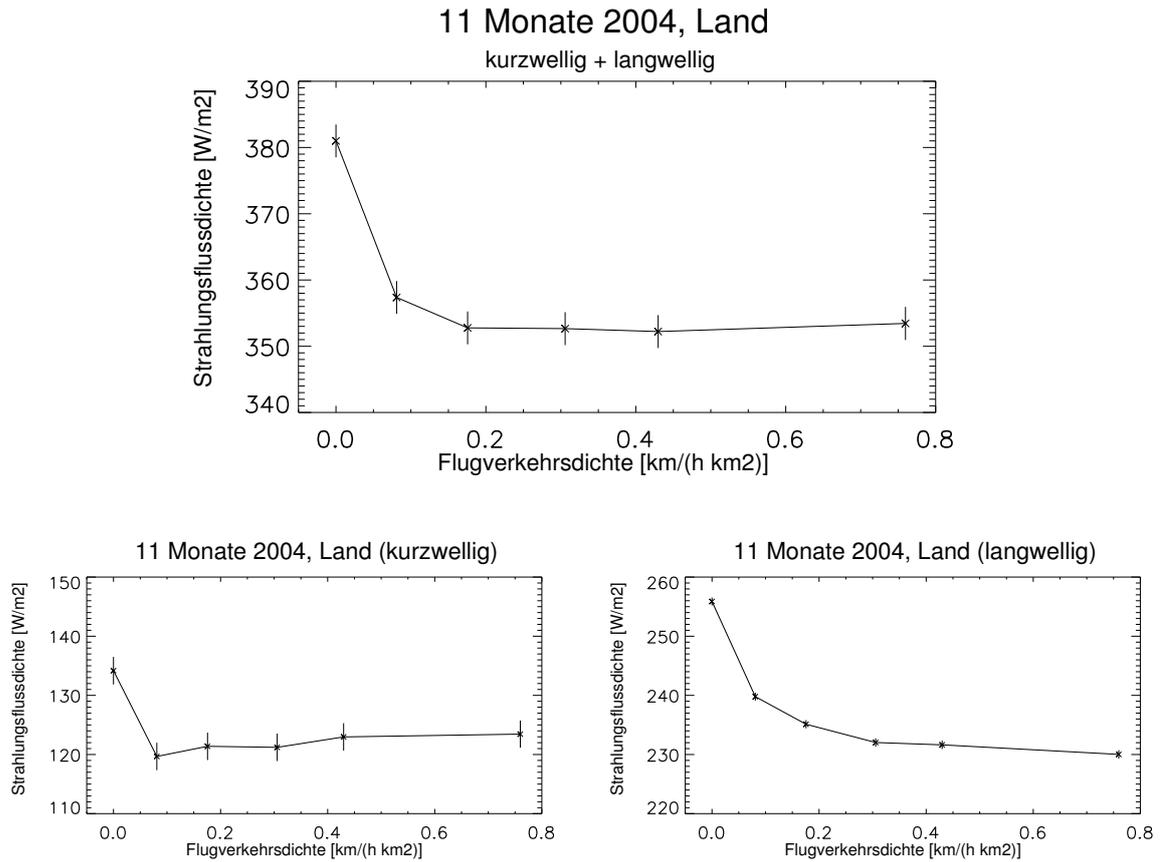
Tabelle 5.9: Statistiken der ausgehenden kurzwelligen Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O$ ,  $20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ), 2004 (nur Land).

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	121.48 $W/m^2$	160.51 $W/m^2$	0.64 $W/m^2$
Bildelemente ohne Flugverkehr	132.11 $W/m^2$	163.64 $W/m^2$	0.65 $W/m^2$
Bildelemente Gesamt	130.76 $W/m^2$	163.40 $W/m^2$	0.65 $W/m^2$

Unterschied der Mittelwerte =  $-1.36 \frac{W}{m^2}$ . Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

Der Mittelwert der kurzwelligen ausgehenden Strahlungsflussdichten für die Bildelemente ohne Flugverkehr (über Land) ist höher als der Mittelwert der ausgehenden kurzwelligen Strahlungsflussdichten aus dem gesamten Gebiet (über Land). Dies ist überraschend, da auch über Land ein kühlender Effekt für den kurzwelligen Anteil zu erwarten wäre. Aus den Gebieten Nordafrikas werden jedoch mehr Bildelemente gezogen als aus der Europa-Region. Die Strahlungsflussdichte über Nordafrika ist damit stärker gewichtet. Die eingestrahelte Leistung über Nordafrika ist höher als über Europa. Damit ist die ausgehende kurzwellige Strahlungsflussdichte über Nordafrika höher als über dem Gesamtgebiet (über Land). Die abschattende Wirkung des Flugverkehrs wird über Land unterschätzt. Damit wird insgesamt die erwärmende Wirkung des Flugverkehrs über Land überschätzt. In Abschnitt 5.3 wird dies ausführlich diskutiert.

## Ausgehende Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte über Land



**Abbildung 5.7: Oben:** Ausgehende Strahlungsflussdichte (kurzwellig + langwellig) am Oberrand der Atmosphäre in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für 2004 für die Bildelemente über Land aus dem Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet. **Unten links:** Kurzwellige ausgehende Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte. **Unten rechts:** Langwellige ausgehende Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte.

In Abb. 5.7 ist die Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit von den Flugverkehrsdichteklassen dargestellt. Der kurzwellige Anteil der Strahlungsflussdichte (Abb. 5.7, unten links) nimmt dabei insgesamt ab. Allerdings ist für die Klasse ohne Flugverkehr der ausgehende kurzwellige Fluss überschätzt, da in diese Klasse die Strahlungsflussdichte aus dem gesamten Gebiet eingeht, während in den Klassen mit Flugverkehr die Bildelemente über Europa stärker gewichtet vertreten sind. Betrachtet man die Flugverkehrsdichteklassen eins bis fünf, steigt die ausgehende Strahlungsflussdichte mit zunehmender Flugverkehrsdichte an. Die langwellige ausgehende Strahlungsflussdichte sinkt mit zunehmender Flugverkehrsdichte. In Summe sinkt die ausgehende Strahlungsflussdichte. D.h. der Flugverkehr in dem betrachteten Gebiet wärmt über Land.

### 5.2.4.3 Untersuchung der Bildelemente nur über Wasser

In diesem Abschnitt werden für das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O$ ,  $20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ) die Bildelemente über Wasser untersucht. In Tabelle 5.10 sind die Mittelwerte der ausgehenden Strahlungsflussdichten der Bildelemente mit Flugverkehr, ohne Flugverkehr und der Mittelwert der ausgehenden Strahlungsflussdichten über alle Bildelemente über Wasser dargestellt. In Tabelle 5.11 werden die Statistiken für den langwelligen Anteil bzw. in Tabelle 5.12 für den kurzwelligen Anteil gelistet.

#### Statistiken gesamte (kurzwellig + langwellig) ausgehende Strahlungsflussdichte

Tabelle 5.10: Statistiken der gesamten (kurzwellig + langwellig) ausgehenden Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O$ ,  $20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ), 2004 (nur Wasser).

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	334.48 $W/m^2$	136.91 $W/m^2$	0.54 $W/m^2$
Bildelemente ohne Flugverkehr	337.45 $W/m^2$	131.55 $W/m^2$	0.52 $W/m^2$
Bildelemente Gesamt	337.44 $W/m^2$	132.22 $W/m^2$	0.52 $W/m^2$

Unterschied der Mittelwerte =  $-0.01 \frac{W}{m^2}$ . Die Mittelwerte unterscheiden sich **nicht signifikant**.

#### Statistiken langwellige Strahlungsflussdichte

Tabelle 5.11: Statistiken der langwelligen ausgehenden Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O$ ,  $20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ), 2004 (nur Wasser).

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	240.23 $W/m^2$	38.47 $W/m^2$	0.16 $W/m^2$
Bildelemente ohne Flugverkehr	247.30 $W/m^2$	39.69 $W/m^2$	0.16 $W/m^2$
Bildelemente Gesamt	246.76 $W/m^2$	39.70 $W/m^2$	0.16 $W/m^2$

Unterschied der Mittelwerte =  $-0.53 \frac{W}{m^2}$ . Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

#### Statistiken kurzwellige Strahlungsflussdichte

Tabelle 5.12: Statistiken der kurzwelligen ausgehenden Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O$ ,  $20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ), 2004 (nur Wasser).

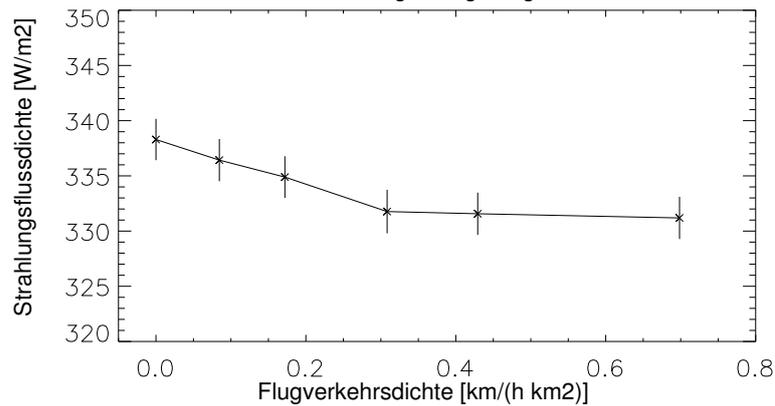
Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	99.67 $W/m^2$	142.66 $W/m^2$	0.56 $W/m^2$
Bildelemente ohne Flugverkehr	94.61 $W/m^2$	135.79 $W/m^2$	0.54 $W/m^2$
Bildelemente Gesamt	94.45 $W/m^2$	135.81 $W/m^2$	0.53 $W/m^2$

Unterschied der Mittelwerte =  $+0.14 \frac{W}{m^2}$ . Die Mittelwerte unterscheiden sich **nicht signifikant**.

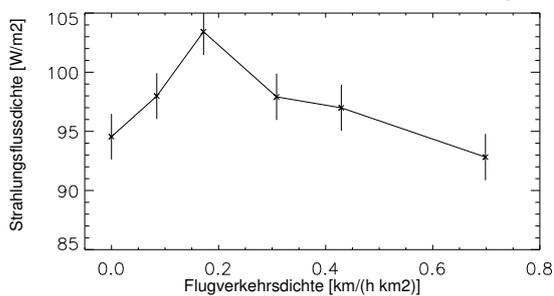
## Ausgehende Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte über Wasser

11 Monate 2004, Wasser

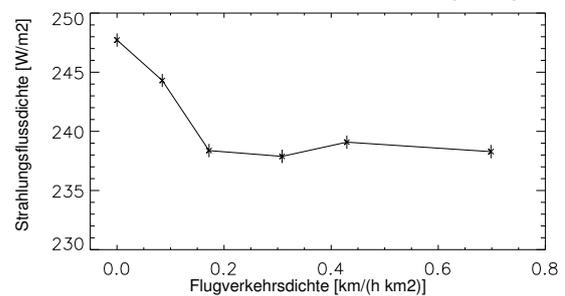
kurzwellig + langwellig



11 Monate 2004, Wasser (kurzwellig)



11 Monate 2004, Wasser (langwellig)



**Abbildung 5.8: Oben:** Ausgehende Strahlungsflussdichte (kurzwellig + langwellig) am Oberrand der Atmosphäre in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für 2004 für die Bildelemente über Wasser aus dem Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet. **Unten links:** Kurzwellige ausgehende Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte. **Unten rechts:** Langwellige ausgehende Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte.

Betrachtet man die Abhängigkeit der ausgehenden Strahlungsflussdichte von den Flugverkehrsdichteklassen, zeigt sich eine Verringerung des Flusses mit der Zunahme des Flugverkehrs (Abb. 5.8, oben). Dabei zeigt der kurzwellige Anteil (Abb. 5.8, unten links) keinen eindeutigen Zusammenhang, da große Gebiete der Europa-Nordamerika-Route einen hohen Bedeckungsgrad niedriger Wolken aufweisen. Dadurch wird der abschattende Effekt der flugverkehrsinduzierten Zirren verringert, der über Wasser ohne niedrige Wolken am Tag sehr hoch ist. Hinzu kommt, dass sehr viel Flugverkehr über dem Nord-Atlantik in der Nacht stattfindet. Der langwellige Anteil (Abb. 5.8, unten rechts) zeigt einen deutlichen abnehmenden Zusammenhang mit der Zunahme der Flugverkehrsdichte. Insgesamt wirkt der Flugverkehr auch über Wasser erwärmend. Vergleicht man die Mittelwerte der ausgehenden Strahlungsflussdichte ohne Flugverkehr und die Mittelwerte der Bildelemente aus dem gesamten Gebiet (über Wasser) lässt sich jedoch sowohl für den kurzwelligen als auch für den langwelligen Anteil kein signifikanter Unterschied nachweisen.

### 5.3 Zusammenfassung Strahlungsantrieb des Flugverkehrs

Im Rahmen dieser Arbeit wurde erstmals der direkte Einfluss des Flugverkehrs auf die ausgehenden kurzwelligen und langwelligen Strahlungsflussdichten untersucht. Es wurde für einen Zeitraum von elf Monaten das Gebiet über Europa, Nordatlantik und Nordafrika analysiert. Aus der Änderung der ausgehenden Strahlungsflussdichten für Gebiete ohne Flugverkehr im Vergleich zum Gesamtgebiet wurde mit Hilfe statistischer Methoden der Strahlungsantrieb des Flugverkehrs abgeschätzt. Es ist jedoch prinzipiell unmöglich, den Strahlungsantrieb ohne den Einfluss des Flugverkehrs genau dort (und zu dem Zeitpunkt) zu messen, wo der Flugverkehr stattfindet. Zusätzlich hängt die Wirkung des Flugverkehrs auf den Strahlungshaushalt von vielen Parametern ab. Aus diesem Grund wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt die es ermöglicht haben, einige der Einflussfaktoren auszuschließen.

Um die unterschiedliche Wirkung des Flugverkehrs zu verschiedenen Jahreszeiten zu veranschaulichen, wurden die Untersuchungen für die Monate Februar, Mai, Juli und Oktober 2004 in Abschnitt 5.2.1 gezeigt. Die Untersuchungen wurden für die Europa-Nordafrika-Region  $15^{\circ}W - 20^{\circ}O$ ,  $30^{\circ}N - 60^{\circ}N$  durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen für die Monate Februar und Oktober 2004 eine Verringerung der Strahlungsflussdichte abhängig von der Flugverkehrsdichte. Für die Monate Mai und Juli 2004 zeigt sich ein Anstieg, damit kühlt der Flugverkehr in diesen Monaten aufgrund des überwiegend abschattenden Effektes der zusätzlichen Zirruswolken und Kondensstreifen. In Monaten mit einer geringeren Sonneneinstrahlung überwiegt der langwellige Anteil. Der Flugverkehr wirkt in diesen Monaten erwärmend.

Es konnte gezeigt werden, dass der Einfluss des Flugverkehrs auf die Strahlungsbilanz sehr stark für verschiedene Tageszeitpunkte variiert. Der Einfluss auf die ausgehende Strahlungsflussdichte wurde in Abschnitt 5.2.3 für verschiedene Zeitpunkte für die Gesamtregion untersucht. Für die Zeitpunkte 9:00 UTC und 12:00 UTC zeigt sich eine Zunahme der ausgehenden Strahlungsflussdichte abhängig von den Flugverkehrsdichten und damit ein kühlender Effekt des Flugverkehrs. Die Zeitpunkte 6:00 UTC und 15:00 UTC zeigen keine eindeutige Abhängigkeit. Zu diesen Zeitpunkten kompensieren sich die erwärmenden und kühlenden Anteile. Für die übrigen Zeitpunkte zwischen 18:00 UTC bis 3:00 UTC überwiegt der erwärmende Anteil. Am Abend um 18:00 UTC ist die erwärmende Wirkung der Zirren auf den Strahlungshaushalt am höchsten, da der Temperaturgradient zwischen Erdboden und Zirren zu diesem Zeitpunkt sehr hoch ist. Der langwellige Anteil ist zu diesem Zeitpunkt sehr viel größer als die abschattende Wirkung, die in der Nacht wegfällt. Insgesamt überwiegen die Zeitpunkte, in denen der Flugverkehr erwärmend wirkt. Bedenkt man, dass die Zirren, die zwischen 15:00 und 18:00 UTC entstanden sind, zum Teil in die Nacht hinein weiterbestehen, ist die Erwärmung durch den Flugverkehr noch höher.

Die Untersuchung der Teilregion  $15^{\circ}W - 20^{\circ}O$ ,  $30^{\circ}N - 60^{\circ}N$  (Europa und Nordafrika) für 11 Monate<sup>2</sup> des Jahres 2004 zeigt im Mittel eine Verringerung der ausgehenden Strahlungsflussdichte um  $2.08 \frac{W}{m^2}$ , d.h. eine Erwärmung der Atmosphäre durch den Flugverkehr für diese Region. Betrachtet man jedoch diese Region ohne Nordafrika ( $15^{\circ}W - 20^{\circ}O$ ,  $35^{\circ}N - 60^{\circ}N$ ), ergibt sich eine Erhöhung der ausgehenden Strahlungsflussdichte um  $1.56 \frac{W}{m^2}$  und damit eine Abkühlung. Dies muss nicht für das gesamte Jahr gelten, da im Januar 2004 der Flugverkehr wahrscheinlich erwärmend wirkt. Die Untersuchung der Nordafrika Region  $15^{\circ}W - 20^{\circ}O$ ,  $30^{\circ}N - 35^{\circ}N$  allein zeigt für dieses Gebiet eine erwärmende Wirkung des Flugverkehrs von  $1.3 \frac{W}{m^2}$ .

Das Beispiel zeigt die starke regionale Abhängigkeit der Wirkung des Flugverkehrs auf die Strahlungsbilanz der Atmosphäre. So ist die erwärmende Wirkung über Wüsten sehr hoch. Große Gebiete Nordafrikas haben eine sehr hohe Albedo, so dass eine zusätzliche Wolke diese nur wenig erhöht. Auf der anderen Seite sind Wüsten bei Tag sehr warm und haben einen großen Temperaturgradienten zu kalten Eiswolken. Lässt man dieses Gebiet weg und betrachtet nur die Europa Region, überwiegt der kühlende Einfluss des Flugverkehrs, da der Flugverkehr über Europa hauptsächlich bei Tag stattfindet.

<sup>2</sup>Für das gesamte Jahr 2004 war die Untersuchung nicht möglich, da MSG erst seit Ende Januar 2004 operationell arbeitet.

Die Untersuchung zeigt auch den großen systematischen Fehler der statistischen Untersuchung, die den starken Nord-Süd-Gradienten der ausgehenden Strahlungsflussdichten nicht berücksichtigt. Vor allem der Nord-Süd-Gradient der langwelligen Komponente kann zu einer Überschätzung der Strahlungsflussdichten für die flugverkehrsfreien Gebiete führen. Die erwärmende Wirkung des Flugverkehrs kann damit überschätzt werden. Auf der anderen Seite berücksichtigt die Untersuchung nicht die flugverkehrsinduzierten Zirren, die über mehrere Stunden leben. Diese können am Nachmittag entstehen und bis in die Nacht weiterleben. In der Nacht wirkt der Flugverkehr erwärmend. Dies kann zu einer Unterschätzung der erwärmenden Wirkung des Flugverkehrs führen. Damit ist die Unsicherheit des berechneten Strahlungsantriebs sehr hoch, wenn der Strahlungsantrieb aus der Differenz der Strahlungsflussdichten der flugverkehrsfreien Gebiete und der gesamten mittleren Strahlungsflussdichte der jeweiligen Region berechnet wird.

Betrachtet man die Abhängigkeit der ausgehenden Strahlungsflussdichten von den Flugverkehrsdichteklassen in der Europa-Nordafrika-Region (Abb. 5.3), sieht man, dass der Mittelwert der Strahlungsflussdichte der Klasse ohne Flugverkehr wahrscheinlich überschätzt wird. In die anderen Flugverkehrsdichteklassen mit Flugverkehr gehen mehr Bildelemente über Europa ein. Die Regionen über Europa sind im Mittel kälter als die nordafrikanischen Gebiete und auch die kurzwelligen ausgehenden Strahlungsflussdichten sind (über Land) geringer. Um die natürliche Strahlungsflussdichte in den Regionen mit Flugverkehr abzuschätzen, könnte man die Kurve der Flugverkehrsdichteklassen ab der Klasse 2 (Tab. 4.1) auf Null extrapolieren. Dies ist allerdings schwierig, da die Kurve für diese Region keinen eindeutigen Trend zeigt.

Die Untersuchungen des gesamten Gebietes in Abschnitt 5.2.4 zeigen in Abb. 5.6 ein deutlicheres Verhalten. Die ausgehende Strahlungsflussdichte sinkt mit zunehmender Flugverkehrsdichte auf ein Minimum und steigt dann für höhere Flugverkehrsdichten wieder an. Die Hypothese für ein solches Verhalten ist, dass der Flugverkehr nicht nur zu einer Erhöhung der Bewölkung beiträgt, sondern zusätzlich die optischen Eigenschaften von Zirruswolken verändert. In den Gebieten mit sehr hohen Flugverkehrsdichten und hohen Zirrusbedeckungen können die Zirren, durch immer wieder neu induzierten Kondensstreifen, kleinere Effektivradien und eine höhere optische Dicke haben. Bei Tag kann damit der abschattende Effekt vergrößert werden. [MEERKÖTTER et al. 1999] zeigten auf der Basis von theoretischen Untersuchungen einen Anstieg des Strahlungsantriebs abhängig von der optischen Dicke der Zirren, der ein Maximum annimmt und sich ab einer bestimmten optischen Dicke wieder verringert. Abb. 5.6 zeigt ein ähnliches Verhalten, wenn man annimmt, dass die optische Dicke der Zirren für höhere Flugverkehrsdichten zunimmt.

Aufgrund der großen Unterschiede der Albedo wurden die Gebiete über Land und über Wasser getrennt untersucht. Dabei zeigt sich über Wasser keine eindeutige Abhängigkeit der kurzwelligen Strahlungsflussdichte von der Flugverkehrsdichte (Abb. 5.8, unten links). Etwa die Hälfte des Flugverkehrs zwischen Europa und Nordamerika findet in der Nacht statt. In Summe überwiegt über Wasser der erwärmende Anteil. Man sieht eine Verringerung der ausgehenden (langwelligen + kurzwelligen) Strahlungsflussdichte (Abb. 5.8, oben). Die Mittelwerte unterscheiden sich jedoch nicht signifikant.

Über Land ergibt sich für die Gesamtregion eine höhere Erwärmung. Allerdings wird der Wert überschätzt. Der Grund liegt zum einen in einer Scheinkorrelation der ausgehenden langwelligen Strahlungsflussdichte mit dem Flugverkehr über Land. Aber auch für die kurzwelligen Strahlungsflussdichten ist die Scheinkorrelation über Land besonders deutlich. Große Teile Nordafrikas haben eine hohe Albedo und die eingestrahlte Leistung ist sehr hoch. Die Flugverkehrsdichte ist jedoch sehr viel geringer als über Europa. Aus diesem Grund wird die ausgehende Strahlungsflussdichte der Bildelemente über Nordafrika in der Klasse ohne Flugverkehr Übergewichtet. Es ergibt sich ein höherer Mittelwert über den Gebieten ohne Flugverkehr als der Mittelwert der ausgehenden kurzwelligen Strahlungsflussdichten über alle Bildelemente. Dies könnte man als eine Erwärmung durch den Flugverkehr auch im kurzwelligen Spektralbereich interpretieren, was physikalisch nicht sinnvoll ist.

Betrachtet man die Gesamtregion ohne Trennung zwischen Land und Wasser, werden aufgrund des größeren Gebietes die Bildelemente über Nordafrika weniger gewichtet, so dass die Ergebnisse sowohl im langwelligen als auch im kurzwelligen zuverlässiger sind. Zusätzlich ist die Breitenabhängig-

keit der kurzwelligen ausgehenden Strahlungsflussdichte weniger ausgeprägt. Dies gilt nicht für den langwelligen Anteil, der auch für das Gesamtgebiet eine Breitenabhängigkeit aufweist, so dass in Summe die abgeschätzte Erwärmung in diesem Gebiet von  $1.07 \pm 0.86 \frac{W}{m^2}$  ebenfalls zu hoch sein könnte.

Die untersuchte Region (Satellitenzenitwinkel  $< 75^\circ$ ) umfasst ca. 8% der Erdoberfläche. Der Anteil des Flugverkehrs am gesamten Flugverkehr der Erde beträgt im Jahr 2004 ca. 30%. Damit ergibt sich bei einer linearen Extrapolation des berechneten Wertes global eine Erwärmung des System Erde/Atmosphäre von ca.  $0.29 \pm 0.23 \frac{W}{m^2}$ .

Eine solche lineare Extrapolation auf einen globalen Wert berücksichtigt jedoch nicht, wie schon beim Bedeckungsgrad, dass aufgrund von klimatischen Bedingungen der Flugverkehr in anderen Regionen der Erde völlig anders auf den Bedeckungsgrad wirken kann. Insbesondere wird nicht berücksichtigt, dass der gleiche zusätzliche Bedeckungsgrad, je nach Albedo und Zeitpunkt, zu dem der Flugverkehr stattfindet, sowohl erwärmend als auch kühlend wirken kann. D.h. die Unsicherheit bei einer Skalierung auf einen globalen Wert ist noch größer als beim globalen Bedeckungsgrad. Hinzu kommt, dass schon der berechnete Strahlungsantrieb  $1.07 \frac{W}{m^2}$  für die Gesamtregion wahrscheinlich überschätzt wurde. Auf der anderen Seite wurde die Lebensdauer der flugverkehrsinduzierten Zirren nicht berücksichtigt. Über Gebieten mit einer sehr hohen Flugverkehrsdichte würde eine Berücksichtigung der Lebensdauer den Wert der Strahlungsflussdichte ohne Flugverkehr wahrscheinlich verringern, d.h. der Strahlungsantrieb wäre noch größer.

Vergleicht man den Wert des Strahlungsantriebs mit dem zusätzlichen Bedeckungsgrad von 0.62% in diesem Gebiet ergibt sich ein Strahlungsantrieb von  $1.7 \frac{W}{m^2}$  pro 1% zusätzlichen Bedeckungsgrad. Dieser Wert ist mehr als acht mal größer als der von [BOUCHER 1999] angenommene Wert von  $0.2 \frac{W}{m^2}$  pro 1% Bedeckungsgrad. Bei diesem Vergleich muss jedoch berücksichtigt werden, dass der Flugverkehr nicht nur zu einer Erhöhung des Bedeckungsgrades führt, sondern auch die optischen Eigenschaften von bereits vorhandenen Zirruswolken verändert. D.h. auch in Gebieten mit einem natürlichen Bedeckungsgrad an dünnen Zirren von 100% kann der Flugverkehr zu einer Verringerung der ausgehenden Strahlungsflussdichte führen und damit erwärmend auf das System Erde/Atmosphäre wirken. Bei Tag über Gebieten mit niedriger Albedo würde die Erhöhung der optischen Dicke den abschattenden Effekt vergrößern.

In dem abgeschätzten Strahlungsantrieb ist sowohl der durch eine Erhöhung des Bedeckungsgrades bedingte Strahlungsantrieb des Flugverkehrs enthalten, als auch der Einfluss auf den Strahlungshaushalt durch Veränderungen der optischen Eigenschaften der Zirren. Der zweite Effekt könnte größer sein. Auf der Grundlage der im Rahmen dieser Arbeit vorhandenen Daten, lässt sich der Anteil dieses Effekts nicht quantifizieren. In weiterführenden Arbeiten könnte man die optische Dicke in Abhängigkeit vom Flugverkehr untersuchen. Daraus ließen sich Rückschlüsse auf den Strahlungsantrieb durch Veränderungen der optischen Eigenschaften von Zirren ziehen.

Trotz der sehr großen Unsicherheit des geschätzten Strahlungsantriebs, die bedingt durch die verwendete Methode in der Größenordnung des berechneten Wertes liegt, zeigt diese Studie den großen Einfluss des Flugverkehrs auf den Strahlungshaushalt. Vor allem zeigt sie die große Tageszeitabhängigkeit der Wirkung des Flugverkehrs auf die Strahlungsbilanz. Auch die Jahreszeit spielte eine sehr große Rolle. Dies sind Faktoren, die, mit dem Ziel den Beitrag des Flugverkehrs zum Treibhauseffekt zu reduzieren, gesteuert werden können.

Sicherlich bedarf es dazu weiterer Untersuchungen. Die Unsicherheit bedingt durch die Lebenszeit von Zirruswolken wurde im Rahmen dieser Arbeit häufig erwähnt. Desweiteren berücksichtigt diese Studie die vertikale Verteilung des Flugverkehrs nicht. [MANNSTEIN et al. 2005] zeigten, dass eine vergleichsweise geringe Änderung der Flughöhe Flugwege durch eisübersättigte Gebiete reduzieren kann. Darüber hinaus beeinflusst der Flugverkehr auf mannigfaltige Art und Weise die Atmosphäre.  $NO_x$ -Emission und Kohlendioxidemission sind wichtige Faktoren, die auch Gegenstand der Forschung sind.



# Kapitel 6

## Schlussfolgerungen und Ausblick

### 6.1 Zusammenfassung

Der Flugverkehr wirkt durch eine Erhöhung des Bedeckungsgrades von Zirren auf den Strahlungshaushalt der Erde. Zusätzlich kann er die optischen Eigenschaften von bereits vorhandenen Zirren verändern und somit die Strahlungsbilanz beeinflussen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde erstmals für das Gebiet Europa, Nordatlantik und Nordafrika und für einen Zeitraum von 11 Monaten der direkte Einfluss des Flugverkehrs auf die Zirrusbewölkung und die ausgehende Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre untersucht.

Aufgrund der hohen zeitlichen Auflösung von SEVIRI, dem Hauptinstrument des geostationären Meteosat Second Generation Satelliten, konnte dabei die zeitliche Variabilität des Flugverkehrs berücksichtigt werden. Eine mögliche Scheinkorrelation durch natürliche Tageszeitabhängigkeit der Zirrusbewölkung bzw. Strahlungsflussdichte und Flugverkehr wurde durch Erweiterung und Verbesserung der statistischen Methode von [MANNSTEIN und SCHUMANN 2005] eliminiert. Es wurden neue Methoden zur Ableitung von Zirrusbewölkungen und Strahlungsflussdichten aus den SEVIRI Messungen entwickelt und implementiert. Für den gesamten Zeitraum des Jahres 2004, für den Daten zur Verfügung standen, wurden Zirrusmasken und die ausgehenden Strahlungsflussdichten berechnet. Die abgeleiteten Produkte wurden mit Daten aus polar umlaufenden Satelliten validiert.

Für das gesamte Untersuchungsgebiet<sup>1</sup> konnte eine deutliche Korrelation zwischen Zirrusbewölkung und Flugverkehrsdichte gezeigt werden. Die Abschätzung des zusätzlichen Bedeckungsgrades beträgt  $0.6 \pm 0.2\%$ . Eine lineare Extrapolation dieser Daten liefert eine globale zusätzliche Bedeckung von  $0.17 \pm 0.06\%$ . Diese Abschätzung des zusätzlichen Bedeckungsgrades ist im Bereich des in *Aviation and the Global Atmosphere, A Special Report of IPCC* [FAHEY et al. 1999] berechneten flugverkehrsinduzierten Bedeckungsgrads von bis zu 0.2%. Der Strahlungsantrieb wurde in [FAHEY et al. 1999] mit einer optischen Dicke von 0.3 mit  $0-40 \frac{mW}{m^2}$  abgeschätzt. Basierend auf diesen Werten lässt sich aus dem globalen Bedeckungsgrad ein flugverkehrsinduzierter Strahlungsantrieb von  $34 \frac{mW}{m^2}$  abschätzen. Diese Abschätzung ist damit in der Größenordnung des durch CO<sub>2</sub>-Emissionen des Flugverkehrs verursachten Strahlungsantriebs ( $\approx 20 \frac{mW}{m^2}$  [SAUSEN et al. 2005]).

Die direkte Untersuchung des Einflusses des Flugverkehrs auf die ausgehenden Strahlungsflussdichten liefert für das Untersuchungsgebiet einen erwärmenden Effekt von  $1.1 \pm 0.9 \frac{W}{m^2}$ . Dieser Wert ist die Differenz der mittleren ausgehenden Strahlungsflussdichten in Gebieten ohne Flugverkehr und dem Gesamtgebiet. Global extrapoliert ergibt sich eine Erwärmung von  $290 \frac{mW}{m^2}$ . Dieser Wert ist jedoch mit einer sehr großen Unsicherheit behaftet. Zum einen kann der gleiche Bedeckungsgrad, je nach Albedo und Tageszeit einen erwärmenden oder kühlenden Effekt verursachen. Bei der Extrapolation auf die gesamte Erde wurde dies jedoch nicht berücksichtigt. Zum anderen lässt sich der Wert  $1.1 \frac{W}{m^2}$  nur

---

<sup>1</sup>80°W – 50°O, 20°N – 75°N

bedingt als der Strahlungsantrieb des Flugverkehrs interpretieren. Er ist aufgrund eines natürlichen Nord-Süd-Gradienten der ausgehenden Strahlungsflussdichten wahrscheinlich überschätzt.

Zusätzlich zu der Untersuchung des gesamten Gebietes und des gesamten Jahres wurden Teilregionen, sowie die Tages- und Jahreszeitabhängigkeit untersucht. Es zeigt sich eine sehr starke Abhängigkeit der Wirkung des Flugverkehrs von der Tageszeit, zu der dieser stattfindet.

Vor allem die Verringerung des Flugverkehrs am Abend und in der Nacht würde die erwärmende Wirkung des Flugverkehrs reduzieren. Auch die Albedo der Regionen, über denen der Flugverkehr stattfindet, und die Temperatur der jeweiligen Region spielen eine erhebliche Rolle. Der Flugverkehr könnte mit dem Ziel, den Treibhauseffekt zu reduzieren, entsprechend gesteuert werden.

## 6.2 Offene Fragen und Ausblick

Weitere Untersuchungen sind notwendig, um den Einfluss des Flugverkehrs auf den Strahlungshaushalt besser quantifizieren zu können. Zum einem muss erwähnt werden, dass die vorgestellte Untersuchung a priori nicht den kausalen Zusammenhang zwischen Luftverkehr und Zirusbewölkung bzw. Strahlungsflussdichten bestimmen kann. Es wurden Korrelationen zwischen dem Zirusbedeckungsgrad bzw. Strahlungsflussdichten und der Flugverkehrsdichte gezeigt. Scheinkorrelationen können das Ergebnis dabei verfälschen. Zum anderen ist es prinzipiell unmöglich, den Strahlungsantrieb ohne den Einfluss des Flugverkehrs genau dort (und zu dem Zeitpunkt) zu messen, wo der Flugverkehr stattfindet.

Hinzu kommt, dass der untersuchte Einfluss des Flugverkehrs, vor allem auf die Strahlungsflussdichte, sehr klein im Vergleich zu der hohen natürlichen Variabilität dieses Wertes ist. Die Strahlungsflussdichte variiert zwischen 100 und  $1300 \frac{W}{m^2}$ . Daher kann er nur aus einer sehr großen Anzahl an Messungen statistisch signifikant bestimmt werden. Die Wirkung des Flugverkehrs hängt von sehr vielen Parametern (Albedo, Sonnenstand, Temperatur etc.) ab. Der Einfluss des Tages- und Jahresganges, der jeweils zu einer Scheinkorrelation führt, konnte in dieser Arbeit eliminiert werden. Um weitere Parameter getrennt zu untersuchen bzw. den Einfluss zu eliminieren, müsste ein größerer Datensatz, der mehrere Jahre umfasst herangezogen werden. Die Anzahl der benötigten Jahre hängt dabei vom jeweiligen Problem ab. Eine hilfreiche Formel zur Bestimmung des benötigten Stichprobenumfang kann aus Gl. 4.6 aus Abschnitt 4.2.2 angenommen werden mit  $n \approx 2(1/d)^2$ ,  $d$  ist die erwartete (normierte) Differenz der Mittelwerte. Je nach Größe des Untersuchungsgebiets und gewünschter Genauigkeit kann damit die Anzahl der Jahre abgeschätzt werden. Zu beachten ist, dass die Formel für eine normalverteilte Gesamtheit gilt.

Desweiteren kann eine verlässliche Wirkung des Flugverkehrs global nur basierend auf einem globalen Datensatz, bzw. auf einem global repräsentativen Datensatz erfolgen. Es ist schwierig, einen globalen Datensatz in der notwendigen räumlichen und zeitlichen Auflösung mit den derzeit verfügbaren Satelliten und Flugverkehrsdaten zu erstellen. Mit Hilfe von MSG-Daten ist es möglich ca. 1/3 der Erde auszuwerten. Mit dem räumlich größeren Datensatz könnte eine bessere globale Abschätzung des Bedeckungsgrades und der Wirkung auf die Strahlungsbilanz berechnet werden. Die entwickelten Methoden zur Bestimmung der Strahlungsflussdichte und Ableitung des Bedeckungsgrades müssen dazu auf das gesamte Gebiet angepasst werden. Der für diese Region entsprechende Flugverkehrsdatsatz ist jedoch momentan nicht verfügbar.

Auch die Langzeitwirkung des Flugverkehrs auf die Atmosphäre stellt eine offene Frage dar. Dies betrifft nicht nur die Berücksichtigung der Lebensdauer von flugverkehrsinduzierten Zirren. Aerosole, die z.B. in atmosphärischen Schichten emittiert wurden, die nicht eisübersättigt sind, können noch nach mehreren Tagen oder Wochen für heterogene Nukleation als Kondensationskeime wirken.

Die Untersuchung der Lebensdauer von flugverkehrsinduzierten Zirren ist eine der wichtigsten offenen Fragen. Flugverkehr kann z.B. durch Zirren, die am Abend entstanden sind, in der Nacht weiterwirken. Wie groß dieser Effekt ist, ist nicht bekannt. Man benötigt zur Abschätzung dieses

Effekts Windvektoren in den relevanten Höhen und eine lokale Lebenswahrscheinlichkeit von Zirren. Ein Ansatz könnte sein, die Flugverkehrsdichte eines bestimmten Gitterpunktes für den nächsten Zeitschritt mit Hilfe der Windvektoren und gewichtet mit einer Lebenswahrscheinlichkeit zu verlagern. Damit würde man einen effektiven Flugverkehrsdichte-Datensatz erzeugen. Zwischen diesem Datensatz und der Zirrusbedeckung könnte man die Zusammenhänge untersuchen. Die Bestimmung einer solchen Lebenswahrscheinlichkeit ist jedoch schwierig. Auch die Validierung solcher Modelle, für die sich der MSG-SEVIRI aufgrund seiner hohen zeitlichen Auflösung eignen würde, ist nicht trivial. Die räumliche Auflösung sollte dabei so hoch wie möglich sein. Man könnte Bilder hochauflösender Instrumente wie MODIS bzw. Instrumente mit noch höherer Auflösung in Kombination mit dem HRV-Kanal nutzen.

Weitere Zirruseigenschaften, wie z.B. optische Dicke könnten im Zusammenhang mit Luftverkehr untersucht werden. Dazu ist es notwendig, schnellere Werkzeuge zur Bestimmung der mikrophysikalischen Eigenschaften der Zirren zu entwickeln. Die abgeleiteten Eigenschaften der Zirren müssen validiert werden. Hierzu bieten in naher Zukunft Produkte aus den Messungen der CALIPSO-Instrumente neue Möglichkeiten. Nach [STEPHENS et al. 2002] ist es geplant, die optische Dicke dünner Zirren aus den Daten des CALIOP Instrumentes abzuleiten. CALIOP ist ein Lidar, ein aktives Fernerkundungsinstrument, und eignet sich sehr gut, um passive Fernerkundungsinstrumente wie SEVIRI zu validieren. Der Start von CALIPSO ist für das Jahr 2006 geplant. In fernerer Zukunft bietet die EarthCARE Mission [ESA 2004] durch die Kombination verschiedener passiver und aktiver Fernerkundungsinstrumente neue Möglichkeiten, um Zirreneigenschaften zu untersuchen und bestehende Verfahren zu validieren.

Der Strahlungsantrieb des Flugverkehrs wurde in dieser Arbeit aus Veränderungen der ausgehenden Strahlungsflussdichten abgeschätzt. Statt basierend auf den Differenzen der Strahlungsflussdichten könnte die Untersuchung basierend auf dem Strahlungsantrieb von Zirren durchgeführt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden auch Methoden zur direkten Bestimmung des Strahlungsantriebs entwickelt und getestet. Diese Methoden könnten weiter verbessert werden. Für die Abschätzung des flugverkehrsinduzierten Strahlungsantriebs wäre eine Validierung des Strahlungsantriebs von Zirren notwendig. Mangels Vergleichsprodukten aus anderen Satellitendaten konnte zum derzeitigen Zeitpunkt keine Validierung durchgeführt werden. In Zukunft könnten solche Daten zur Verfügung stehen.

Die Ableitung der ausgehenden Strahlungsflussdichten sollte ebenfalls weiter verbessert werden. Insbesondere der Einfluss der 3-D Effekte muss dazu näher untersucht werden. Mit Hilfe bereits verwendeter Daten aus polarumlaufenden Satelliten können weitere genauere Vergleiche durchgeführt werden. Mit EarthCARE kommt zukünftig das BBR-Instrument (Broad Band Radiometer) zur Beobachtung der Strahlungsbilanz der Erde hinzu, dass sich ebenfalls zur Validierung eignen würde.

Abschließend soll das zweite wichtige Instrument des MSG-1 und MSG-2, der am 21. Dezember, 2005 erfolgreich gestartet wurde, erwähnt werden: GERB. Die Strahlungsflussdichten können aus GERB-Daten abgeleitet werden. Diese werden in naher Zukunft zur Verfügung stehen. Sie eignen sich zur Validierung der entwickelten Produkte und können für die Untersuchung des Einflusses des Flugverkehrs auf die ausgehende Strahlungsflussdichte direkt herangezogen werden.



# Anhang A

## Anhang Validierung der Zirrusmaske

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Validierung der Zirrusmaske, wie in Kap. 3.4 besprochen dargestellt. Als erstes werden die Vergleiche der Einzelszenen gezeigt, anschließend werden die Vergleiche der Monatsmittelwerte der Zirrusbedeckungen aus SEVIRI Daten mit den aus MODIS abgeleiteten Mittelwerten verglichen.

### A.1 Vergleich mit Einzelszenen

In diesem Abschnitt werden die MeCiDA berechneten Zirrusbedeckungen mit den MODIS-Terra Cirrus Reflectance Flag aus den MOD06\_L2-Produkten verglichen.

#### A.1.1 Februar

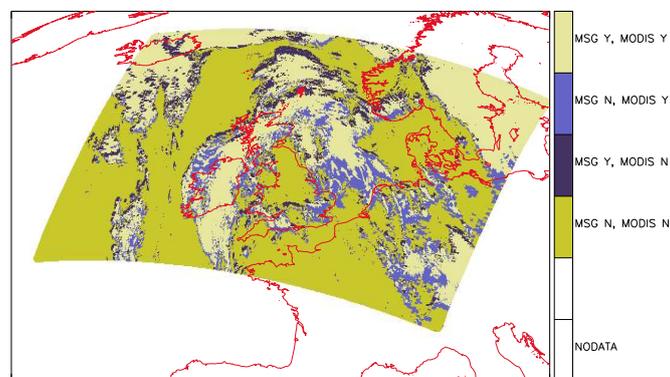


Abbildung A.1: Vergleich der Ergebnisse des SEVIRI MeCiDa-Algorithmus mit MODIS-Terra Cirrus Reflectance Flag aus MOD06\_L2. Datum: 2004/02/12 11:15 UTC

Feb. 2004/02/12 11:15 UTC	MeCiDA Zirrus	MeCiDA kein Zirrus	Gesamt
MODIS Zirrus	52738	21079	73817
MODIS kein Zirrus	14772	96764	111536
Gesamt	67510	117843	185353

81% der Bildelemente sind gleich klassifiziert. 71% der mit MODIS erkannten Zirren werden von MeCiDA detektiert.

### A.1.2 März

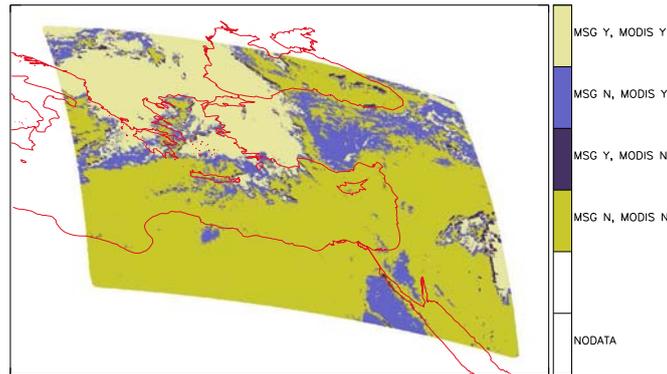


Abbildung A.2: Vergleich der Ergebnisse des SEVIRI MeCiDa-Algorithmus mit MODIS-Terra Cirrus Reflectance Flag aus MOD06\_L2. Datum: 2004/03/09 08:45 UTC

März 2004/03/09 08:45 UTC	MeCiDA Zirrus	MeCiDA kein Zirrus	Gesamt
MODIS Zirrus	61058	40395	101453
MODIS kein Zirrus	6164	169713	175877
Gesamt	67222	210108	277330

83% der Bildelemente sind gleich klassifiziert. 60% der mit MODIS erkannten Zirren werden von MeCiDA detektiert.

### A.1.3 April

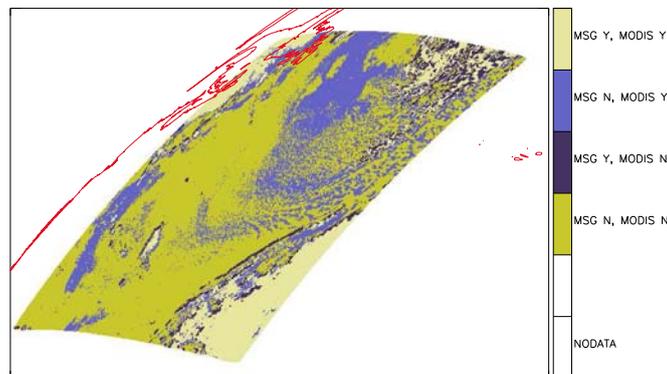


Abbildung A.3: Vergleich der Ergebnisse des SEVIRI MeCiDa-Algorithmus mit MODIS-Terra Cirrus Reflectance Flag aus MOD06\_L2. Datum: 2004/04/22 14:00 UTC

April. 2004/04/22 14:00 UTC	MeCiDA Zirrus	MeCiDA kein Zirrus	Gesamt
MODIS Zirrus	24996	39360	64356
MODIS kein Zirrus	10119	89548	99667
Gesamt	35115	128908	164023

70% der Bildelemente sind gleich klassifiziert. 39% der mit MODIS erkannten Zirren werden von MeCiDA detektiert.

### A.1.4 Mai

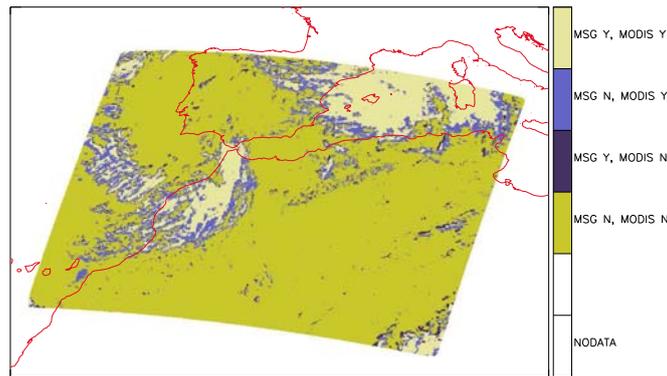


Abbildung A.4: Vergleich der Ergebnisse des SEVIRI MeCiDa-Algorithmus mit MODIS-Terra Cirrus Reflectance Flag aus MOD06\_L2. Datum: 2004/05/31 11:00 UTC

2004/05/31 11:00 UTC	MeCiDA Zirrus	MeCiDA kein Zirrus	Gesamt
MODIS Zirrus	50225	34885	85110
MODIS kein Zirrus	10001	275139	285140
Gesamt	60226	310024	370250

88% der Bildelemente sind gleich klassifiziert. 59% der mit MODIS erkannten Zirren werden von MeCiDA detektiert.

### A.1.5 Juni

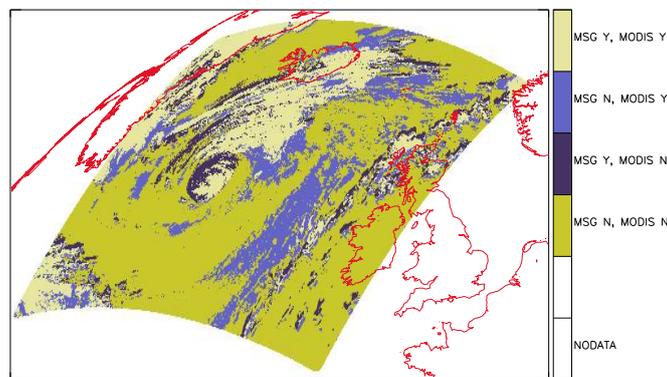


Abbildung A.5: Vergleich der Ergebnisse des SEVIRI MeCiDa-Algorithmus mit MODIS-Terra Cirrus Reflectance Flag aus MOD06\_L2. Datum: 2004/06/05 12:45 UTC

Juni. 2004/06/05 12:45 UTC	MeCiDA Zirrus	MeCiDA kein Zirrus	Gesamt
MODIS Zirrus	25166	25105	50271
MODIS kein Zirrus	11717	81406	93123
Gesamt	36883	106511	143394

74% der Bildelemente sind gleich klassifiziert. 50% der mit MODIS erkannten Zirren werden von MeCiDA detektiert.

### A.1.6 Juli

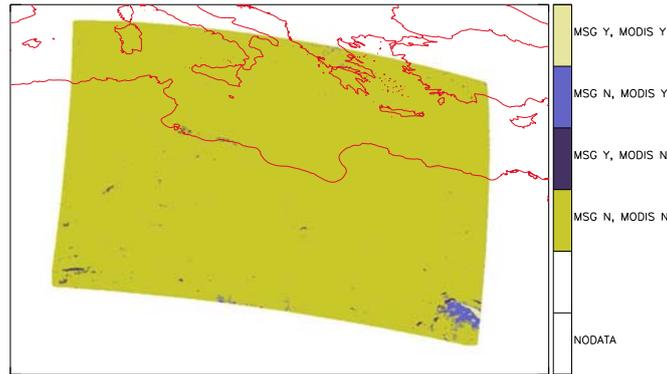


Abbildung A.6: Vergleich der Ergebnisse des SEVIRI MeCiDa-Algorithmus mit MODIS-Terra Cirrus Reflectance Flag aus MOD06\_L2. Datum: 2004/07/23 09:30 UTC

Juli. 2004/07/23 09:30 UTC	MeCiDA Zirrus	MeCiDA kein Zirrus	Gesamt
MODIS Zirrus	406	2062	2468
MODIS kein Zirrus	1120	357771	358891
Gesamt	1526	359833	361359

99% der Bildelemente sind gleich klassifiziert. 16% der mit MODIS erkannten Zirren werden von MeCiDA detektiert.

### A.1.7 August

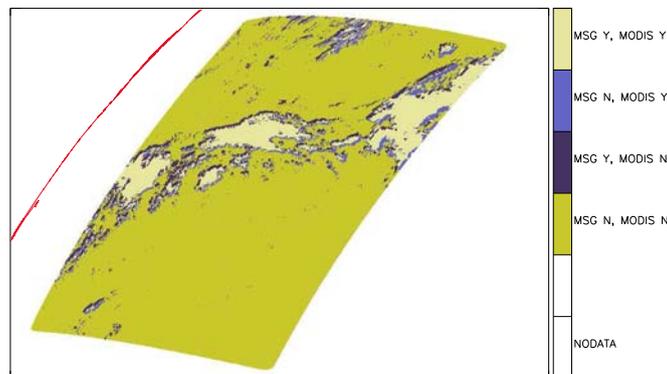


Abbildung A.7: Vergleich der Ergebnisse des SEVIRI MeCiDa-Algorithmus mit MODIS-Terra Cirrus Reflectance Flag aus MOD06\_L2. Datum: 2004/08/14 14:00 UTC

August 2004/08/14 14:00 UTC	MeCiDA Zirrus	MeCiDA kein Zirrus	Gesamt
MODIS Zirrus	18621	7505	26126
MODIS kein Zirrus	10609	164062	174671
Gesamt	29230	171567	200797

91% der Bildelemente sind gleich klassifiziert. 71% der mit MODIS erkannten Zirren werden von MeCiDA detektiert.

### A.1.8 September

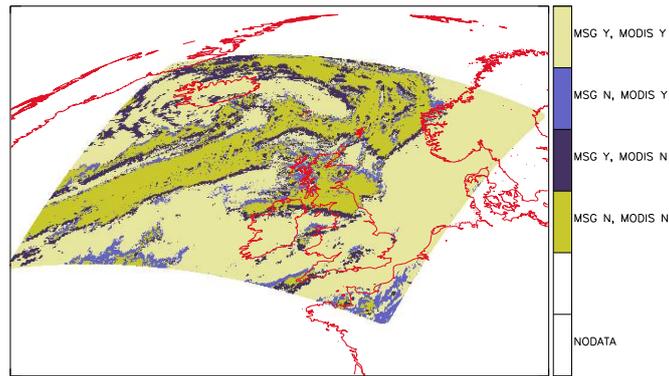


Abbildung A.8: Vergleich der Ergebnisse des SEVIRI MeCiDa-Algorithmus mit MODIS-Terra Cirrus Reflectance Flag aus MOD06\_L2. Datum: 2004/09/17 12:00 UTC

Sep. 2004/09/17 12:00 UTC	MeCiDA Zirrus	MeCiDA kein Zirrus	Gesamt
MODIS Zirrus	89765	12598	102363
MODIS kein Zirrus	19745	38107	57852
Gesamt	109510	50705	160215

80% der Bildelemente sind gleich klassifiziert. 88% der mit MODIS erkannten Zirren werden von MeCiDA detektiert.

### A.1.9 Oktober

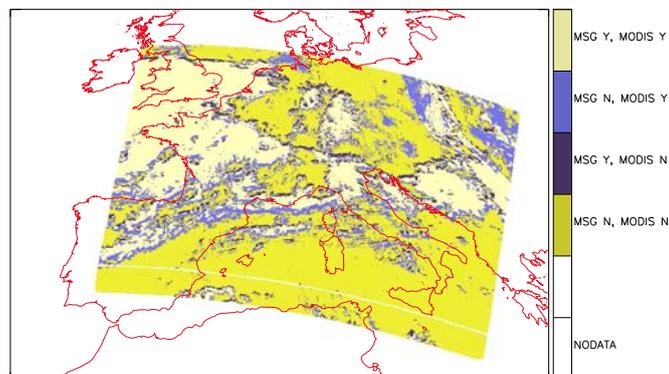


Abbildung A.9: Vergleich der Ergebnisse des SEVIRI MeCiDa-Algorithmus mit MODIS-Terra Cirrus Reflectance Flag aus MOD06\_L2. Datum: 2004/10/03 10:15 UTC

Okt. 2004/10/03 10:15 UTC	MeCiDA Zirrus	MeCiDA kein Zirrus	Gesamt
MODIS Zirrus	75401	35648	111049
MODIS kein Zirrus	19286	143746	163032
Gesamt	94687	179394	274081

80% der Bildelemente sind gleich klassifiziert. 68% der mit MODIS erkannten Zirren werden von MeCiDA detektiert.

### A.1.10 November

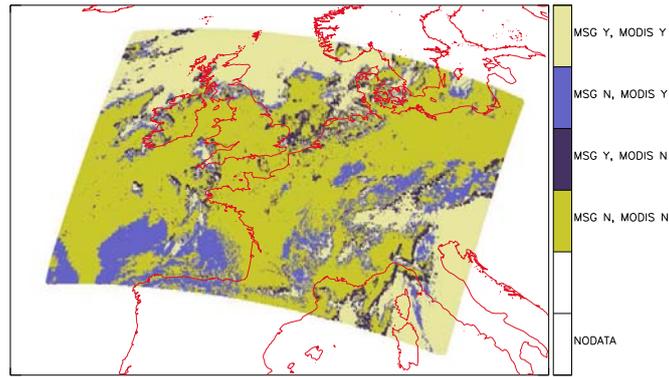


Abbildung A.10: Vergleich der Ergebnisse des SEVIRI MeCiDa-Algorithmus mit MODIS-Terra Cirrus Reflectance Flag aus MOD06\_L2. Datum: 2004/11/14 11:00 UTC

Nov. 2004/11/14 11:00 UTC	MeCiDA Zirkus	MeCiDA kein Zirkus	Gesamt
MODIS Zirkus	59204	34444	93648
MODIS kein Zirkus	16447	123018	139465
Gesamt	75651	157462	233113

78% der Bildelemente sind gleich klassifiziert. 63% der mit MODIS erkannten Zirren werden von MeCiDA detektiert.

### A.1.11 Dezember

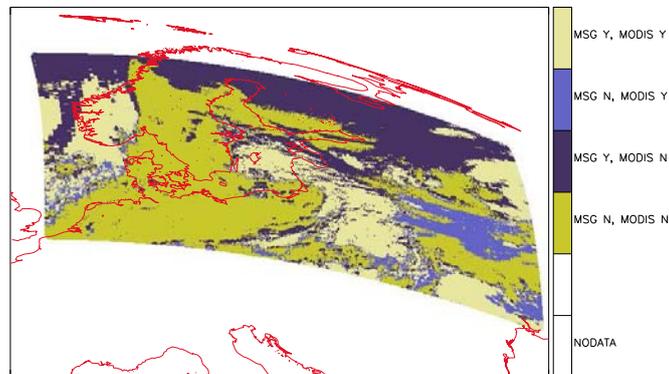


Abbildung A.11: Vergleich der Ergebnisse des SEVIRI MeCiDa-Algorithmus mit MODIS-Terra Cirrus Reflectance Flag aus MOD06\_L2. Datum: 2004/12/03 09:45 UTC

Dez. 2004/12/03 09:45	MeCiDA Zirkus	MeCiDA kein Zirkus	Gesamt
MODIS Zirkus	34370	13089	47459
MODIS kein Zirkus	44250	60383	104633
Gesamt	78620	73472	152092

62% der Bildelemente sind gleich klassifiziert. 72% der mit MODIS erkannten Zirren werden von MeCiDA detektiert.

## A.2 Vergleich mit Monatsmittelwerten

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Vergleiche der Monatsmittelwerte aus den MODIS Daten mit den MeCiDA Monatsmittelwerten dargestellt. Die Monatsmittelwerte sind Bestandteil der MODIS MYD08\_M3 Level 3 Produkte.

Im Jahresmittel ergibt sich eine Korrelation 0.87. Die Kovarianz beträgt 0.016. Die lineare Regression liefert:

$$Y = 0.89 * X - 0.03. \quad (\text{A.1})$$

In Abb. 3.25 sind die Ergebnisse der Untersuchung der Jahresmittelwerte dargestellt.

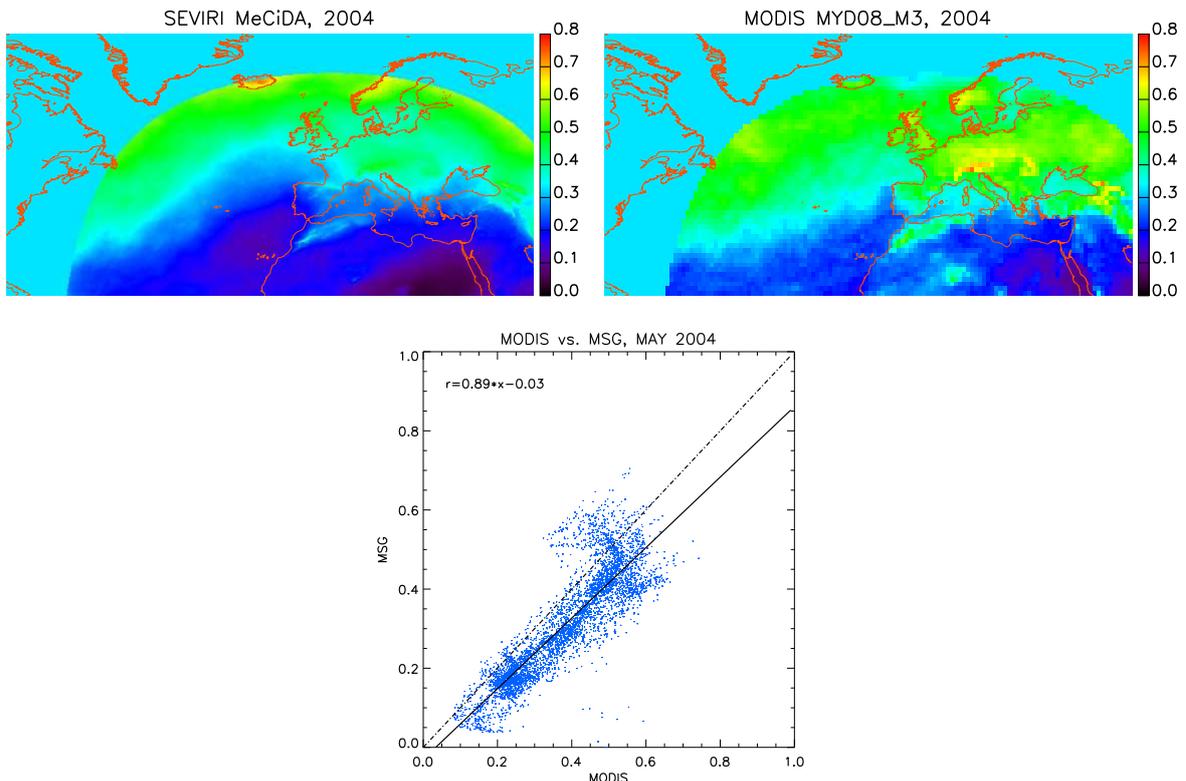


Abbildung A.12: **Links Oben:** Der SEVIRI MeCiDa Jahresmittelwert 2004 für das **CONTRAILS** Gebiet:  $80^{\circ}W, 50^{\circ}O, 20^{\circ}N, 75^{\circ}N$ . **Rechts Oben:** MODIS Cirrus.Fraction.SWIR\_FMean Cirrus Jahresmittelwert aus MYD08\_M3, 2004. **Unten:** Vergleich der SEVIRI MeCiDa Jahresmittelwerte und der MODIS SWIR Cirrus Jahresmittelwerte aus MYD08\_M3, 2004.

Die oben gezeigten Vergleiche wurden für elf Monate des Jahres 2004 durchgeführt:

### A.2.1 Februar

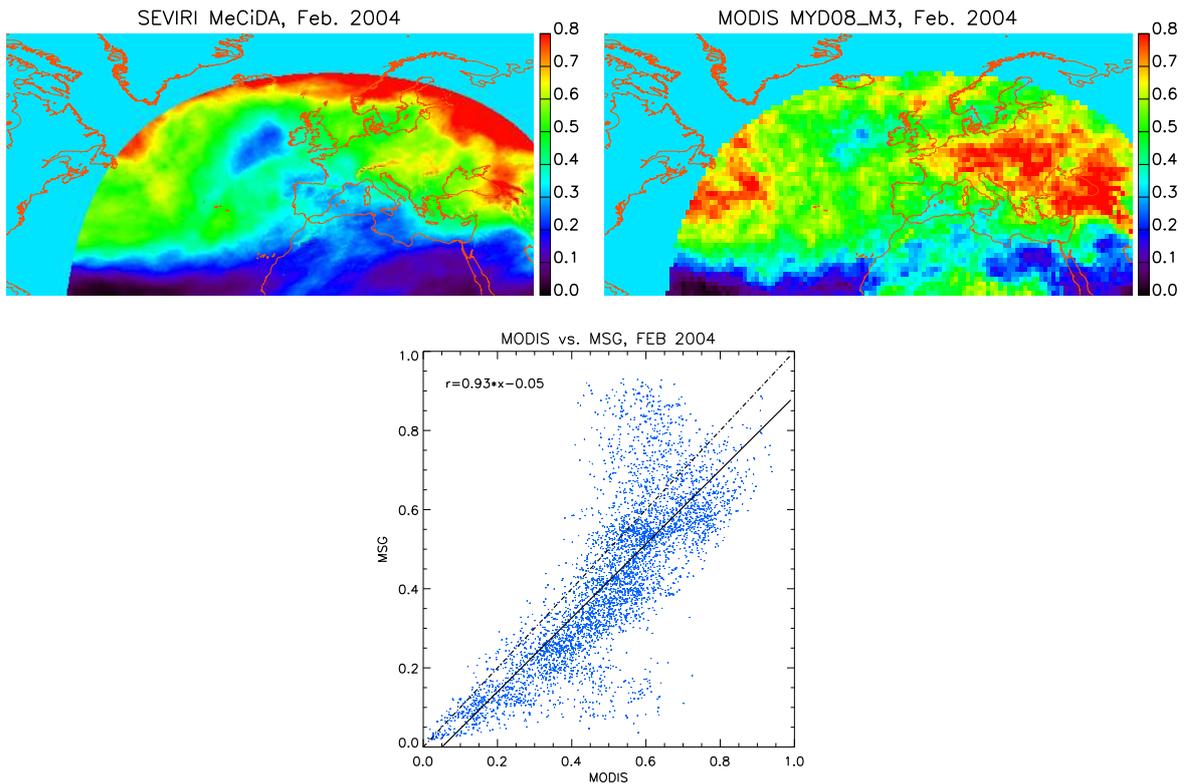


Abbildung A.13: **Links Oben:** Der SEVIRI MeCiDA Monatsmittelwert, Februar 2004 für das **CONTRAILS** Gebiet:  $80^{\circ}W, 50^{\circ}O, 20^{\circ}N, 75^{\circ}N$ . **Rechts Oben:** MODIS Cirrus.Fraction.SWIR.FMean Zirrus Monatsmittelwert aus MYD08\_M3, Februar 2004. **Unten:** Vergleich der SEVIRI MeCiDA Monatsmittelwerte und der MODIS SWIR Zirrus Monatsmittelwerte aus MYD08\_M3, Februar 2004.

### A.2.2 März

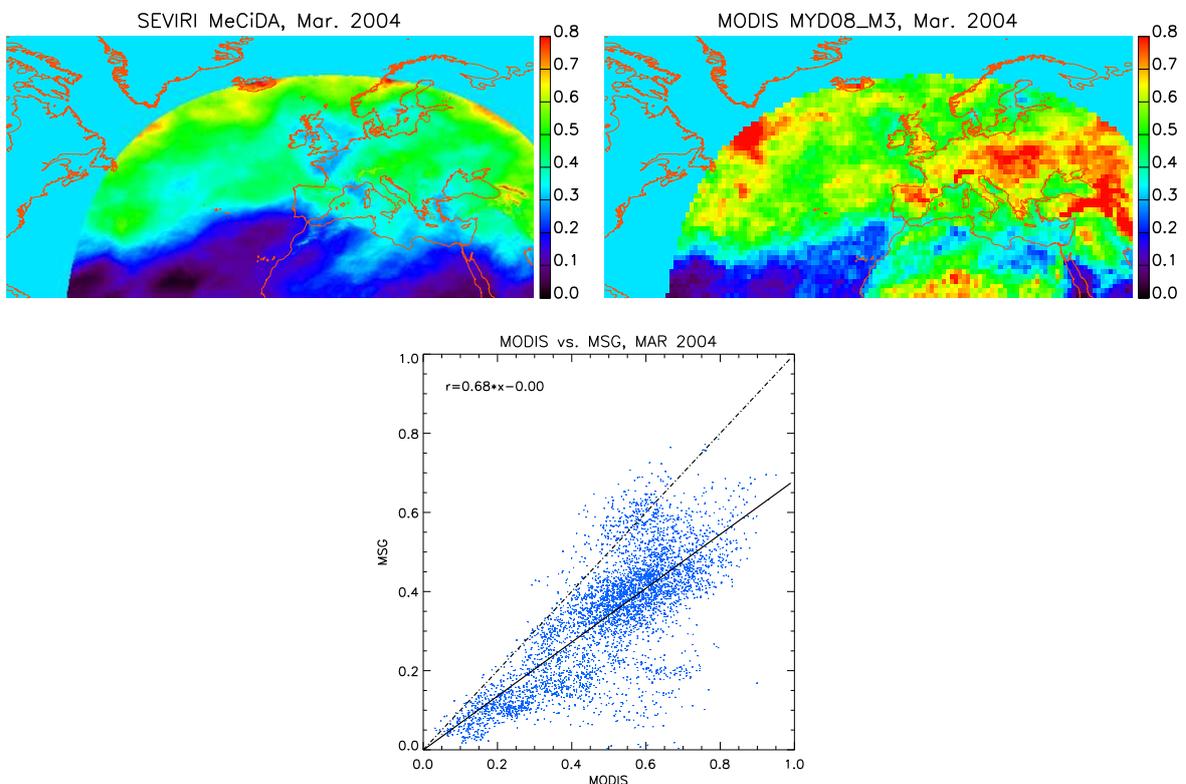


Abbildung A.14: **Links:** Der SEVIRI MeCiDA Monatsmittelwert, März 2004 für das **CONTRAILS** Gebiet:  $80^{\circ}W, 50^{\circ}O, 20^{\circ}N, 75^{\circ}N$ . **Rechts:** MODIS Cirrus.Fraction.SWIR.FMean Zirrus Monatsmittelwert aus MYD08\_M3, März 2004. **Unten:** Vergleich der SEVIRI MeCiDA Monatsmittelwerte und der MODIS SWIR Zirrus Monatsmittelwerte, März 2004.

## A.2.3 April

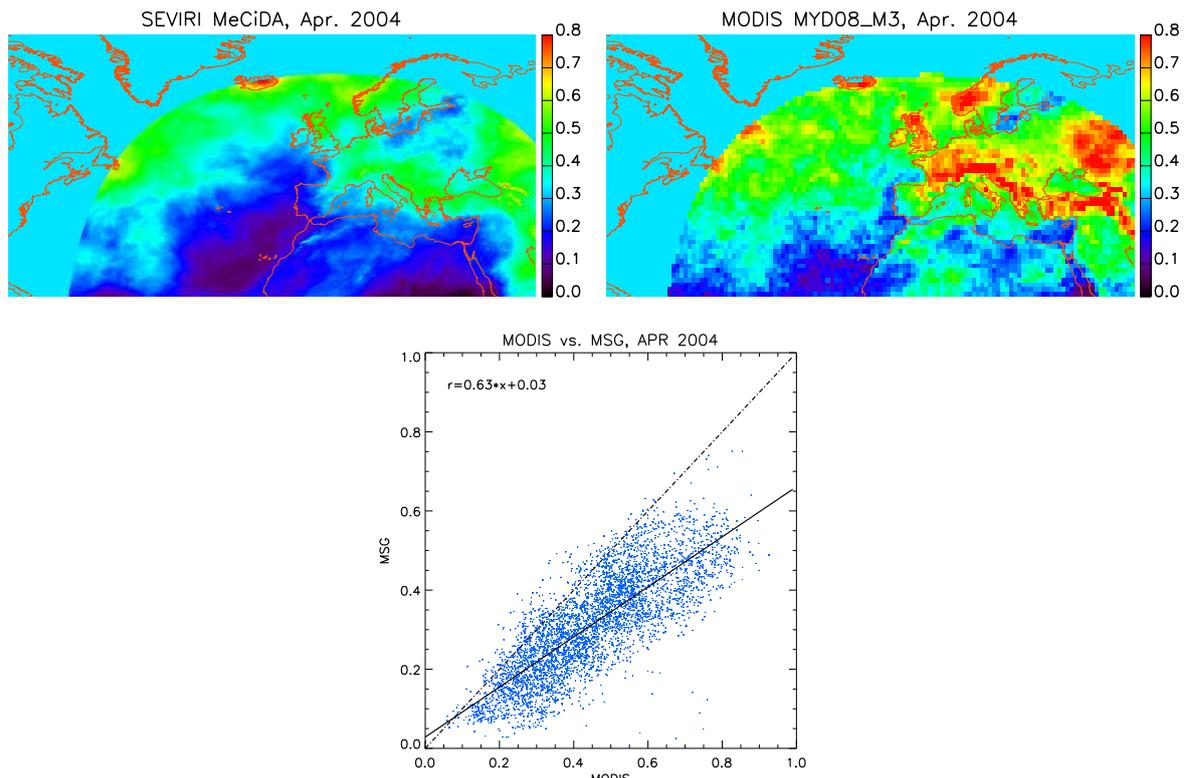


Abbildung A.15: **Links:** Der SEVIRI MeCiDa Monatsmittelwert, April 2004 für das **CONTRAILS** Gebiet:  $80^{\circ}W, 50^{\circ}O, 20^{\circ}N, 75^{\circ}N$ . **Rechts:** MODIS Cirrus.Fraction.SWIR.FMean Zirkus Monatsmittelwert aus MYD08\_M3, April 2004. **Unten:** Vergleich der SEVIRI MeCiDa Monatsmittelwerte und der MODIS SWIR Zirkus Monatsmittelwerte, April 2004.

## A.2.4 Mai

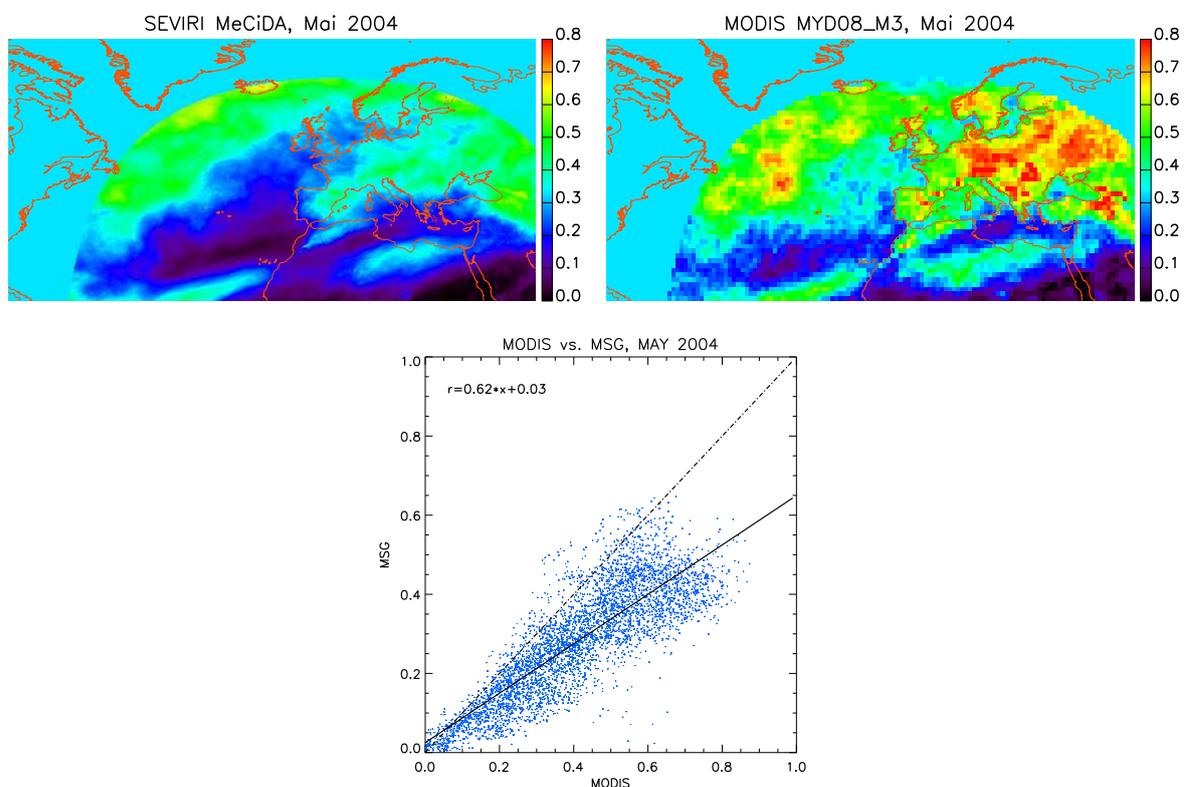


Abbildung A.16: **Links:** Der SEVIRI MeCiDa Monatsmittelwert, Mai 2004 für das **CONTRAILS** Gebiet:  $80^{\circ}W, 50^{\circ}O, 20^{\circ}N, 75^{\circ}N$ . **Rechts:** MODIS Cirrus.Fraction.SWIR.FMean Zirkus Monatsmittelwert aus MYD08\_M3, April 2004. **Unten:** Vergleich der SEVIRI MeCiDa Monatsmittelwerte und der MODIS SWIR Zirkus Monatsmittelwerte, April 2004.

### A.2.5 Juni

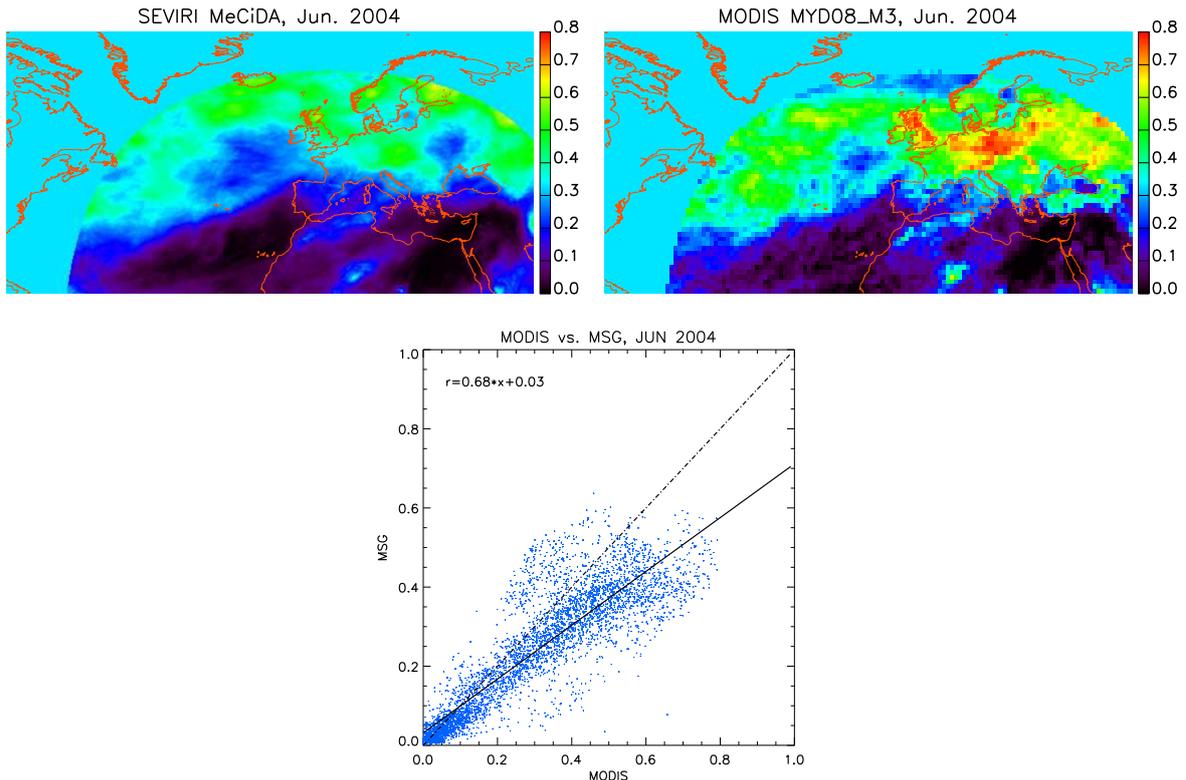


Abbildung A.17: **Links:** Der SEVIRI MeCiDa Monatsmittelwert, Juni 2004 für das **CONTRAILS** Gebiet:  $80^{\circ}W, 50^{\circ}O, 20^{\circ}N, 75^{\circ}N$ . **Rechts:** MODIS Cirrus.Fraction.SWIR.FMean Zirrus Monatsmittelwert aus MYD08\_M3, Juni 2004. **Unten:** Vergleich der SEVIRI MeCiDa Monatsmittelwerte und der MODIS SWIR Zirrus Monatsmittelwerte, Juni 2004.

### A.2.6 Juli

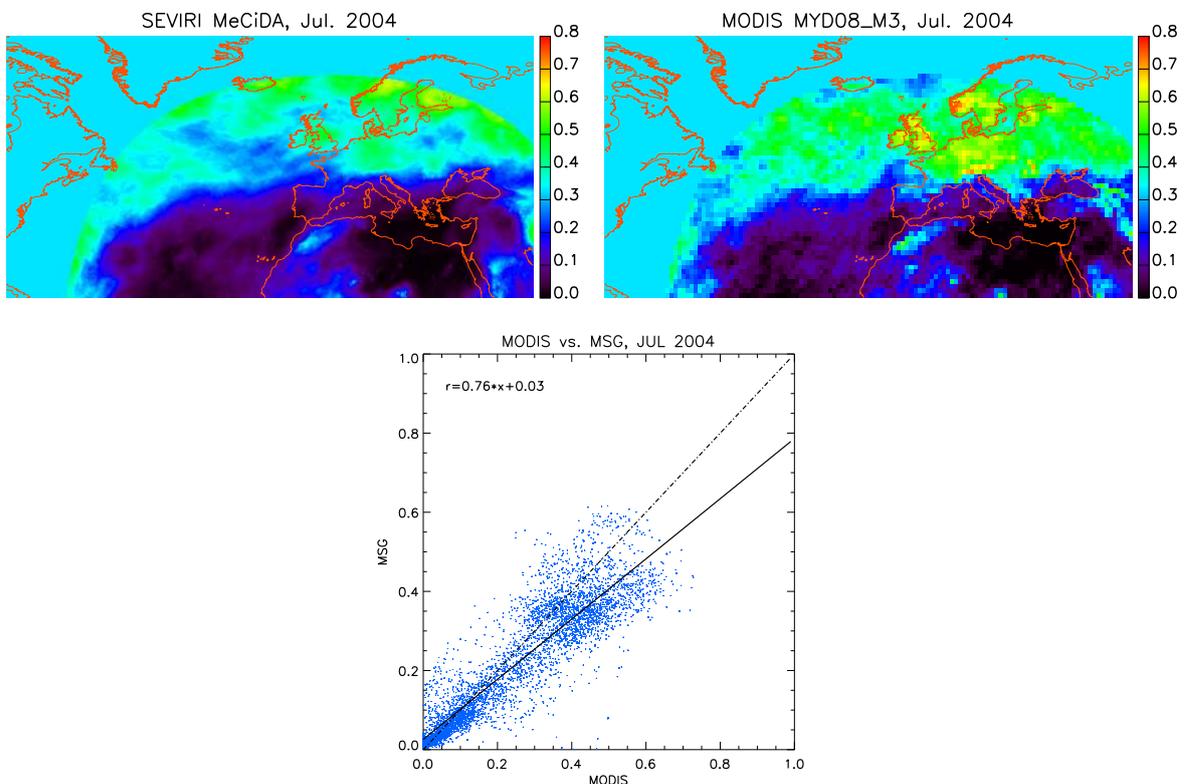


Abbildung A.18: **Links:** Der SEVIRI MeCiDa Monatsmittelwert, Juli 2004 für das **CONTRAILS** Gebiet:  $80^{\circ}W, 50^{\circ}O, 20^{\circ}N, 75^{\circ}N$ . **Rechts:** MODIS Cirrus.Fraction.SWIR.FMean Zirrus Monatsmittelwert aus MYD08\_M3, Juli 2004. **Unten:** Vergleich der SEVIRI MeCiDa Monatsmittelwerte und der MODIS SWIR Zirrus Monatsmittelwerte, Juli 2004.

## A.2.7 August

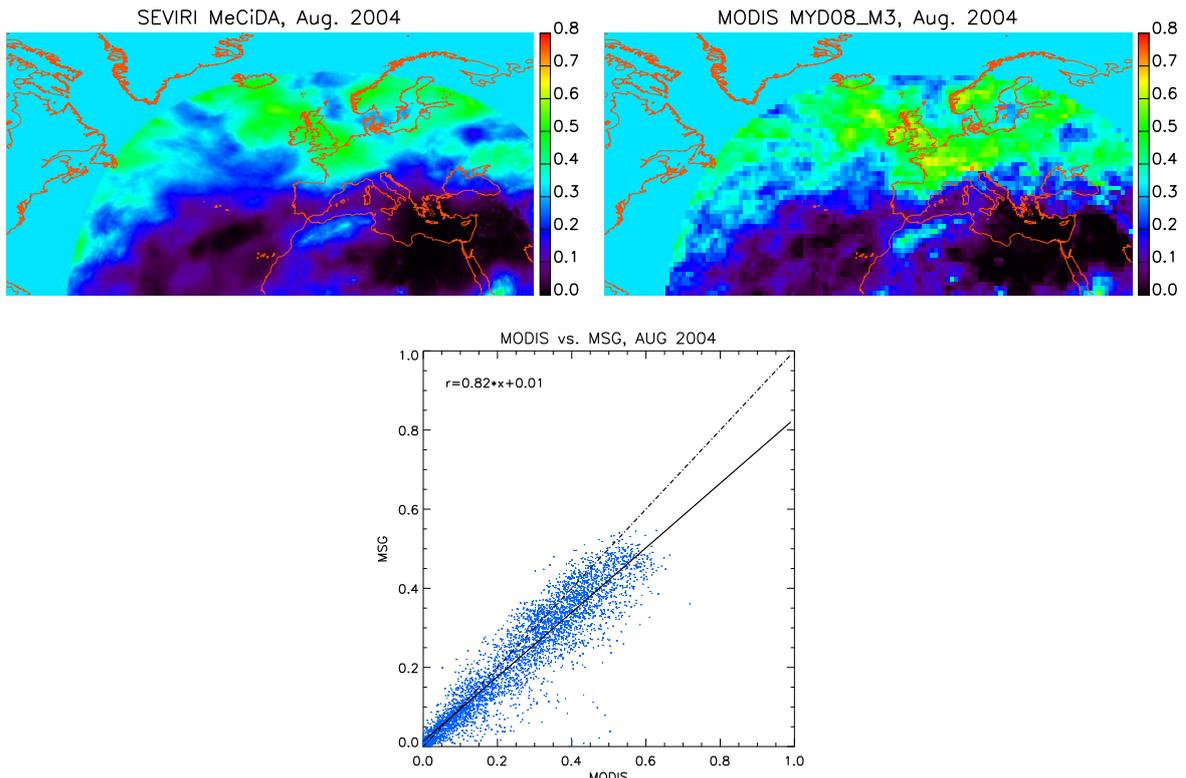


Abbildung A.19: **Links:** Der SEVIRI MeCiDA Monatsmittelwert, August 2004 für das **CONTRAILS** Gebiet:  $80^{\circ}W, 50^{\circ}O, 20^{\circ}N, 75^{\circ}N$ . **Rechts:** MODIS Cirrus\_Fraction\_SWIR\_FMean Zirkus Monatsmittelwert aus MYD08\_M3, August, 2004. **Unten:** Vergleich der SEVIRI MeCiDA Monatsmittelwerte und der MODIS SWIR Zirkus Monatsmittelwerte, August 2004

## A.2.8 September

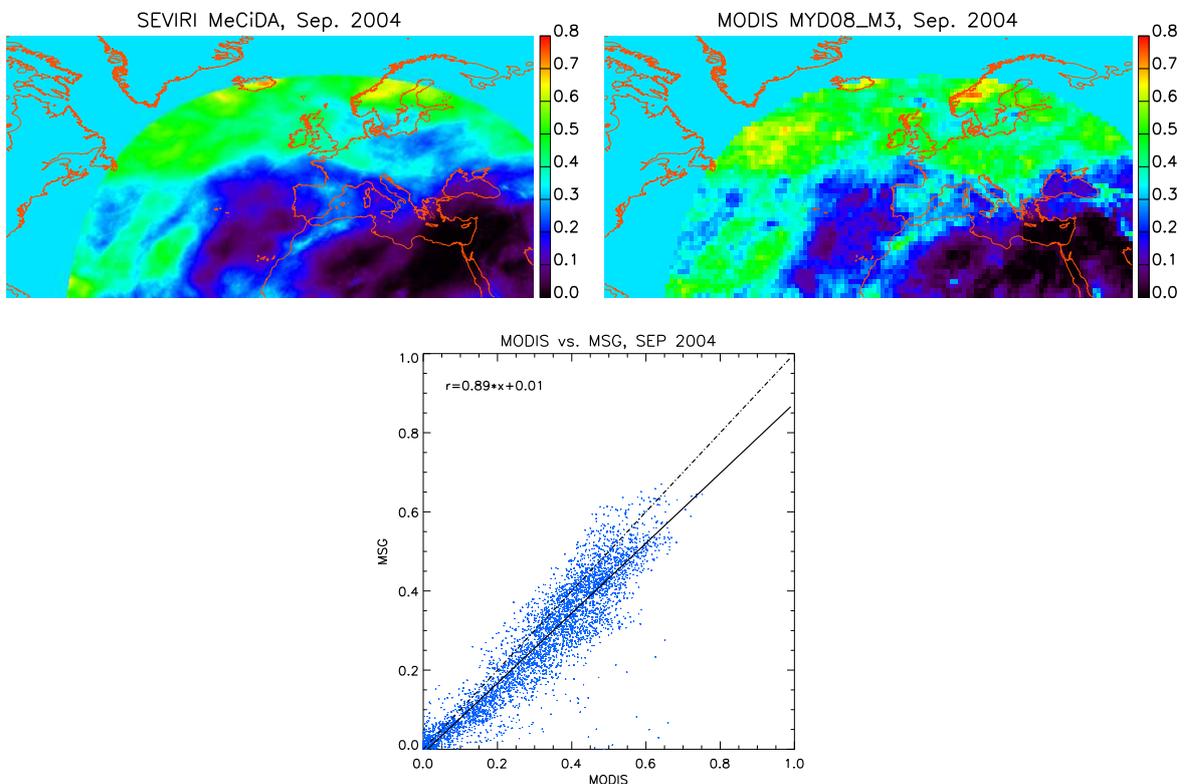


Abbildung A.20: **Links:** Der SEVIRI MeCiDA Monatsmittelwert, September 2004 für das **CONTRAILS** Gebiet:  $80^{\circ}W, 50^{\circ}O, 20^{\circ}N, 75^{\circ}N$ . **Rechts:** MODIS Cirrus\_Fraction\_SWIR\_FMean Zirkus Monatsmittelwert aus MYD08\_M3, September 2004. **Unten:** Vergleich der SEVIRI MeCiDA Monatsmittelwerte und der MODIS SWIR Zirkus Monatsmittelwerte, September 2004.

### A.2.9 Oktober

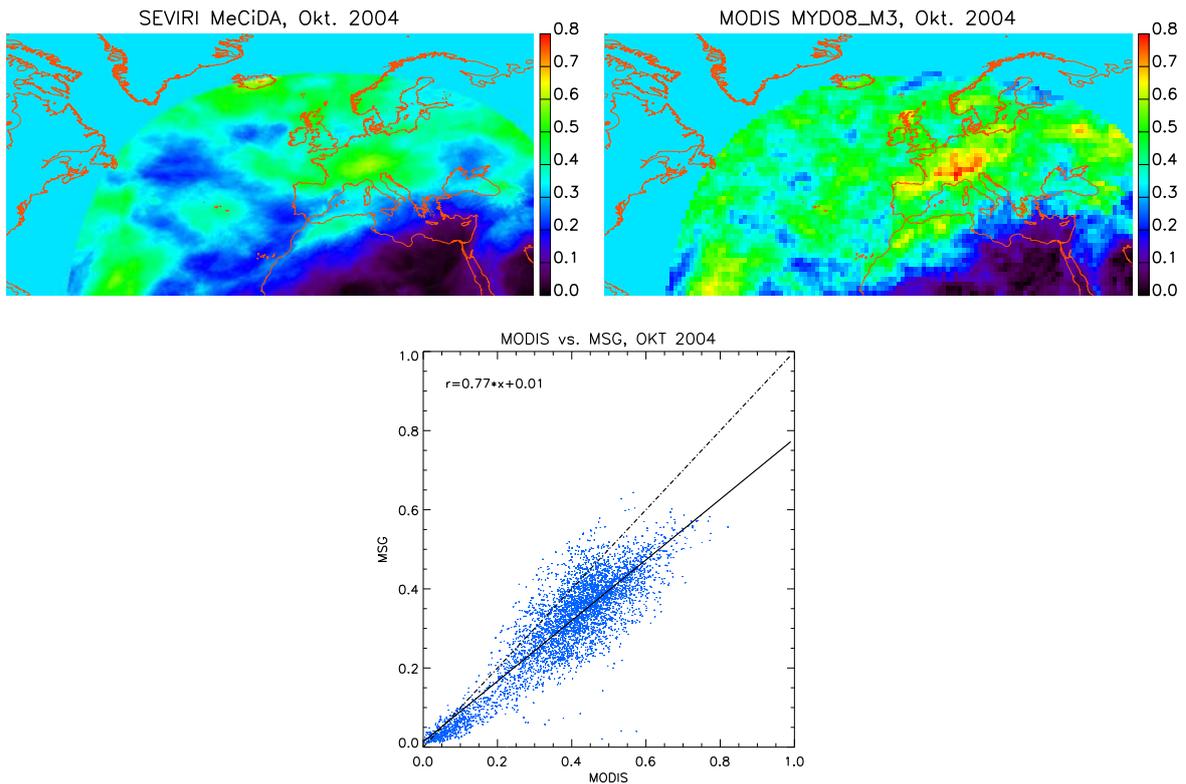


Abbildung A.21: **Links:** Der SEVIRI MeCiDa Monatsmittelwert, Oktober 2004 für das **CONTRAILS** Gebiet:  $80^{\circ}W, 50^{\circ}O, 20^{\circ}N, 75^{\circ}N$ . **Rechts:** MODIS Cirrus.Fraction.SWIR.FMean Zirrus Monatsmittelwert aus MYD08\_M3, Oktober 2004. **Unten:** Vergleich der SEVIRI MeCiDa Monatsmittelwerte und der MODIS SWIR Zirrus Monatsmittelwerte, Oktober 2004.

### A.2.10 November

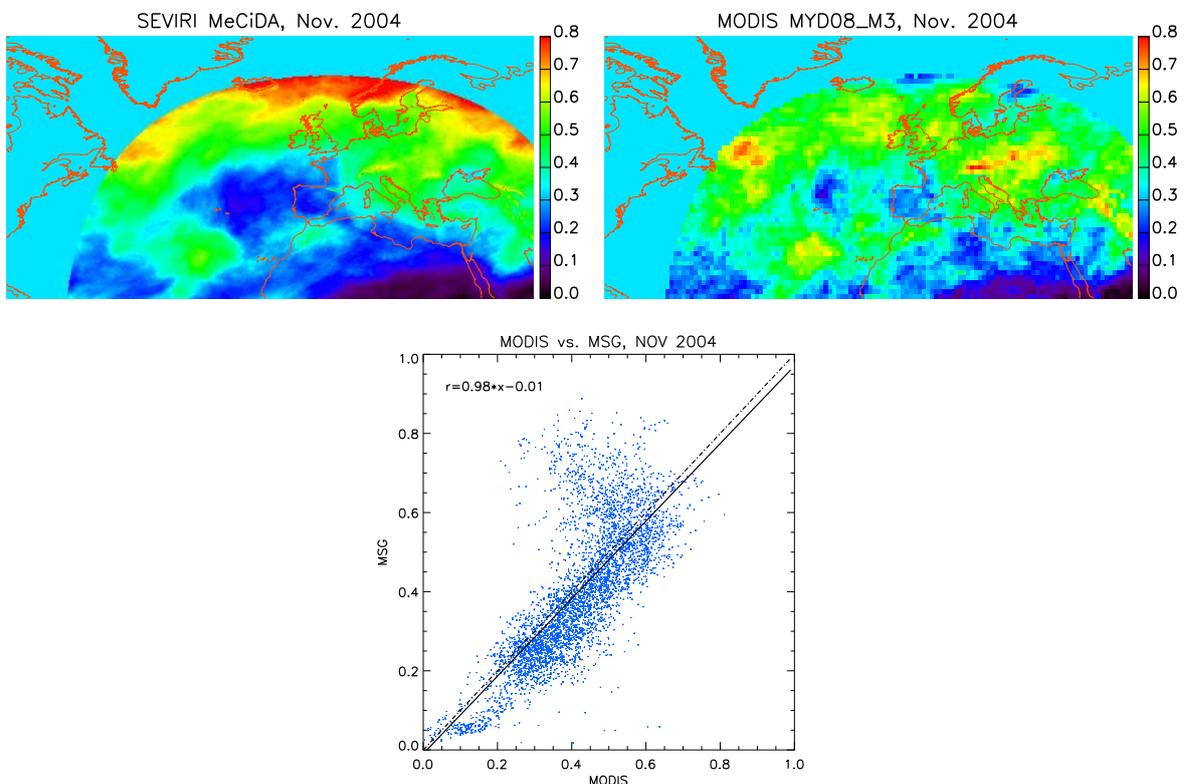


Abbildung A.22: **Links:** Der SEVIRI MeCiDa Monatsmittelwert, November 2004 für das **CONTRAILS** Gebiet:  $80^{\circ}W, 50^{\circ}O, 20^{\circ}N, 75^{\circ}N$ . **Rechts:** MODIS Cirrus.Fraction.SWIR.FMean Zirrus Monatsmittelwert aus MYD08\_M3, November 2004. **Unten:** Vergleich der SEVIRI MeCiDa Monatsmittelwerte und der MODIS SWIR Zirrus Monatsmittelwerte, November 2004.

## A.2.11 Dezember

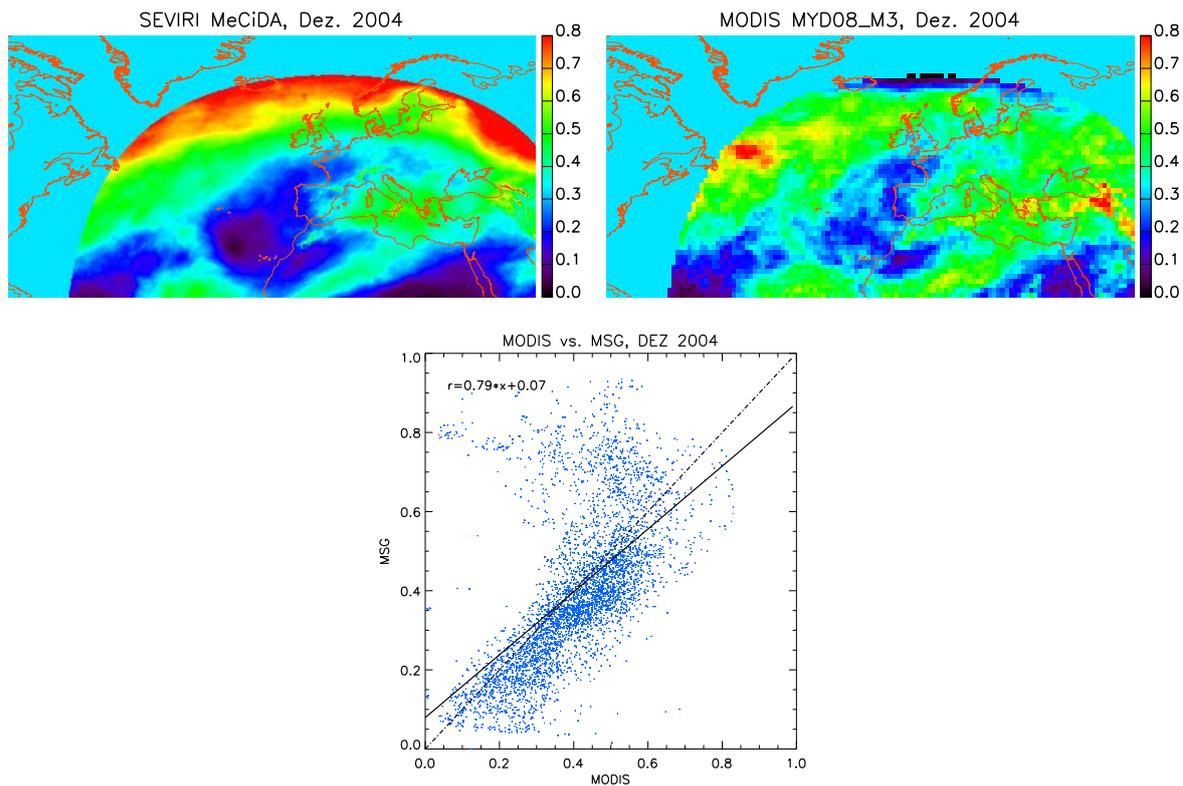


Abbildung A.23: **Links:** Der SEVIRI MeCiDa Monatsmittelwert, Dezember 2004 für das **CONTRAILS** Gebiet:  $80^{\circ}W, 50^{\circ}O, 20^{\circ}N, 75^{\circ}N$ . **Rechts:** MODIS Cirrus\_Fraction\_SWIR\_FMean Zircus Monatsmittelwert aus MYD08\_M3, Dezember 2004. **Unten:** Vergleich der SEVIRI MeCiDA Monatsmittelwerte und der MODIS SWIR Zircus Monatsmittelwerte, Dezember 2004.



# Anhang B

## Anhang Auswertung

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit werden einige Ergebnisse der Auswertungen in diesem Kapitel ausführlich dargestellt. Im Haupttext in Abschnitt 4.3 und Abschnitt 5.2 wurden die Ergebnisse bereits zusammengefasst erläutert.

### B.1 Untersuchung des Jahrgangs der Zirrusbedeckung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Untersuchungen für die einzelnen Monate dargestellt, die in Abschnitt 4.3.1 zusammengefasst diskutiert werden.

#### Statistiken März 2004

*Tabelle B.1:* Statistiken der Zirrusbedeckung für März 2004

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	37.24%	42.57%	0.26%
Bildelemente ohne Flugverkehr	34.85%	42.25%	0.25%
Bildelemente gesamt	35.24%	42.33%	0.25%

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **1.12%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

Spearman'sche Rang-Korrelationskoeffizient für die 6 Klassen: 0.88. Korrelationskoeffizient für alle (ausgewählten) Bildelemente: 0.0219312. Beide Werte sind **signifikant** verschieden von Null.

#### Untersuchung über Land

*Tabelle B.2:* Statistiken der Zirrusbedeckung für März 2004 (nur Land)

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	39.04%	42.87%	0.26%
Bildelemente ohne Flugverkehr	34.41%	41.91%	0.25%
Bildelemente gesamt	36.01%	42.34%	0.25%

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **3.18%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

**Untersuchung über Wasser**

Tabelle B.3: Statistiken der Zirrusbedeckung für März 2004 (nur Wasser)

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	33.09%	41.56%	0.25%
Bildelemente ohne Flugverkehr	34.95%	42.38%	0.25%
Bildelemente gesamt	34.41%	42.19%	0.25%

Die Mittelwerte unterscheiden sich **nicht signifikant**.

**Statistiken April 2004**

Tabelle B.4: Statistiken der Zirrusbedeckung für April 2004

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	34.02%	41.21%	0.23%
Bildelemente ohne Flugverkehr	28.82%	39.59%	0.24%
Bildelemente gesamt	30.45%	40.23%	0.24%

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **5.66%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

Der Spearman'sche Rang-Korrelationskoeffizient beträgt für die 6 Klassen: 1.0. Korrelationskoeffizient für alle (ausgewählten) Bildelemente ist 0.061. Beide Werte sind **signifikant** verschieden von Null.

**Untersuchung über Land**

Tabelle B.5: Statistiken der Zirrusbedeckung für April 2004 (nur Land)

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	36.38%	41.56%	0.25%
Bildelemente ohne Flugverkehr	30.89%	39.99%	0.24%
Bildelemente gesamt	32.30%	41.57%	0.24%

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **4.57%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

**Untersuchung über Wasser**

Tabelle B.6: Statistiken der Zirrusbedeckung für April 2004 (nur Wasser)

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	28.49%	39.67%	0.24%
Bildelemente ohne Flugverkehr	27.90%	39.64%	0.24%
Bildelemente gesamt	27.77%	39.55%	0.24%

Die Mittelwerte unterscheiden sich **nicht signifikant**.

**Statistiken Mai 2004**

Tabelle B.7: Statistiken der Zirrusbedeckung für Mai 2004

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	29.94%	39.91%	0.23%
Bildelemente ohne Flugverkehr	24.90%	37.67%	0.21%
Bildelemente gesamt	26.28%	38.39%	0.22%

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **5.52%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

Der Spearmansche Rang-Korrelationskoeffizient beträgt für die 6 Klassen: 1.0. Korrelationskoeffizient für alle (ausgewählten) Bildelemente ist 0.0653. Beide Werte sind **signifikant** verschieden von Null.

**Untersuchung über Land**

Tabelle B.8: Statistiken der Zirrusbedeckung für Mai 2004 (nur Land)

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	32.71%	40.67%	0.24%
Bildelemente ohne Flugverkehr	27.02%	38.09%	0.22%
Bildelemente gesamt	28.92%	39.01%	0.23%

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **7.75%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

**Untersuchung über Wasser**

Tabelle B.9: Statistiken der Zirrusbedeckung für Mai 2004 (nur Wasser)

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	23.82%	37.40%	0.22%
Bildelemente ohne Flugverkehr	22.59%	36.97%	0.21%
Bildelemente gesamt	22.92%	37.11%	0.22%

Die Mittelwerte unterscheiden sich **nicht signifikant**.

**Statistiken Juni 2004**

Tabelle B.10: Statistiken der Zirrusbedeckung für Juni 2004

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	29.59%	40.31%	0.24%
Bildelemente ohne Flugverkehr	22.80%	37.07%	0.22%
Bildelemente gesamt	24.66%	38.11%	0.22%

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **8.17%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

Der Spearmansche Rang-Korrelationskoeffizient beträgt für die 6 Klassen: 0.9428. Korrelationskoeffizient für alle (ausgewählten) Bildelemente ist 0.0845. Beide Werte sind **signifikant** verschieden von Null.

### Untersuchung über Land

*Tabelle B.11: Statistiken der Zirrusbedeckung für Juni 2004 (nur Land)*

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	31.92%	41.02%	0.24%
Bildelemente ohne Flugverkehr	23.68%	37.20%	0.23%
Bildelemente gesamt	26.24%	38.66%	0.22%

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **10.82%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

### Untersuchung über Wasser

*Tabelle B.12: Statistiken der Zirrusbedeckung für Juni 2004 (nur Wasser)*

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	23.07%	37.28%	0.22%
Bildelemente ohne Flugverkehr	21.51%	36.65%	0.21%
Bildelemente gesamt	21.71%	36.79%	0.22%

Die Mittelwerte unterscheiden sich **nicht signifikant**.

### Statistiken Juli 2004

*Tabelle B.13: Statistiken der Zirrusbedeckung für Juli 2004*

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	25.09%	38.66%	0.23%
Bildelemente ohne Flugverkehr	18.77%	34.68%	0.20%
Bildelemente gesamt	20.40%	35.85%	0.21%

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **8.67%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

Der Spearman'sche Rang-Korrelationskoeffizient beträgt für die 6 Klassen: 0.9428. Der Korrelationskoeffizient für alle (ausgewählten) Bildelemente ist 0.0820. Beide Werte sind **signifikant** verschieden von Null.

### Untersuchung über Land

*Tabelle B.14: Statistiken der Zirrusbedeckung für Juli 2004 (nur Land)*

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	28.15%	39.96%	0.23%
Bildelemente ohne Flugverkehr	20.26%	35.14%	0.20%
Bildelemente gesamt	22.69%	36.83%	0.21%

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **11.98%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

**Untersuchung über Wasser**

Tabelle B.15: Statistiken der Zirrusbedeckung für Juli 2004 (nur Wasser)

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	17.95%	34.46%	0.20%
Bildelemente ohne Flugverkehr	17.18%	34.11%	0.20%
Bildelemente gesamt	17.39%	34.13%	0.20%

Die Mittelwerte unterscheiden sich **nicht signifikant**.

**Statistiken August 2004**

Tabelle B.16: Statistiken der Zirrusbedeckung für August 2004

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	28.30%	40.31%	0.24%
Bildelemente ohne Flugverkehr	22.98%	37.29%	0.22%
Bildelemente gesamt	24.22%	38.09%	0.22%

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **5.38%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

Der Spearman'sche Rang-Korrelationskoeffizient beträgt für die 6 Klassen: 1. Der Korrelationskoeffizient für alle (ausgewählten) Bildelemente ist 0.062. Beide Werte sind **signifikant** verschieden von Null.

**Untersuchung über Land**

Tabelle B.17: Statistiken der Zirrusbedeckung für August 2004 (nur Land)

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	30.60%	41.18%	0.24%
Bildelemente ohne Flugverkehr	24.42%	37.47%	0.22%
Bildelemente gesamt	26.46%	38.82%	0.23%

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **8.39%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

**Untersuchung über Wasser**

Tabelle B.18: Statistiken der Zirrusbedeckung für August 2004 (nur Wasser)

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	22.67%	37.52%	0.22%
Bildelemente ohne Flugverkehr	21.75%	37.08%	0.22%
Bildelemente gesamt	21.96%	37.20%	0.22%

Die Mittelwerte unterscheiden sich **nicht signifikant**.

## Statistiken September 2004

*Tabelle B.19: Statistiken der Zirrusbedeckung für September 2004*

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	28.27%	40.18%	0.24%
Bildelemente ohne Flugverkehr	23.48%	37.49%	0.22%
Bildelemente gesamt	24.65%	38.25%	0.22%

Relativer Unterschied der Mittelwerte **5.00%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

Der Spearman'sche Rang-Korrelationskoeffizient beträgt für die 6 Klassen: 1. Der Korrelationskoeffizient für alle (ausgewählten) Bildelemente ist 0.0549. Beide Werte sind **signifikant** verschieden von Null.

### Untersuchung über Land

*Tabelle B.20: Statistiken der Zirrusbedeckung für September 2004 (nur Land)*

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	29.43%	40.71%	0.24%
Bildelemente ohne Flugverkehr	23.60%	37.35%	0.22%
Bildelemente gesamt	25.40%	38.54%	0.23%

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **7.63%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

### Untersuchung über Wasser

*Tabelle B.21: Statistiken der Zirrusbedeckung für September 2004 (nur Wasser)*

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	25.42%	38.82%	0.23%
Bildelemente ohne Flugverkehr	23.32%	37.67%	0.22%
Bildelemente gesamt	23.69%	37.66%	0.22%

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **1.6%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

## Statistiken Oktober 2004

*Tabelle B.22: Statistiken der Zirrusbedeckung für Oktober 2004*

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	44.78%	44.50%	0.28%
Bildelemente ohne Flugverkehr	38.08%	43.28%	0.27%
Bildelemente gesamt	39.67%	43.63%	0.27%

Unterschied der Mittelwerte = **4.19%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

Der Spearman'sche Rang-Korrelationskoeffizient beträgt für die 6 Klassen: 1.0. Der Korrelationskoeffizient für alle (ausgewählten) Bildelemente ist 0.06125. Beide Werte sind **signifikant** verschieden von Null.

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **6.5%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

**Untersuchung über Land***Tabelle B.23: Statistiken der Zirrusbedeckung für Oktober 2004 (nur Wasser)*

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	47.92%	44.56%	0.28%
Bildelemente ohne Flugverkehr	39.66%	43.34%	0.27%
Bildelemente gesamt	42.26%	43.95%	0.27%

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **6.5%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

**Untersuchung über Wasser***Tabelle B.24: Statistiken der Zirrusbedeckung für Oktober 2004 (nur Wasser)*

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	37.68%	43.27%	0.27%
Bildelemente ohne Flugverkehr	36.35%	43.10%	0.27%
Bildelemente gesamt	36.57%	43.07%	0.27%

Die Mittelwerte unterscheiden sich **nicht signifikant**.

**Statistiken November 2004***Tabelle B.25: Statistiken der Zirrusbedeckung für November 2004*

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	41.09%	43.94%	0.26%
Bildelemente ohne Flugverkehr	36.57%	43.07%	0.26%
Bildelemente gesamt	37.47%	43.30%	0.26%

Relativer Unterschied der Mittelwerte **2.46%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

Der Spearman'sche Rang-Korrelationskoeffizient beträgt für die 6 Klassen: 0.94. Der Korrelationskoeffizient für alle (ausgewählten) Bildelemente ist 0.03827. Beide Werte sind **signifikant** verschieden von Null.

**Untersuchung über Land***Tabelle B.26: Statistiken der Zirrusbedeckung für November 2004 (nur Land)*

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	41.77%	44.00%	0.26%
Bildelemente ohne Flugverkehr	36.85%	43.00%	0.26%
Bildelemente gesamt	38.36%	43.37%	0.26%

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **4.1%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

## Untersuchung über Wasser

Tabelle B.27: Statistiken der Zirrusbedeckung für November 2004 (nur Wasser)

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	39.02%	43.64%	0.26%
Bildelemente ohne Flugverkehr	36.40%	43.09%	0.27%
Bildelemente gesamt	36.72%	43.25%	0.26%

Die Mittelwerte unterscheiden sich **nicht signifikant**.

### Statistiken Dezember 2004

Tabelle B.28: Statistiken der Zirrusbedeckung für Dezember 2004

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	36.10%	43.17%	0.26%
Bildelemente ohne Flugverkehr	36.60%	43.18%	0.26%
Bildelemente gesamt	36.66%	43.19%	0.26%

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **0.17%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **nicht signifikant**.

Der Spearman'sche Rang-Korrelationskoeffizient beträgt für die 6 Klassen: -0.83. Das ist **signifikant** von Null verschieden. Der Korrelationskoeffizient für alle (ausgewählten) Bildelemente ist -0.03189. Dies ist ebenfalls **signifikant** verschieden von Null.

## Untersuchung über Land

Tabelle B.29: Statistiken der Zirrusbedeckung für Dezember 2004 (nur Land)

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	35.55%	42.98%	0.25%
Bildelemente ohne Flugverkehr	36.06%	42.88%	0.25%
Bildelemente gesamt	36.15%	43.01%	0.25%

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **0.24%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **nicht signifikant**.

## Untersuchung über Wasser

Tabelle B.30: Statistiken der Zirrusbedeckung für Dezember 2004 (nur Wasser)

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	37.30%	43.53%	0.26%
Bildelemente ohne Flugverkehr	37.47%	43.59%	0.26%
Bildelemente gesamt	37.33%	43.51%	0.26%

Die Mittelwerte unterscheiden sich **nicht signifikant**.

## B.2 Untersuchung des Tagesgangs der Zirrusbedeckung

In diesem Abschnitt sind die Ergebnisse aus der Untersuchung des Tagesgangs ausführlich aufgelistet. Die Untersuchung wird in Abschnitt 4.3.2 zusammengefasst diskutiert. **Statistiken 2004, UTC 03:00**

In Tabelle B.31 sind für den Zeitpunkt 03:00 UTC die mittlere Zirusbedeckung der Bildelemente mit Flugverkehr, ohne Flugverkehr und der Mittelwert der Zirusbedeckung über alle Bildelemente dargestellt.

Tabelle B.31: Statistiken der Zirusbedeckung für UTC 03:00 2004

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	33.38%	42.19%	0.74%
Bildelemente ohne Flugverkehr	29.17%	40.57%	0.71%
Bildelemente gesamt	29.75%	40.90%	0.72%

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **2.01%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **nicht signifikant**.

Der Spearmansche Rang-Korrelationskoeffizient beträgt für die 6 Klassen: 0.94. Das ist **signifikant** von Null verschieden. Der Korrelationskoeffizient für alle (ausgewählten) Bildelemente ist 0.01674. Dies ist **nicht signifikant** verschieden von Null.

#### Untersuchung über Land

Tabelle B.32: Statistiken der Zirusbedeckung für UTC 03:00 2004 (nur Land)

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	35.15%	42.51%	0.75%
Bildelemente ohne Flugverkehr	30.26%	40.99%	0.72%
Bildelemente gesamt	30.76%	41.14%	0.72%

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **1.69%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **nicht signifikant**.

#### Untersuchung über Wasser

Tabelle B.33: Statistiken der Zirusbedeckung für UTC 03:00 2004 (nur Wasser)

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	30.09%	40.87%	0.72%
Bildelemente ohne Flugverkehr	28.19%	40.20%	0.70%
Bildelemente gesamt	28.06%	40.33%	0.71%

Die Mittelwerte unterscheiden sich **nicht signifikant**.

#### Statistiken 2004, UTC 08:00

Tabelle B.34: Statistiken der Zirusbedeckung für UTC 08:00 2004

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	33.30%	42.02%	0.74%
Bildelemente ohne Flugverkehr	27.70%	39.83%	0.70%
Bildelemente gesamt	29.48%	40.61%	0.71%

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **6.44%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

Der Spearmansche Rang-Korrelationskoeffizient beträgt für die 6 Klassen: 0.94. Der Korrelationskoeffizient für alle (ausgewählten) Bildelemente ist 0.03242. Beide Werte sind **signifikant** verschieden von Null.

### Untersuchung über Land

*Tabelle B.35:* Statistiken der Zirrusbedeckung für UTC 08:00 2004 (nur Land)

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	34.95%	42.35%	0.74%
Bildelemente ohne Flugverkehr	27.68%	39.54%	0.69%
Bildelemente gesamt	31.06%	41.05%	0.72%

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **12.22%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

### Untersuchung über Wasser

*Tabelle B.36:* Statistiken der Zirrusbedeckung für UTC 08:00 2004 (nur Wasser)

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	30.39%	40.95%	0.72%
Bildelemente ohne Flugverkehr	28.53%	40.37%	0.71%
Bildelemente gesamt	28.60%	40.47%	0.71%

Die Mittelwerte unterscheiden sich **nicht signifikant**.

### Statistiken 2004, UTC 12:30

*Tabelle B.37:* Statistiken der Zirrusbedeckung für UTC 12:30 2004

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	34.98%	42.16%	0.75%
Bildelemente ohne Flugverkehr	28.46%	39.71%	0.70%
Bildelemente gesamt	30.87%	40.77%	0.72%

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **8.49%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

Der Spearman'sche Rang-Korrelationskoeffizient beträgt für die 6 Klassen: 0.94. Der Korrelationskoeffizient für alle (ausgewählten) Bildelemente ist 0.05727. Beide Werte sind **signifikant** verschieden von Null.

### Untersuchung über Land

*Tabelle B.38:* Statistiken der Zirrusbedeckung für UTC 12:30 2004 (nur Land)

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	34.74%	42.52%	0.75%
Bildelemente ohne Flugverkehr	28.97%	39.44%	0.70%
Bildelemente gesamt	32.50%	40.99%	0.72%

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **12.18%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

**Untersuchung über Wasser***Tabelle B.39: Statistiken der Zirrusbedeckung für UTC 12:30 2004 (nur Wasser)*

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	29.97%	40.85%	0.72%
Bildelemente ohne Flugverkehr	27.38%	39.99%	0.71%
Bildelemente gesamt	28.93%	40.57%	0.72%

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **5.69%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

**Statistiken 2004, UTC 18:00***Tabelle B.40: Statistiken der Zirrusbedeckung für UTC 18:00 2004*

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	37.35%	42.81%	0.75%
Bildelemente ohne Flugverkehr	31.64%	41.38%	0.72%
Bildelemente gesamt	32.98%	41.75%	0.73%

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **4.23%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

Der Spearmansche Rang-Korrelationskoeffizient beträgt für die 6 Klassen: 0.94. Der Korrelationskoeffizient für alle (ausgewählten) Bildelemente ergibt sich: 0.04840. Beide Werte sind **signifikant** verschieden von Null.

**Untersuchung über Land***Tabelle B.41: Statistiken der Zirrusbedeckung für UTC 18:00 2004 (nur Land)*

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	39.87%	43.26%	0.76%
Bildelemente ohne Flugverkehr	32.69%	41.27%	0.72%
Bildelemente gesamt	35.28%	42.18%	0.74%

Relativer Unterschied der Mittelwerte = **7.92%**. Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

**Untersuchung über Wasser***Tabelle B.42: Statistiken der Zirrusbedeckung für UTC 18:00 2004 (nur Wasser)*

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	30.91%	41.39%	0.72%
Bildelemente ohne Flugverkehr	29.19%	40.76%	0.71%
Bildelemente gesamt	29.73%	40.95%	0.72%

Die Mittelwerte unterscheiden sich **nicht signifikant**.

### B.3 Einfluss des Jahresgangs auf die Strahlungsflussdichte

In diesem Abschnitt sind die Ergebnisse aus der Untersuchung des Einflusses des Jahresgangs auf die Strahlungsflussdichte aufgelistet. Die Untersuchung wird in Abschnitt 5.2.1 zusammengefasst diskutiert.

#### Statistiken für die Europa-Nordafrika-Teilregion für Februar 2004

Tabelle B.43: Statistiken der gesamten (kurzwellig + langwellig) ausgehenden Strahlungsflussdichte am Ober-  
rand der Atmosphäre für die Teilregion  $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 20^{\circ}N - 60^{\circ}N$ , Februar 2004

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	293.97 $W/m^2$	133.83 $W/m^2$	0.82 $W/m^2$
Bildelemente ohne Flugverkehr	304.84 $W/m^2$	147.69 $W/m^2$	0.90 $W/m^2$
Bildelemente Gesamt	302.34 $W/m^2$	144.45 $W/m^2$	0.88 $W/m^2$

Unterschied der Mittelwerte =  $-2.49 \frac{W}{m^2}$ . Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

#### Statistiken für die Europa-Nordafrika-Teilregion für Mai 2004

Tabelle B.44: Statistiken der gesamten (kurzwellig + langwellig) ausgehenden Strahlungsflussdichte am Ober-  
rand der Atmosphäre für die Teilregion  $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 20^{\circ}N - 60^{\circ}N$ , Mai 2004

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	383.90 $W/m^2$	173.96 $W/m^2$	1.01 $W/m^2$
Bildelemente ohne Flugverkehr	384.29 $W/m^2$	184.77 $W/m^2$	1.08 $W/m^2$
Bildelemente Gesamt	384.19 $W/m^2$	181.60 $W/m^2$	1.06 $W/m^2$

Unterschied der Mittelwerte =  $-0.1 \frac{W}{m^2}$ . Die Mittelwerte unterscheiden sich **nicht signifikant**.

#### Statistiken für die Europa-Nordafrika-Teilregion für Juli 2004

Tabelle B.45: Statistiken der gesamten (kurzwellig + langwellig) ausgehende Strahlungsflussdichte am Ober-  
rand der Atmosphäre für die Teilregion  $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 20^{\circ}N - 60^{\circ}N$ , Juli 2004

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	394.17 $W/m^2$	158.83 $W/m^2$	0.9 $W/m^2$
Bildelemente ohne Flugverkehr	394.21 $W/m^2$	168.14 $W/m^2$	1.0 $W/m^2$
Bildelemente Gesamt	394.88 $W/m^2$	165.54 $W/m^2$	1.0 $W/m^2$

Unterschied der Mittelwerte =  $+0.67 \frac{W}{m^2}$ . Die Mittelwerte unterscheiden sich **nicht signifikant**.

#### Statistiken für die Europa-Nordafrika-Teilregion für Oktober 2004

Tabelle B.46: Statistiken der gesamten (kurzwellig + langwellig) ausgehenden Strahlungsflussdichte am Ober-  
rand der Atmosphäre für die Teilregion  $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 20^{\circ}N - 60^{\circ}N$ , Oktober 2004

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	317.40 $W/m^2$	138.59 $W/m^2$	0.87 $W/m^2$
Bildelemente ohne Flugverkehr	327.33 $W/m^2$	154.30 $W/m^2$	0.96 $W/m^2$
Bildelemente Gesamt	325.23 $W/m^2$	149.80 $W/m^2$	0.94 $W/m^2$

Unterschied der Mittelwerte =  $-2.09 \frac{W}{m^2}$ . Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

## B.4 Einfluss des Tagesgangs auf die Strahlungsflussdichte

In diesem Abschnitt sind die Ergebnisse aus der Untersuchung des Einflusses des Tagesgangs auf die Strahlungsflussdichte aufgelistet. Die Untersuchung wird in Abschnitt 5.2.3 zusammengefasst diskutiert.

### Statistiken UTC 03:00

Tabelle B.47: Statistiken der gesamten (kurzwellig + langwellig) ausgehenden Strahlungsflussdichte am Ober-  
rand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ), 2004, UTC 03:00

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	238.71 $W/m^2$	43.96 $W/m^2$	0.35 $W/m^2$
Bildelemente ohne Flugverkehr	255.81 $W/m^2$	49.89 $W/m^2$	0.40 $W/m^2$
Bildelemente Gesamt	254.50 $W/m^2$	50.01 $W/m^2$	0.40 $W/m^2$

Unterschied der Mittelwerte =  $-1.30 \frac{W}{m^2}$ . Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

### Statistiken UTC 06:00

Tabelle B.48: Statistiken der gesamten (kurzwellig + langwellig) ausgehenden Strahlungsflussdichte am Ober-  
rand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ), 2004, UTC 06:00

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	329.53 $W/m^2$	111.62 $W/m^2$	0.89 $W/m^2$
Bildelemente ohne Flugverkehr	333.85 $W/m^2$	120.43 $W/m^2$	0.97 $W/m^2$
Bildelemente Gesamt	333.50 $W/m^2$	119.22 $W/m^2$	0.95 $W/m^2$

Unterschied der Mittelwerte =  $-0.34 \frac{W}{m^2}$ . Die Mittelwerte unterscheiden sich **nicht signifikant**.

### Statistiken UTC 09:00

Tabelle B.49: Statistiken der gesamten (kurzwellig + langwellig) ausgehenden Strahlungsflussdichte am Ober-  
rand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ), 2004, UTC 09:00

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	477.96 $W/m^2$	134.40 $W/m^2$	0.96 $W/m^2$
Bildelemente ohne Flugverkehr	465.70 $W/m^2$	159.79 $W/m^2$	1.14 $W/m^2$
Bildelemente Gesamt	465.64 $W/m^2$	157.52 $W/m^2$	1.12 $W/m^2$

Unterschied der Mittelwerte =  $-0.05 \frac{W}{m^2}$ . Die Mittelwerte unterscheiden sich **nicht signifikant**.

### Statistiken UTC 12:00

Tabelle B.50: Statistiken der gesamten (kurzwellig + langwellig) ausgehenden Strahlungsflussdichte am Ober-  
rand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ), 2004, UTC 12:00

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	533.06 $W/m^2$	148.29 $W/m^2$	1.18 $W/m^2$
Bildelemente ohne Flugverkehr	533.45 $W/m^2$	146.76 $W/m^2$	1.16 $W/m^2$
Bildelemente Gesamt	533.82 $W/m^2$	146.75 $W/m^2$	1.16 $W/m^2$

Unterschied der Mittelwerte =  $+0.37 \frac{W}{m^2}$ . Die Mittelwerte unterscheiden sich **nicht signifikant**.

**Statistiken UTC 15:00**

*Tabelle B.51:* Statistiken der gesamten (kurzwellig + langwellig) ausgehenden Strahlungsflussdichte am Ober-  
rand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ), 2004, UTC 15:00

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	431.45 $W/m^2$	139.18 $W/m^2$	1.11 $W/m^2$
Bildelemente ohne Flugverkehr	447.90 $W/m^2$	142.56 $W/m^2$	1.15 $W/m^2$
Bildelemente Gesamt	446.39 $W/m^2$	143.05 $W/m^2$	1.15 $W/m^2$

Unterschied der Mittelwerte =  $-1.51 \frac{W}{m^2}$ . Die Mittelwerte unterscheiden sich **nicht signifikant**.

**Statistiken UTC 18:00**

*Tabelle B.52:* Statistiken der gesamten (kurzwellig + langwellig) ausgehenden Strahlungsflussdichte am Ober-  
rand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ), 2004, UTC 18:00

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	288.15 $W/m^2$	91.76 $W/m^2$	0.73 $W/m^2$
Bildelemente ohne Flugverkehr	324.10 $W/m^2$	102.45 $W/m^2$	0.82 $W/m^2$
Bildelemente Gesamt	320.70 $W/m^2$	102.40 $W/m^2$	0.82 $W/m^2$

Unterschied der Mittelwerte =  $-3.39 \frac{W}{m^2}$ . Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

**Statistiken UTC 21:00**

*Tabelle B.53:* Statistiken der gesamten (kurzwellig + langwellig) ausgehenden Strahlungsflussdichte am Ober-  
rand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ), 2004, UTC 21:00

Grundgesamtheit	Mittelwert	Standardabweichung	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Bildelemente mit Flugverkehr	239.17 $W/m^2$	42.22 $W/m^2$	0.33 $W/m^2$
Bildelemente ohne Flugverkehr	256.18 $W/m^2$	48.63 $W/m^2$	0.38 $W/m^2$
Bildelemente Gesamt	254.84 $W/m^2$	48.58 $W/m^2$	0.39 $W/m^2$

Unterschied der Mittelwerte =  $-1.34 \frac{W}{m^2}$ . Die Mittelwerte unterscheiden sich **signifikant**.

# Anhang C

## Anhang Statistik

In diesem Kapitel werden der Spearmansche Rang-Korrelationskoeffizient und der Vergleich zweier Mittelwerte, wie er in dieser Arbeit verwendet wurde dargestellt.

### C.1 Der Spearmansche Rang-Korrelationskoeffizient

In diesem Abschnitt wird der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Spearmansche Rang-Korrelationskoeffizient eingeführt und die Berechnung erläutert. Diese Beschreibung wurde größtenteils aus [SACHS 1969] S. 531 entnommen.

Sind Zusammenhänge zwischen nicht normalverteilten Reihen zu ermitteln, entstammt also die zweidimensionale Stichprobe  $(X_i, Y_i)$  einer beliebigen, stetigen Verteilung, dann läßt sich die Abhängigkeit von Y und X durch den **Spearmanschen Rang-Korrelationskoeffizienten** beurteilen:

$$r_s = 1 - \frac{6 \cdot \sum_i D_i^2}{n \cdot (n^2 - 1)} \quad (\text{C.1})$$

Zur Berechnung des Rangkorrelationskoeffizienten transformiert man beide Reihen durch Zuordnung von Rangzahlen in Rangreihen. D.h. die Stichprobenwerte werden der Größe nach aufsteigend geordnet und mit ihrer Ranggröße bezeichnet. Bei gleichen Werten, man spricht von sogenannten Bindungen (*engl. ties*), werden mittlere Rangplätze zugeordnet. Dann wird die Differenz  $D_i$  der zu einem Paar  $X_i, Y_i$  gehörenden zwei Ranggrößen gebildet und in Gleichung C.1 eingesetzt. Wenn die zwei Rangordnungen gleich sind, werden die Differenzen Null, d.h.  $r_s = 1$ . Wenn eine Rangordnung die Umkehrung der anderen ist, also vollständige Diskrepanz besteht, erhält man  $r_s = -1$ . Dieser Test gestattet die Beantwortung der Frage, ob eine positive oder eine negative Korrelation vorliegt.

Die Signifikanz von  $r_s$  wird für  $n \leq 30$  Wertepaare der Tabelle C.1 (aus [SACHS 1969] S. 391) entnommen, die für die einseitige Fragestellung und 6 Signifikanzniveaus die kritischen Werte  $|r_s|$  enthält. Ein beobachteter absoluter  $r_s$ -Wert ist bedeutsam, wenn er den Tabellenwert erreicht oder übersteigt. Soll geprüft werden, ob sich die Korrelation signifikant von Null unterscheidet, das Vorzeichen von  $r_s$  spielt jetzt keine Rolle, so ist das Signifikanzniveau zu verdoppeln (zweiseitige Fragestellung). D.h. ist der Korrelationswert größer als der in Spalte  $\alpha = 0.025$  angegebene Wert, gilt dass die Korrelation sich signifikant auf dem Signifikanzniveau  $\alpha = 0.05$  von Null unterscheidet<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup>Für große  $n$  ( $n > 30$ ) wurde im Rahmen dieser Arbeit die IDL-Funktion R\_CORRELATE [IDL5.6 2002] zur Prüfung der Signifikanz verwendet.

n	Signifikanzniveau $\alpha$					
	0,001	0,005	0,010	0,025	0,050	0,100
4	-	-	-	-	0,8000	0,8000
5	-	-	0,9000	0,9000	0,8000	0,7000
6	-	0,9429	0,8857	0,8286	0,7714	0,6000
7	0,9643	0,8929	0,8571	0,7450	0,6786	0,5357
8	0,9286	0,8571	0,8095	0,6905	0,5952	0,4762
9	0,9000	0,8167	0,7667	0,6833	0,5833	0,4667
10	0,8667	0,7818	0,7333	0,6364	0,5515	0,4424
11	0,8455	0,7545	0,7000	0,6091	0,5273	0,4182
12	0,8182	0,7273	0,6713	0,5804	0,4965	0,3986
13	0,7912	0,6978	0,6429	0,5549	0,4780	0,3791
14	0,7670	0,6747	0,6220	0,5341	0,4593	0,3626
15	0,7464	0,6536	0,6000	0,5179	0,4429	0,3500
16	0,7265	0,6324	0,5824	0,5000	0,4265	0,3382
17	0,7083	0,6152	0,5637	0,4853	0,4118	0,3260
18	0,6904	0,5975	0,5480	0,4716	0,3994	0,3148
19	0,6737	0,5825	0,5333	0,4579	0,3895	0,3070
20	0,6586	0,5684	0,5203	0,4451	0,3789	0,2977
21	0,6455	0,5545	0,5078	0,4351	0,3688	0,2909
22	0,6318	0,5426	0,4963	0,4241	0,3597	0,2829
23	0,6186	0,5306	0,4852	0,4150	0,3518	0,2767
24	0,6070	0,5200	0,4748	0,4061	0,3435	0,2704
25	0,5962	0,5100	0,4654	0,3977	0,3362	0,2646
26	0,5856	0,5002	0,4564	0,3894	0,3299	0,2588
27	0,5757	0,4915	0,4481	0,3822	0,3236	0,2540
28	0,5660	0,4828	0,4401	0,3749	0,3175	0,2490
29	0,5567	0,4744	0,4320	0,3685	0,3113	0,2443
30	0,5479	0,4665	0,4251	0,3620	0,3059	0,2400

Abbildung C.1: Signifikanz des Spearmanschen Rangkorrelationskoeffizienten  $r_s$ . Quelle: [SACHS 1969], S. 391, Tabelle 103. (n = Anzahl der Stichproben)

## C.2 Vergleich zweier Mittelwerte

In diesem Abschnitt wird der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Test auf signifikanten Unterschied zweier empirischer Mittelwerte normalverteilter Grundgesamtheiten aus [SACHS 1969] S. 266 vorgestellt.

Die Summe der Abweichungsquadrate  $\sum(x - \bar{x})$  wird im folgenden als  $Q$  bezeichnet. Man berechnet sie nach

$$Q = \sum x^2 - \left(\sum x\right)^2 / n \text{ bzw. } Q = (n - 1) \cdot s^2 \quad (\text{C.2})$$

mit  $s$  als Standardabweichung.

Für den Vergleich zweier Mittelwerte *ungleicher Stichprobenumfänge* ( $n_1 \neq n_2$ ) erhält man die Prüfgröße

$$\hat{t} = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\left[\frac{n_1 - n_2}{n_1 \cdot n_2}\right] \cdot \left[\frac{(n_1 - 1) \cdot s_1^2 + (n_2 - 1) \cdot s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}\right]}} \quad (\text{C.3})$$

bzw.

Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha$ für den zweiseitigen Test									
FG \ $\alpha$	0,50	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,002	0,001	0,0001
1	1,000	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	318,309	636,619	6366,198
2	0,816	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	22,327	31,598	99,992
3	0,765	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	10,214	12,924	28,000
4	0,741	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	7,173	8,610	15,544
5	0,727	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	5,893	6,869	11,178
6	0,718	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,208	5,959	9,082
7	0,711	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,785	5,408	7,885
8	0,706	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	4,501	5,041	7,120
9	0,703	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,297	4,781	6,594
10	0,700	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,144	4,587	6,211
11	0,697	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,025	4,437	5,921
12	0,695	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,930	4,318	5,694
13	0,694	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,852	4,221	5,513
14	0,692	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,787	4,140	5,363
15	0,691	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,733	4,073	5,239
16	0,690	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,686	4,015	5,134
17	0,689	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,646	3,965	5,044
18	0,688	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,610	3,922	4,966
19	0,688	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,579	3,883	4,897
20	0,687	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,552	3,850	4,837
21	0,686	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,527	3,819	4,784
22	0,686	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,505	3,792	4,736
23	0,685	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,485	3,767	4,693
24	0,685	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,467	3,745	4,654
25	0,684	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,450	3,725	4,619
26	0,684	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,435	3,707	4,587
27	0,684	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,421	3,690	4,558
28	0,683	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,408	3,674	4,530
29	0,683	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,396	3,659	4,506
30	0,683	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,385	3,646	4,482
35	0,682	1,306	1,690	2,030	2,438	2,724	3,340	3,591	4,389
40	0,681	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,307	3,551	4,321
45	0,680	1,301	1,679	2,014	2,412	2,690	3,281	3,520	4,269
50	0,679	1,299	1,676	2,009	2,403	2,678	3,261	3,496	4,228
60	0,679	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,232	3,460	4,169
70	0,678	1,294	1,667	1,994	2,381	2,648	3,211	3,435	4,127
80	0,678	1,292	1,664	1,990	2,374	2,639	3,195	3,416	4,096
90	0,677	1,291	1,662	1,987	2,368	2,632	3,183	3,402	4,072
100	0,677	1,290	1,660	1,984	2,364	2,626	3,174	3,390	4,053
120	0,677	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617	3,160	3,373	4,025
200	0,676	1,286	1,653	1,972	2,345	2,601	3,131	3,340	3,970
500	0,675	1,283	1,648	1,965	2,334	2,586	3,107	3,310	3,922
1000	0,675	1,282	1,646	1,962	2,330	2,581	3,098	3,300	3,906
$\infty$	0,675	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,090	3,290	3,891
FG \ $\alpha$	0,25	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005	0,001	0,0005	0,00005

Abbildung C.2: Signifikanzschranken der t-Verteilung Quelle: [SACHS 1969], S. 140, Tabelle 27. FG = Freiheitsgrad

$$\hat{t} = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\left[ \frac{n_1 - n_2}{n_1 \cdot n_2} \right] \cdot \left[ \frac{Q_1 + Q_2}{n_1 + n_2 - 2} \right]}} \tag{C.4}$$

mit  $n_1 + n_2 - 2$  Freiheitsgraden. Geprüft wird die Nullhypothese ( $\mu_1 = \mu_2$ ) auf Gleichheit der den beiden Stichproben zugrunde liegenden Mittelwerte der Grundgesamtheiten bei gegebener Gleichheit der Varianzen. Für den Fall gleicher Stichprobenumfänge ( $n_1 = n_2$ ) vereinfacht sich der Prüfquotient zu

$$\hat{t} = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{Q_1 + Q_2}{n \cdot (n-1)}}} = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{s_1^2 + s_2^2}{n}}} \tag{C.5}$$

mit  $2n - 1$  Freiheitsgraden, wobei  $n = n_1 = n_2$ . Erreicht oder überschreitet der Prüfquotient die Signifikanzschranke, so wird die Nullhypothese verworfen ( $\mu_1 \neq \mu_2$ ). Ist der Prüfquotient kleiner als die Schranke, dann kann die Nullhypothese  $\mu_1 = \mu_2$  nicht abgelehnt werden.

Die Signifikanzschranken können Tabelle C.2 entnommen werden. Für ein Signifikanzniveau  $\alpha = 0.05$  und  $FG = 1000$  ergibt sich  $t = 1.962 \approx 2$ . Ist  $\hat{t} < t = 2$  kann die Nullhypothese nicht verworfen werden.



## Anhang D

# Anhang Simulation von SEVIRI mit SimSat

Im Rahmen dieser Arbeit wurde in Zusammenarbeit mit Dr. Luca Bugliaro eine ausführliche theoretische Studie der thermischen SEVIRI Kanäle und möglicher Zirruserkennungstests durchgeführt. Für verschiedene Szenarien wurden Simulationen mit Hilfe des Satellitensimulators **SimSat** durchgeführt.

### D.1 Der Satelliten Simulator: SimSat

Der Satelliten Simulator SimSat ist ein Werkzeug zur Simulation von Strahldichten bzw. Reflektivitäten oder Helligkeitstemperaturen am Oberrand der Atmosphäre. Mit Hilfe dieses Werkzeugs können Messungen von abbildenden Radiometern wie SEVIRI simuliert werden. Die Strahlungstransferrechnungen werden mit Hilfe des libRadtran Pakets [MAYER und KYLLING 2005] durchgeführt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde SimSat verwendet, um für verschiedene Szenarien Messungen der thermischen SEVIRI Kanäle zu simulieren. Die simulierten Helligkeitstemperaturen bzw. Helligkeitstemperaturdifferenzen der Kanäle wurden in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern untersucht. Die Ergebnisse werden in diesem Abschnitt vorgestellt. Die verwendeten Parametrisierungen für Eiswolken basieren dabei auf [FU 1996], [FU et al. 1998].

Es wurde die Sensitivität der Schwellenwerte verschiedener Zirruserkennungstests auf atmosphärische Bedingungen und Wolkeneigenschaften untersucht. Mit Hilfe der Simulationen war es möglich die Messungen von SEVIRI besser zu interpretieren und zu verstehen.

### D.2 Das libRadtran Paket

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Strahlungstransferrechnungen wurden mit Hilfe des **libRadtran** Pakets durchgeführt [MAYER und KYLLING 2005]. Diese Berechnungen waren notwendig für Sensitivitätsstudien und für die Entwicklung der Werkzeuge zur Bestimmung von Strahlungsflussdichten. Das libRadtran Paket ist eine Zusammenstellung von Werkzeugen zur Berechnung des Strahlungstransfers in der Atmosphäre. Das Hauptwerkzeug ist das **uvspec** Programm. Es dient zur Berechnung von Strahldichten, Strahlungsflussdichten und aktinischen Strahlungsflüssen im solaren und terrestrischem Strahlungsspektrum. Das uvspec Programm und weitere Werkzeuge des libRadtran Pakets, sowie eine ausführliche Dokumentation sind unter <http://www.libradtran.org> verfügbar.

## D.3 Simulationsparameter

Zur Kalibrierung der auf SEVIRI Daten basierenden Zirrentests wurden Simulationen für Zirren und Wasserwolken unter verschiedenen Bedingungen für unterschiedliche Satellitenzenitwinkeln durchgeführt. Dabei wurden für fünf atmosphärische Profile Temperaturen, optische Dicke  $\tau$  und der Effektivradius  $R_{eff}$  variiert. Desweiteren wurden die Höhe der Wolkenoberkante und die geometrische Wolkendicke variiert, wobei zu beachten ist, dass die geometrische Wolkendicke bei konstanter optischer Dicke mit dem Eis-Wasser-Pfad LWC zusammenhängt. Die Simulationen wurden für fünf Fälle durchgeführt.

1. wolkenfreier Fall
2. Zirus
3. Zirus über dicker Wasserwolke
4. Zirus über dünner Wasserwolke
5. Wasserwolke

Simuliert wurden die für die Zirrenerkennung vorgesehenen Kanäle im thermischen Infrarot  $6.2\mu m$ ,  $7.3\mu m$ ,  $8.7\mu m$ ,  $10.8\mu m$ ,  $12.0\mu m$ ,  $13.4\mu m$ . Auf den Messdaten dieser Kanäle beruhen die operativen Zirrentests.

Die simulierten Ergebnisse sind als IDL-SAVE Dateien gespeichert und können dadurch bequem mit *restore* in IDL eingelesen und ausgewertet werden. Die IDL-SAVE Dateien enthalten eine mehrdimensionale Matrix, wobei die Indizes die genannten Parameter repräsentieren, die sich je nach oben genanntem Fall unterscheiden.

Die Daten liegen hierarchisch strukturiert vor. Die Verzeichnisstruktur ist wie folgt aufgebaut:

1. Szenarien: wolkenfrei, Zirus, Zirus über Wasserwolke, ...
2. Atmosphärenprofile: MidLatitudeSummer, MidLatitudeWinter, ...
3. Kanäle: CH062, CH073, CH087, ...

D.h. die Dateistruktur ist den Szenarien entsprechend aufgebaut. Diese Verzeichnisse repräsentieren die Atmosphärenprofile, welche sich wiederum in die simulierten Kanäle aufspalten. Die gespeicherten Daten enthalten die berechneten Strahldichten und die Eingangsparameter. Die Daten liegen auch im NetCDF-Format vor.

Die Szenarien und die Parameter sind so ausgewählt, dass die wichtigsten Szenarien repräsentiert werden. Gleichzeitig soll der Rechenaufwand minimal gehalten werden. Die Simulationsszenarien können beliebig erweitert und verfeinert werden.

## D.4 Simulationsergebnisse

### D.4.1 Simulation wolkenfreier Fall

Im wolkenfreien Fall werden für unterschiedliche Atmosphärenprofile die Bodentemperaturen und geeignete Satellitenzenitwinkel variiert. Das Ergebnisse

$$M = M(T, \Theta)$$

wird als IDL-Matrix in einer IDL-SAVE Datei abgelegt.

Die Indizes sind:

1. Bodentemperatur T in K
2. Satellitenzenitwinkel  $\Theta$

Die zugehörigen Werte der Indizes sind ebenfalls gespeichert und entsprechen den Werten in Tabelle

D.1. Die Ergebnismatrix enthält Strahldichten in  $\frac{W}{m^2 sr}$ .

Tabelle D.1: Simulationsparameter wolkenfreier Fall

Atmosphärenprofile	Bodentemperatur	T	Satellitenzenitwinkel $\Theta$
Midlatitude Summer	283 K	(10° C)	80°
	288 K	(15° C)	75°
	293 K	(20° C)	70°
	298 K	(25° C)	65°
	303 K	(30° C)	60°
			55°
			50°
			45°
			40°
			35°
		30°	
Midlatitude Winter	243 K	(-30° C)	80°
	253 K	(-20° C)	75°
	263 K	(-10° C)	70°
	273 K	(0° C)	65°
	283 K	(10° C)	60°
	293 K	(20° C)	55°
			50°
			45°
			40°
			35°
		30°	
Tropical (Warm+Feucht)	283 K	(10° C)	60°
	293 K	(20° C)	50°
	303 K	(30° C)	40°
			30°
			20°
			10°
Subartical Summer	278 K	(5° C)	80°
	288 K	(15° C)	75°
			70°
			65°
Subartical Winter	233 K	(-40° C)	80°
	243 K	(-30° C)	75°
	253 K	(-20° C)	70°
	263 K	(-10° C)	65°

## D.4.1.1 Simulationsergebnisse

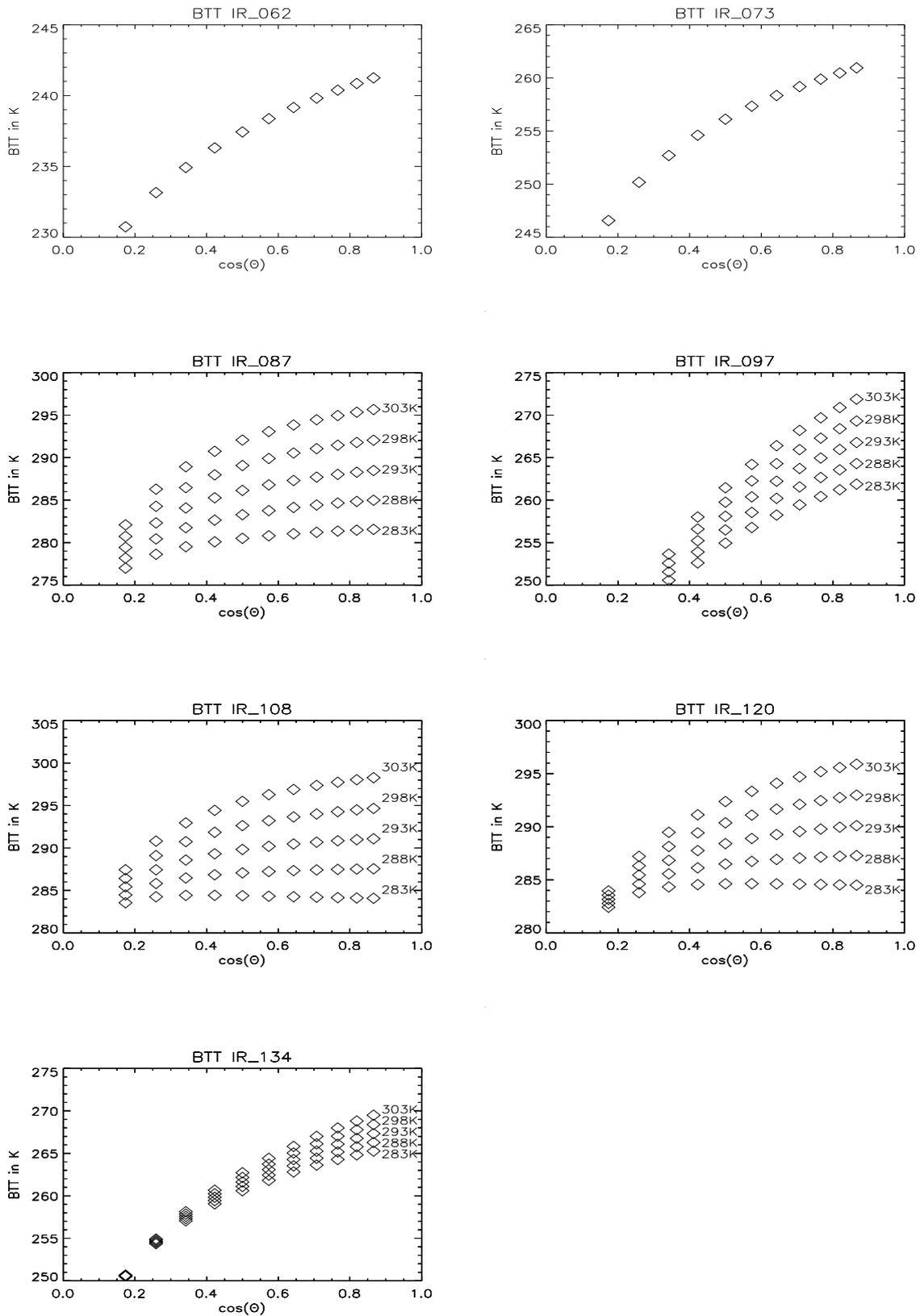


Abbildung D.1: Ergebnisse der Simulation der thermischen MSG Kanäle für den wolkenfreien Fall unter Annahme einer *Midlatitude Summer* Atmosphäre. Dargestellt ist die Helligkeitstemperatur in Abhängigkeit vom Satellitenzenitwinkel  $\cos(\theta)$ .

D.4.1.2 Simulationsergebnisse der Tests

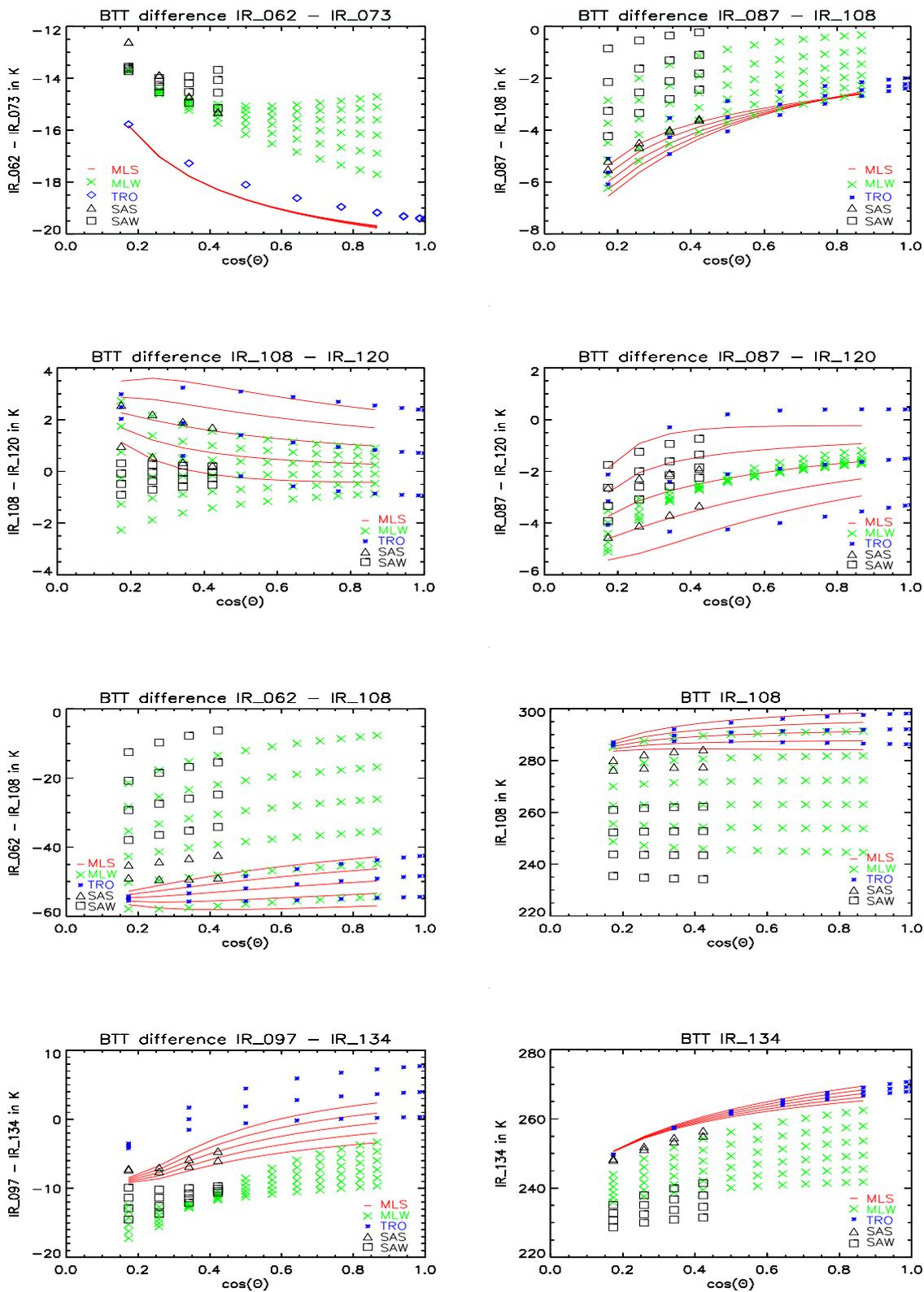


Abbildung D.2: Ergebnisse der Simulation der Tests für den wolkenfreien Fall für verschiedene Atmosphärenprofile, MLS - Midlatitude Summer, MLW - Midlatitude Winter, TRO - Tropical, SAS - Subarctic Summer, SAW - Subarctic Winter. Dargestellt die Helligkeitstemperaturdifferenz in Abhängigkeit vom Satellitenzenitwinkel  $\cos(\theta)$ . Zusätzlich wird die Bodentemperatur variiert.

### D.4.2 Simulation Zirrus

Im Fall Zirrus werden für unterschiedliche Atmosphärenprofile, die Bodentemperaturen und geeignete Satellitenzenitwinkel variiert. Als weitere Parameter kommen die optische Dicke, der Effektivradius der Eispartikel, die Höhe der Wolkenoberkante und die geometrische Dicke der Zirruswolke hinzu. Die Form der Eispartikel wird als hexagonal angenommen.

Das Ergebnis ist eine 6-dimensionale Matrix

$$M = M(T, \Theta, \tau_{0.55}, R_{eff}, CTA, CGT)$$

und wird als IDL-Matrix in einer IDL-SAVE Datei abgelegt.

Tabelle D.2: Simulationsparameter Zirren

Atmosphärenprofile	T	$\Theta$	$\tau_{0.55}$	$R_{eff}$	Wolkenoberkante <i>CTA</i>	geometrische Dicke <i>CGT</i>
Midlatitude Summer	283 K	80°	0.01	6 $\mu m$	12 km	3 km
	288 K	75°	0.05	8 $\mu m$	11 km	2 km
	293 K	70°	0.1	10 $\mu m$	9 km	1 km
	298 K	65°	0.5	20 $\mu m$	8 km	0.5 km
	303 K	60°	1	40 $\mu m$	6 km	0.1 km
		55°	2			
		50°	3			
		45°	4			
		40°	5			
		35°	10			
Midlatitude Winter	243 K	80°	40			
	253 K	75°				
	263 K	70°				
	273 K	65°				
	283 K	60°				
	293 K	55°				
		50°				
		45°				
		40°				
		35°				
Tropical (Warm+Feucht)	283 K	60°				
	293 K	50°				
	303 K	40°				
		30°				
		20°				
Subartical Summer	278 K	80°				
	288 K	75°				
		70°				
		65°				
Subartical Winter	233 K	80°				
	243 K	75°				
	253 K	70°				
	263 K	65°				

Die Indizes sind:

1. Bodentemperatur:  $T$  in K
2. Satellitenzenitwinkel:  $\Theta$
3. Optische Dicke der Zirruswolke bei  $0.55 \mu\text{m}$ :  $\tau_{0.55}$
4. Effektivradius der Eispartikel:  $R_{eff}$
5. Höhe der Wolkenoberkante der Zirruswolke:  $CTA$
6. Geometrische Dicke der Zirruswolke:  $CGT$

Die zugehörigen Werte der Indizes wurden gespeichert und entsprechen den Werten in Tabelle D.2. Die Ergebnismatrix enthält Strahllichten in  $\frac{W}{m^2 sr}$ .

Der Eis-Wasser-Gehalt der Zirruswolke, der als Funktion von der optischen Dicke  $\tau_{0.55}$  und der geometrischen Dicke  $CGT$  des Zirrus berechnet werden muss, wird ebenfalls gespeichert.

#### D.4.2.1 Simulationsergebnisse Zirruserkennungstests, Fall Zirrus

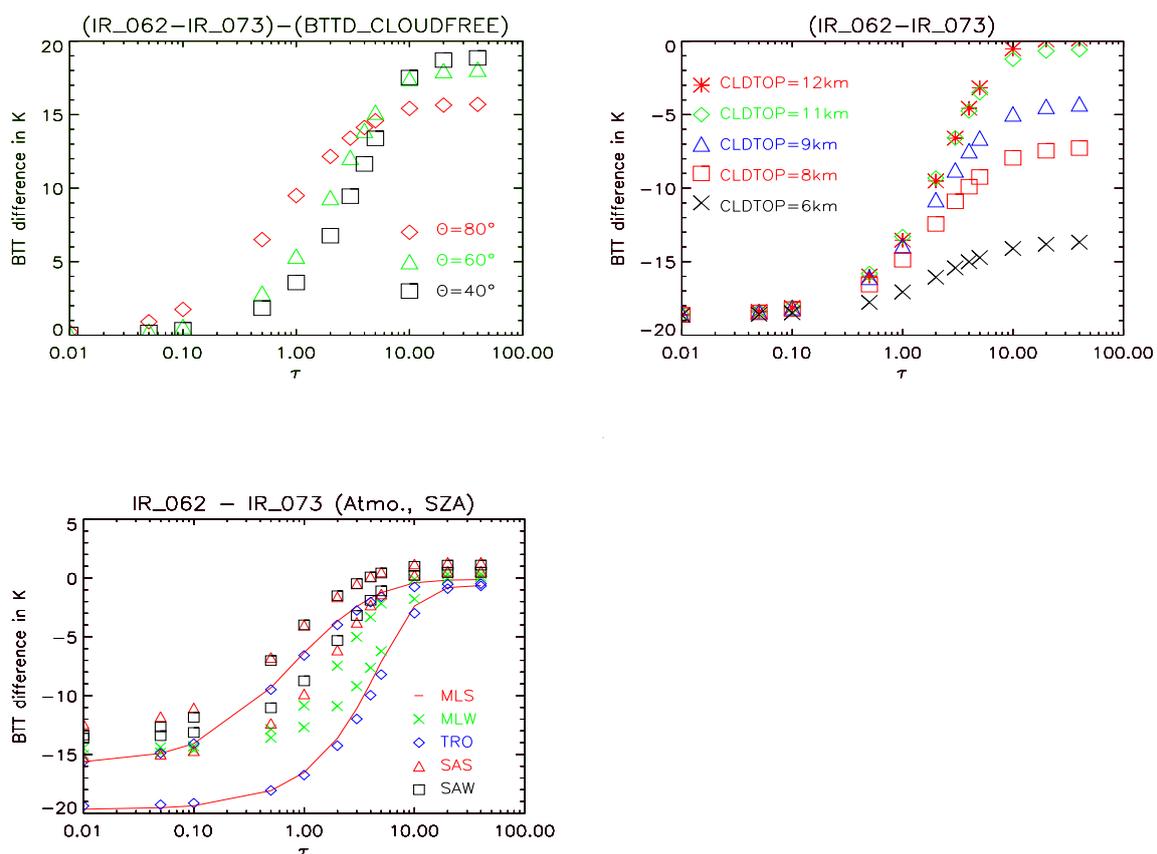


Abbildung D.3: Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirruswolken. Dargestellt ist Helligkeitstemperaturdifferenz der Wasserdampfkanäle WV\_062 und WV\_073 in Abhängigkeit von der optischen Dicke  $\tau$ . Zusätzlich variiert wird (oben links) der Satellitenzenitwinkel  $\theta$ , (oben rechts) die Höhe der Zirrusoberkante, (unten) Atmosphäre. Im unteren Bild sind die Ergebnisse für zwei Satellitenzenitwinkel dargestellt. Im Bild oben links wird von der Helligkeitstemperaturdifferenz der beiden Kanäle die Helligkeitstemperaturdifferenz für den wolkenfreien Fall subtrahiert.

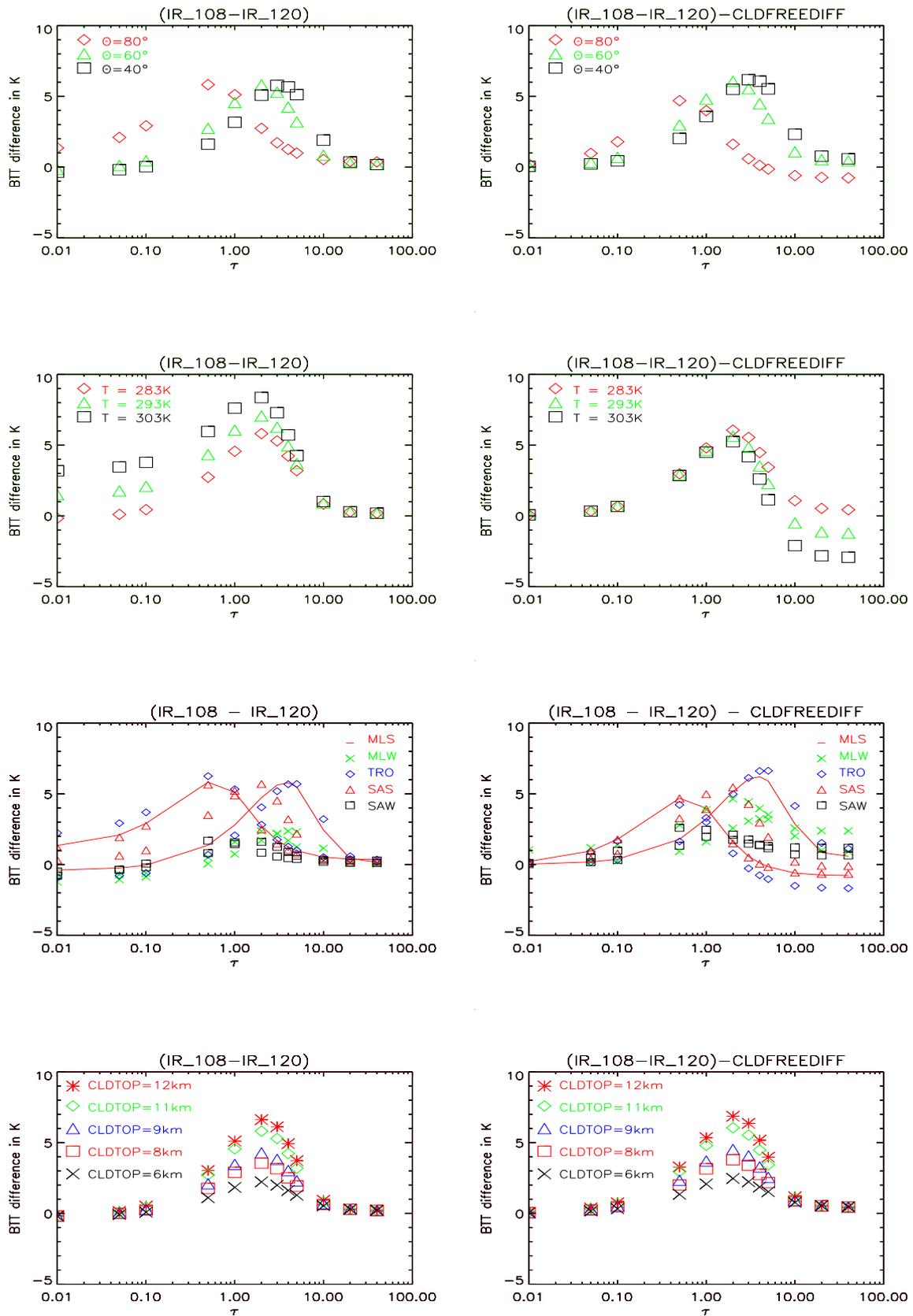


Abbildung D.4: Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirruswolken. Links dargestellt ist Helligkeitstemperaturdifferenz der Fensterkanäle IR\_108 und IR\_120. Rechts wird die Helligkeitstemperaturdifferenz für den wolkenfreien Fall von der Kanaldifferenz mit Zirruswolke subtrahiert. Variiert wird (von oben nach unten) der Satellitenzenitwinkel, die Bodentemperatur, Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) und die Höhe der Zirrusoberkante.

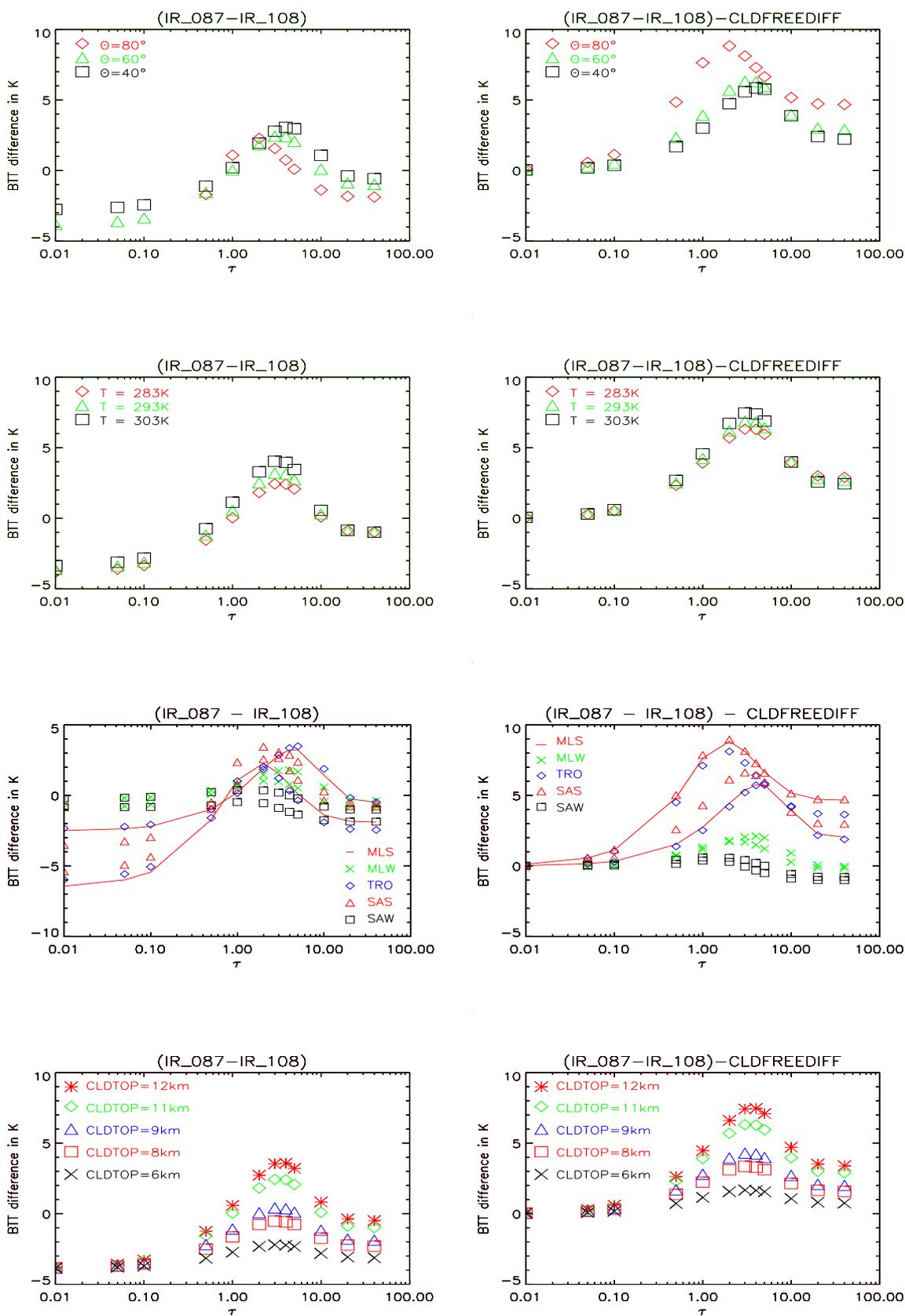


Abbildung D.5: Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirruswolken. Links dargestellt ist Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR\_087 und IR\_108. Rechts wird die Helligkeitstemperaturdifferenz für den wolkenfreien Fall von der Kanaldifferenz mit Zirruswolke subtrahiert. Variiert werden (von oben nach unten) der Satellitenzenitwinkel, die Bodentemperatur, Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) und die Höhe der Zirrusoberkante.

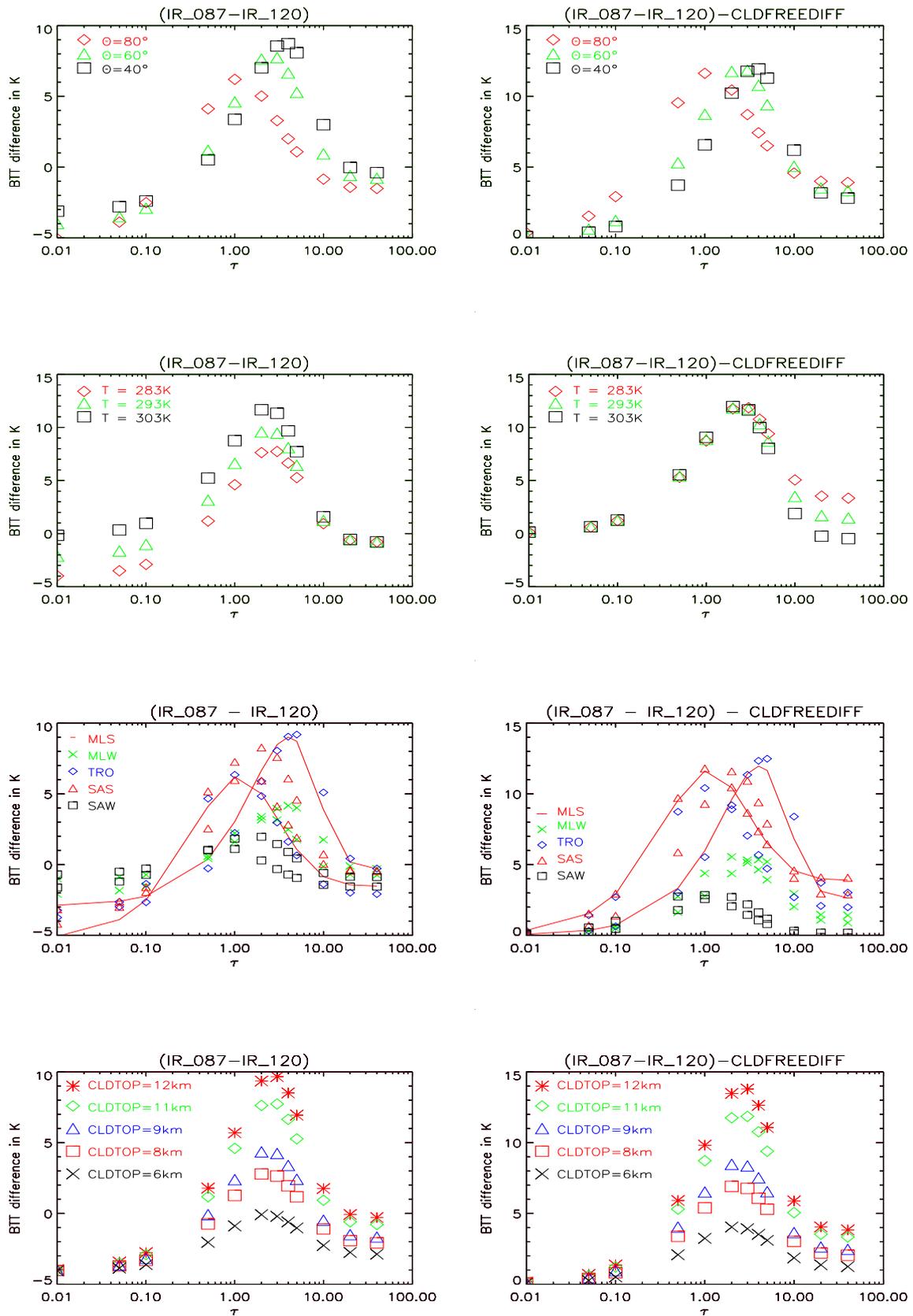


Abbildung D.6: Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirruswolken. Links dargestellt ist Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR\_087 und IR\_120. Rechts wird die Helligkeitstemperaturdifferenz für den wolkenfreien Fall von der Kanaldifferenz mit Zirruswolke subtrahiert. Variiert werden (von oben nach unten) der Satellitenzenitwinkel, die Bodentemperatur, Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) und die Höhe der Zirrusoberkante.

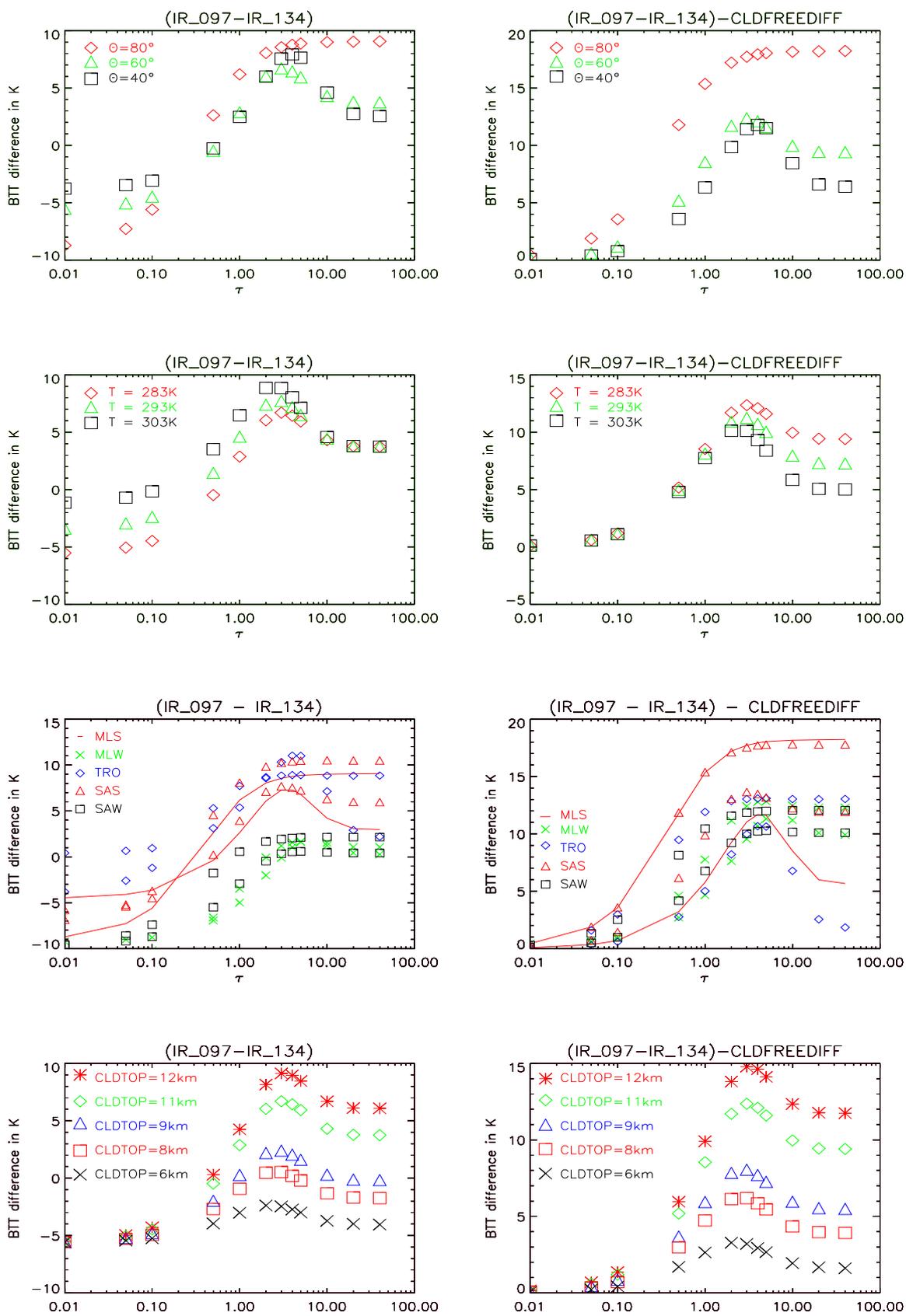


Abbildung D.7: Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirruswolken. Links dargestellt ist Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR\_097 und IR\_134. Rechts wird die Helligkeitstemperaturdifferenz für den wolkenfreien Fall von der Kanaldifferenz mit Zirruswolke subtrahiert. Variiert werden (von oben nach unten) der Satellitenzenitwinkel, die Bodentemperatur, Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) und die Höhe der Zirrusoberkante.

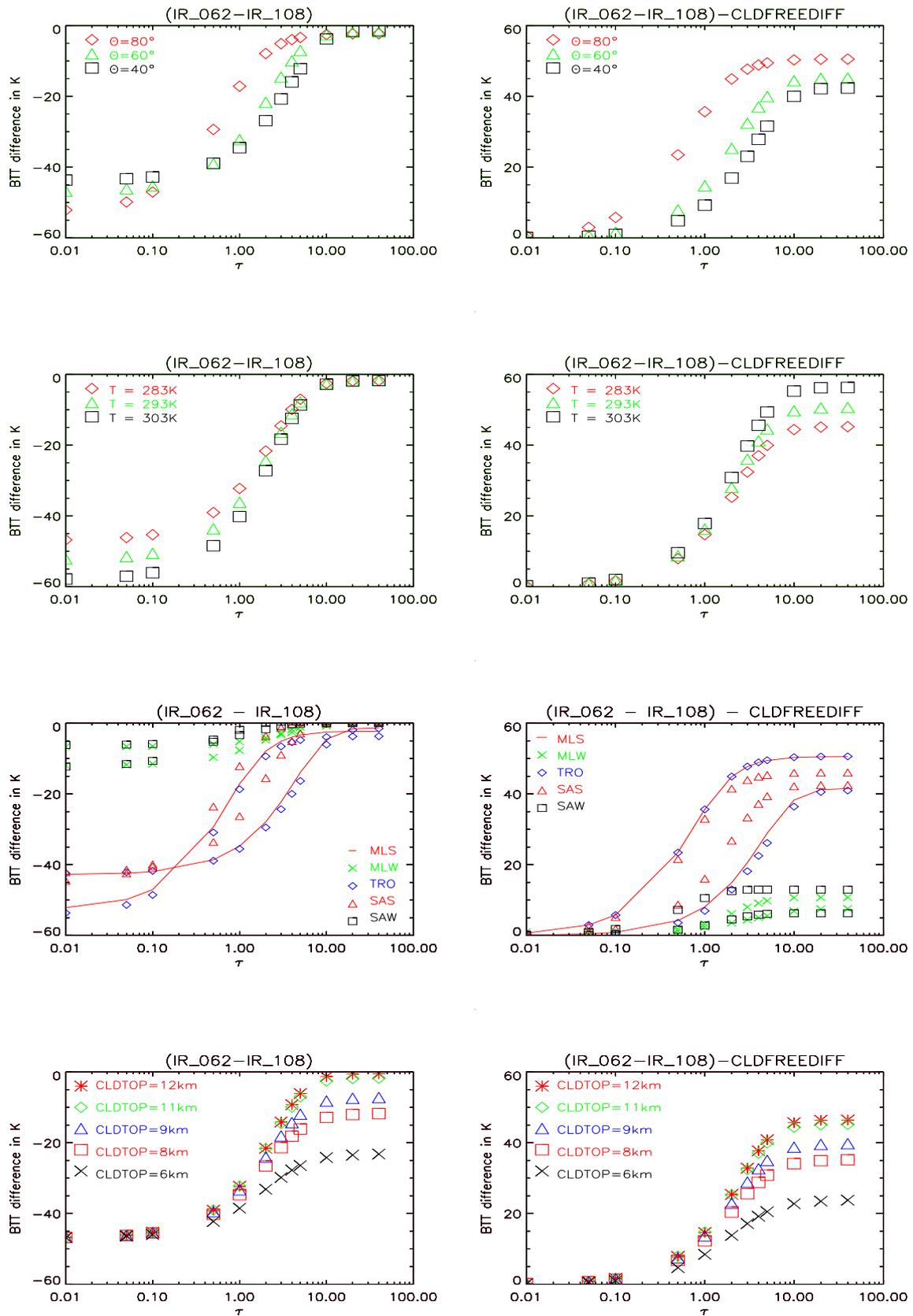


Abbildung D.8: Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirruswolken. Links dargestellt ist Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle WV\_062 und IR\_108. Rechts wird die Helligkeitstemperaturdifferenz für den wolkenfreien Fall von der Kanaldifferenz mit Zirruswolke subtrahiert. Variiert werden (von oben nach unten) der Satellitenzenitwinkel, die Bodentemperatur, Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) und die Höhe der Zirrusoberkante.

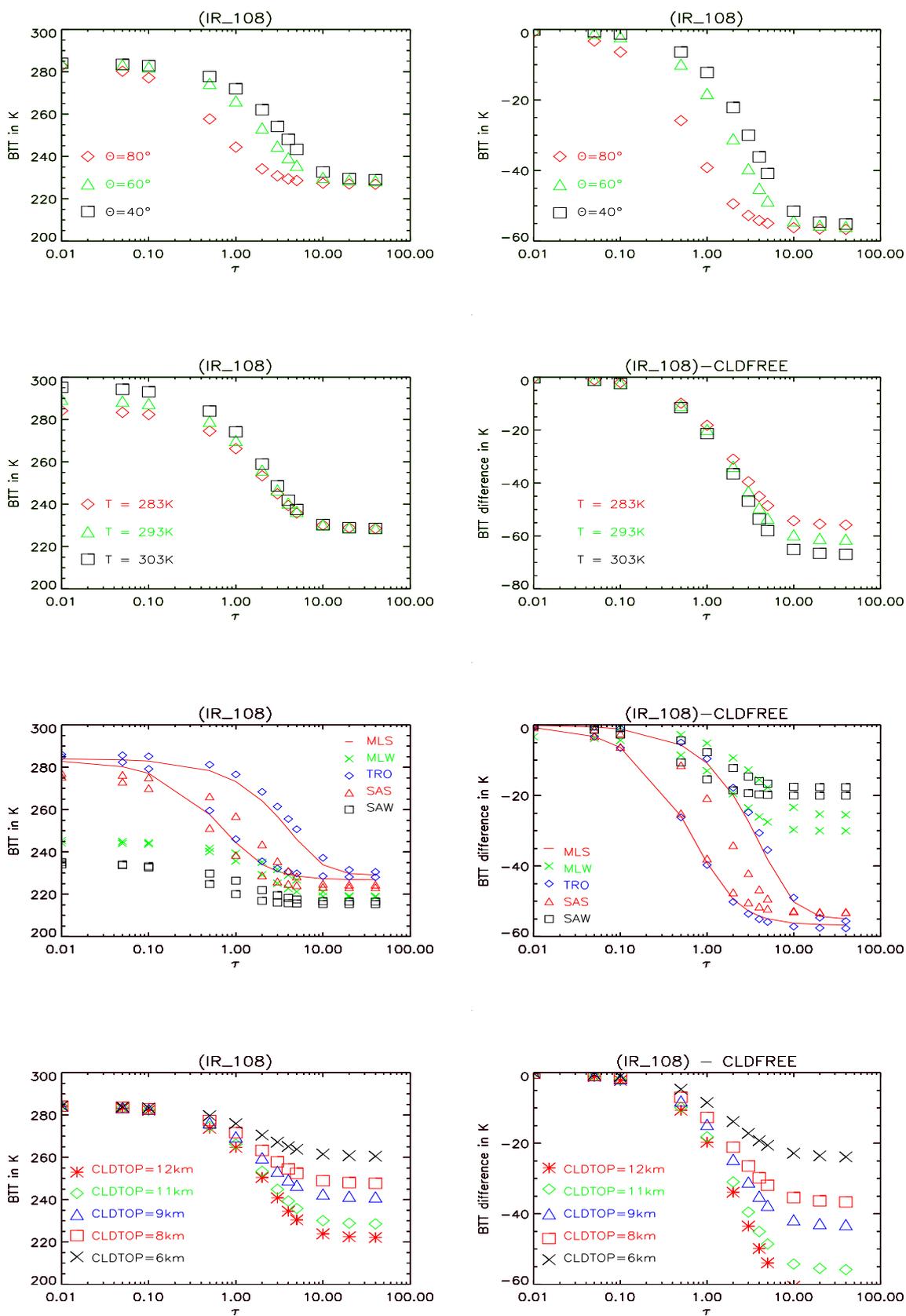


Abbildung D.9: Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirruswolken. Links dargestellt ist Helligkeitstemperatur des Kanals IR\_108. Rechts wird die Helligkeitstemperatur für den wolkenfreien Fall von der Helligkeitstemperatur mit Zirruswolke subtrahiert. Variiert werden (von oben nach unten) der Satellitenzenitwinkel, die Bodentemperatur, Atmosphären (für zwei Satellitenzenitwinkel) und die Höhe der Zirrusoberkante.

### D.4.3 Simulation Zirrus über dicker Wasserwolke

In diesem Szenario wird angenommen, dass sich unter der Zirruswolke sich optisch dicke Wasserwolke befindet. Die Wasserwolke ist so gewählt, dass die Bodentemperatur vernachlässigbar ist. An ihre Stelle tritt die Temperatur der Wasserwolke, die hier nicht direkt variiert, sondern aus der Variation der Höhe der Wolkenoberkante der Wasserwolke berechnet wird.

Tabelle D.3: Simulationsparameter Zirren über dicker Wasserwolke

Atmosphärenprofile	Wasserwolkenoberkante	$\Theta$	$\tau_{0.55}$	$R_{eff}$	Wolkenoberkante CTA	geometrische Dicke CGT
Midlatitude Summer	1 km	80°	0.01	6 $\mu m$	12 km	3 km
	2 km	75°	0.05	8 $\mu m$	11 km	2 km
	3 km	70°	0.1	10 $\mu m$	9 km	1 km
	4 km	65°	0.5	20 $\mu m$	8 km	0.5 km
		60°	1	40 $\mu m$	6 km	0.1 km
		55°	2			
		50°	3			
		45°	4			
		40°	5			
		35°	10			
		30°	20			
			40			
	Midlatitude Winter	1 km	60°			
2 km		55°				
3 km		50°				
4 km		45°				
		40°				
		35°				
		30°				
		25°				
		20°				
		15°				
	10°					
Tropical (Warm+Feucht)	1 km	60°				
	2 km	50°				
	3 km	40°				
	4 km	30°				
		20°				
	10°					
Subartical Summer	1 km	80°				
	2 km	75°				
	3 km	70°				
	4 km	65°				
Subartical Winter	1 km	80°				
	2 km	75°				
	3 km	70°				
	4 km	65°				

Die anderen Eigenschaften der Wasserwolke werden nicht variiert und werden angenommen mit:

1. Optische Dicke der Wasserwolke bei 0.55  $\mu m$ ,  $\tau_{0.55}$ : 20
2. Effektivradius der Partikel,  $R_{eff}$ : 10 $\mu m$
3. Form der Partikel: sphärisch
4. Geometrische Dicke der Wasserwolke,  $CGTW$ : 1 km

Die Zirruspartikelform wird als hexagonal angenommen. Die Variationsparameter der Simulation sind: unterschiedliche Atmosphärenprofile, die Höhe der Oberkante der Wasserwolke, der Satellitenzenitwinkel, die optische Dicke der Zirruswolke, der Effektivradius der Eispartikel der Zirruswolke, die Höhe der Wolkenoberkante und die geometrische Dicke der Zirruswolke.

Das Ergebnis ist eine 6-dimensionale Matrix

$$M = M(T, \Theta, \tau_{0.55}, R_{eff}, CTA, CGT)$$

und wird als IDL-Matrix in einer IDL-SAVE Datei abgelegt.

Die Indizes:

1. Höhe der Wasserwolkenoberkante:  $WTC A$  in km
2. Satellitenzenitwinkel:  $\Theta$  in  $^\circ$
3. Optische Dicke der Zirruswolke bei  $0.55 \mu m$ :  $\tau_{0.55}$
4. Effektivradius der Eispartikel:  $R_{eff}$  in  $\mu m$
5. Höhe der Wolkenoberkante der Zirruswolke:  $CT A$  in km
6. Geometrische Dicke der Zirruswolke:  $CG T$  in km

Die zugehörigen Werte der Indizes sind ebenfalls gespeichert und entsprechen den Werten in Tabelle D.3. Die Ergebnismatrix enthält Strahldichten in  $\frac{W}{m^2 sr}$ .

Der Eis-Wasser-Gehalt der Zirruswolke, der als Funktion von der optischen Dicke  $\tau_{0.55}$  und der geometrischen Dicke  $CG T$  des Zirrus berechnet werden muss, wird ebenfalls gespeichert. Desweiteren wird die Temperatur der Wasserwolke gespeichert, die abhängig von der Höhe der Wolkenoberkante der Wasserwolke variiert.

### D.4.3.1 Simulationsergebnisse Zirruserkennungstests, Fall Zirrus über dicker Wasserwolke

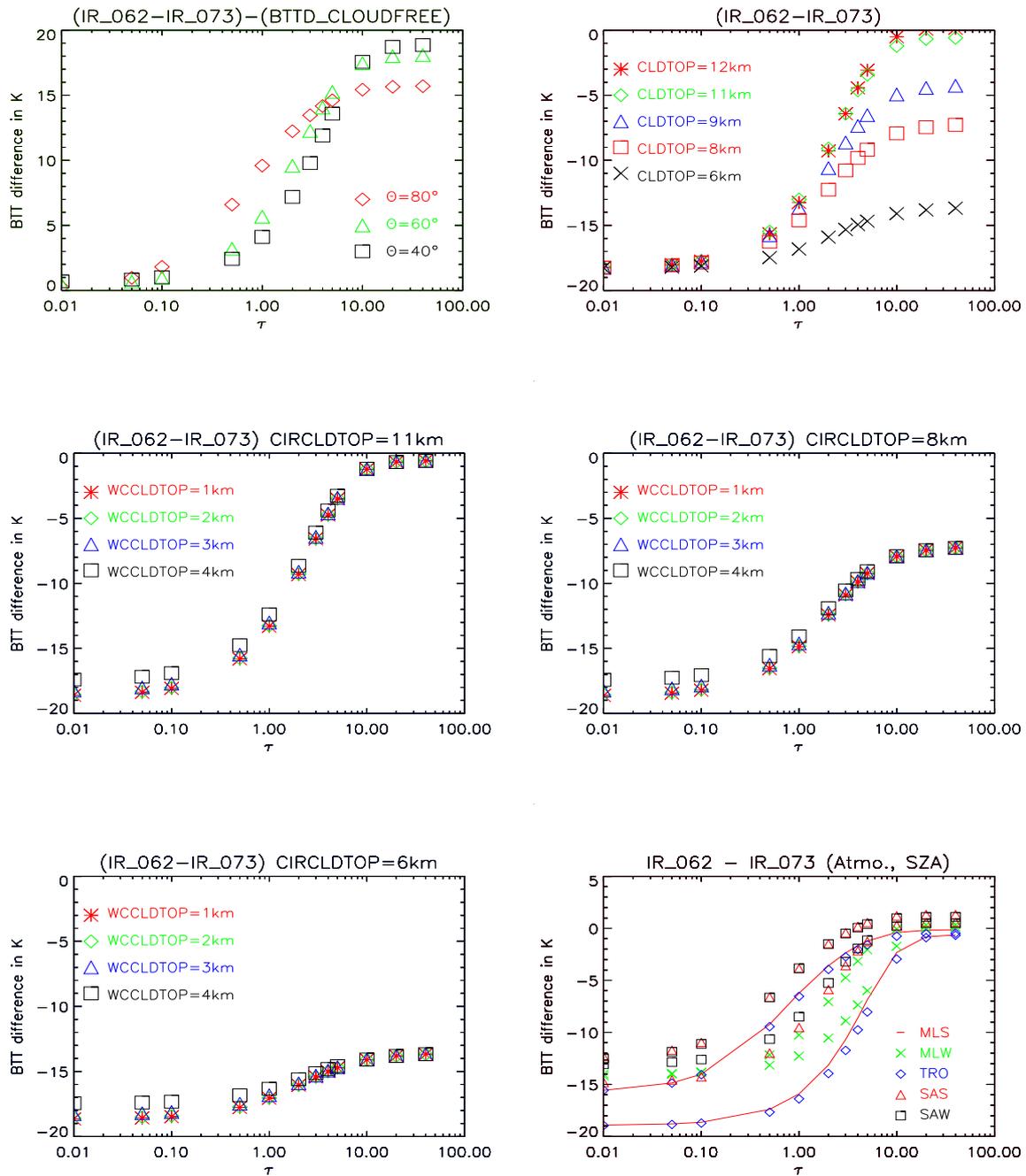


Abbildung D.10: Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirrus über dicker Wasserwolke in Abhängigkeit von der optischen Dicke  $\tau$ . Links oben dargestellt ist Helligkeitstemperaturdifferenz der Wasserdampfkanäle WV\_062 und WV\_073 minus der Helligkeitstemperaturdifferenz für eine wolkenfreie Atmosphäre. Variiert wird der Satellitenzenitwinkel  $\theta$ . Rechts oben wird die Höhe der Zirrusoberkante variiert. Mitte links, mitte rechts und unten links werden die Höhe der Wolkenoberkante der Wasserwolke variiert. Die Höhen der Zirrusoberkanten werden mit 11km, 8km und 6km festgelegt. Unten rechts wird die Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) variiert.

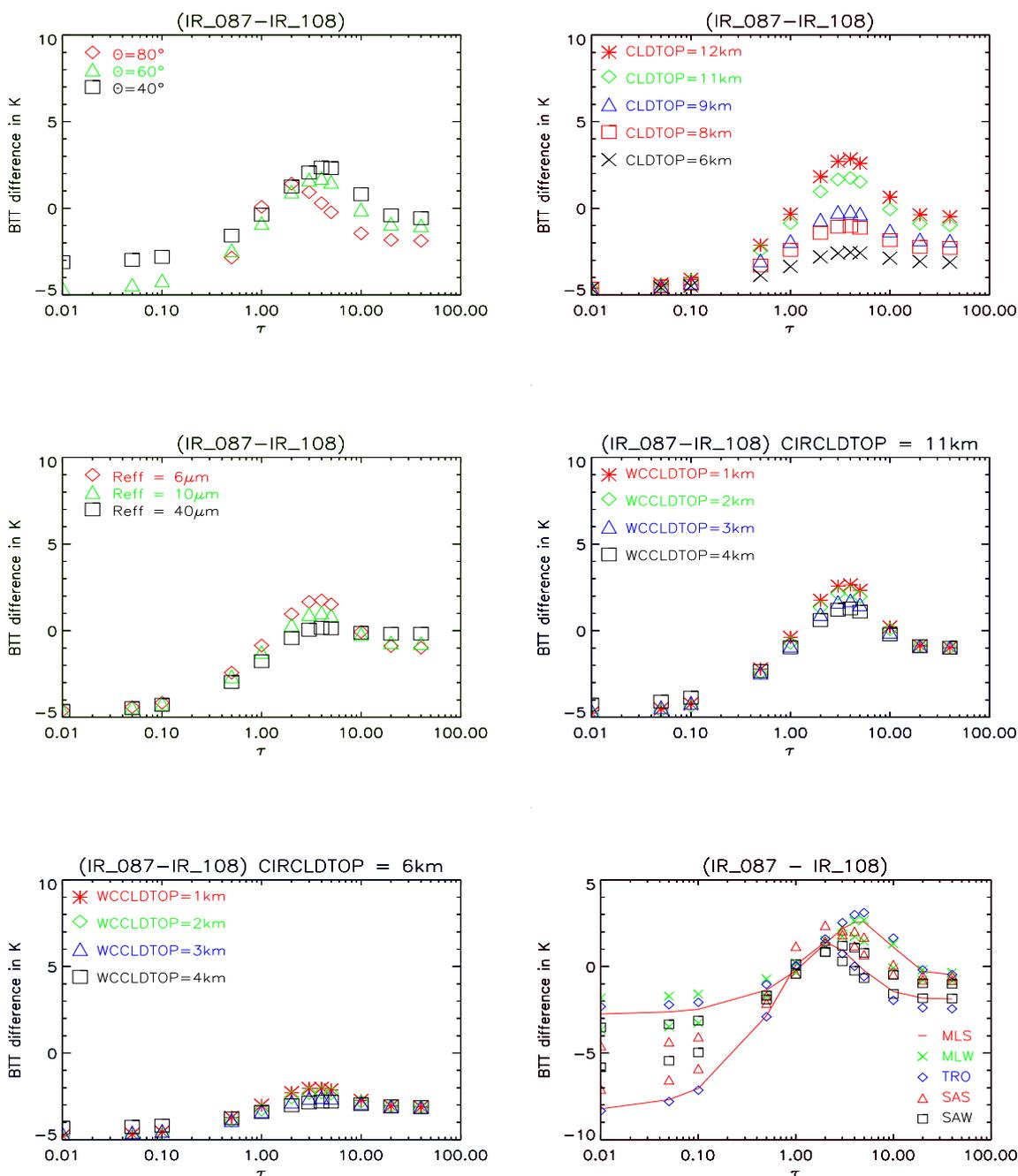


Abbildung D.11: Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirrus über dicker Wasserwolke. Dargestellt ist die Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR\_087 und IR\_108 in Abhängigkeit von der optischen Dicke  $\tau$ . Links oben wird der Satellitenzenitwinkel  $\theta$  variiert. Rechts oben wird die Höhe des Zirrusoberkante variiert. Mitte links wird der Effektivradius variiert. Mitte rechts und unten links werden die Höhen der Wolkenoberkante der Wasserwolke variiert. Die Höhen der Zirrusoberkanten werden mit 11km, 8km und 6km festgelegt. Unten rechts wird die Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) variiert.

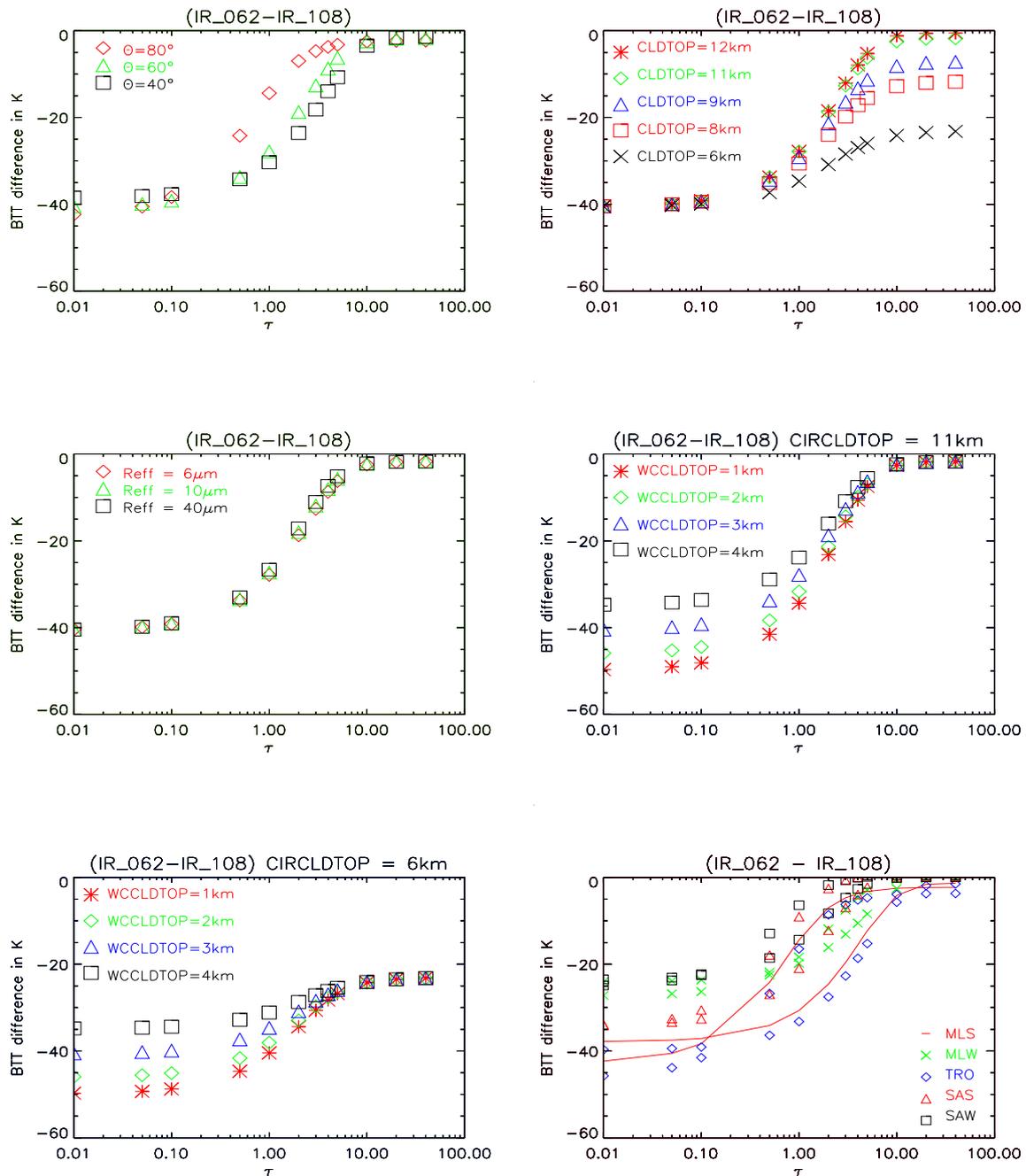


Abbildung D.12: Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirrus über dicker Wasserwolke. Dargestellt ist die Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR\_062 und IR\_108 in Abhängigkeit von der optischen Dicke  $\tau$ . Links oben wird der Satellitenzenitwinkel  $\theta$  variiert. Rechts oben wird die Höhe des Zirrusoberkante variiert. Mitte links wird der Effektivradius variiert. Mitte rechts und unten links werden die Höhe der Wolkenoberkante der Wasserwolke variiert. Die Höhe der Zirrusoberkanten werden mit 11km, 8km und 6km festgelegt. Unten rechts wird die Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) variiert.

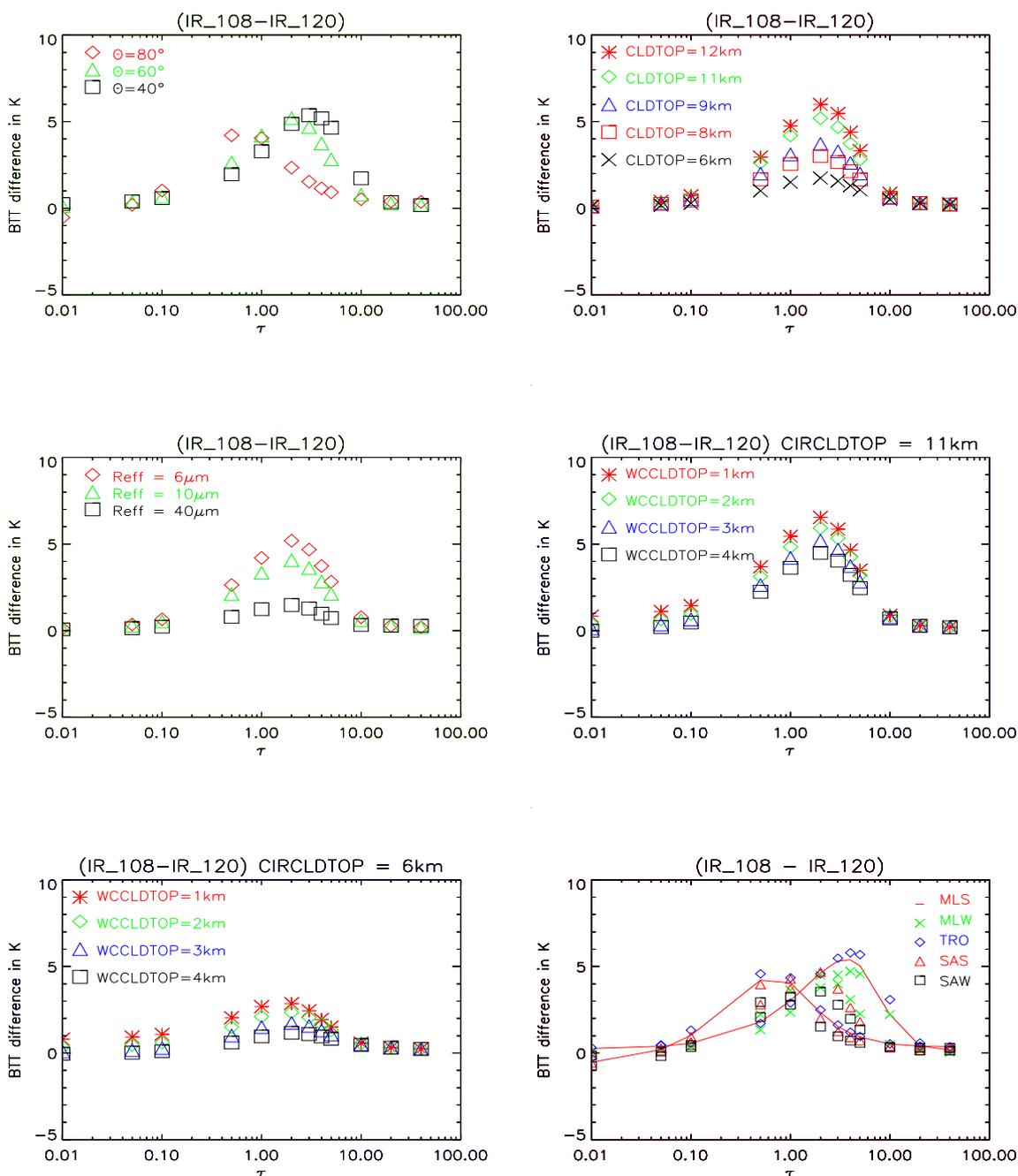


Abbildung D.13: Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirrus über dicker Wasserwolke. Dargestellt ist die Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR\_108 und IR\_120 in Abhängigkeit von der optischen Dicke  $\tau$ . Links oben wird der Satellitenzenitwinkel  $\theta$  variiert. Rechts oben wird die Höhe des Zirrusoberkante variiert. Mitte links wird der Effektivradius variiert. Mitte rechts und unten links wird die Höhe der Wolkenoberkante der Wasserwolke variiert. Die Höhe der Zirrusoberkanten werden mit 11km, 8km und 6km festgelegt. Unten rechts wird die Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) variiert.

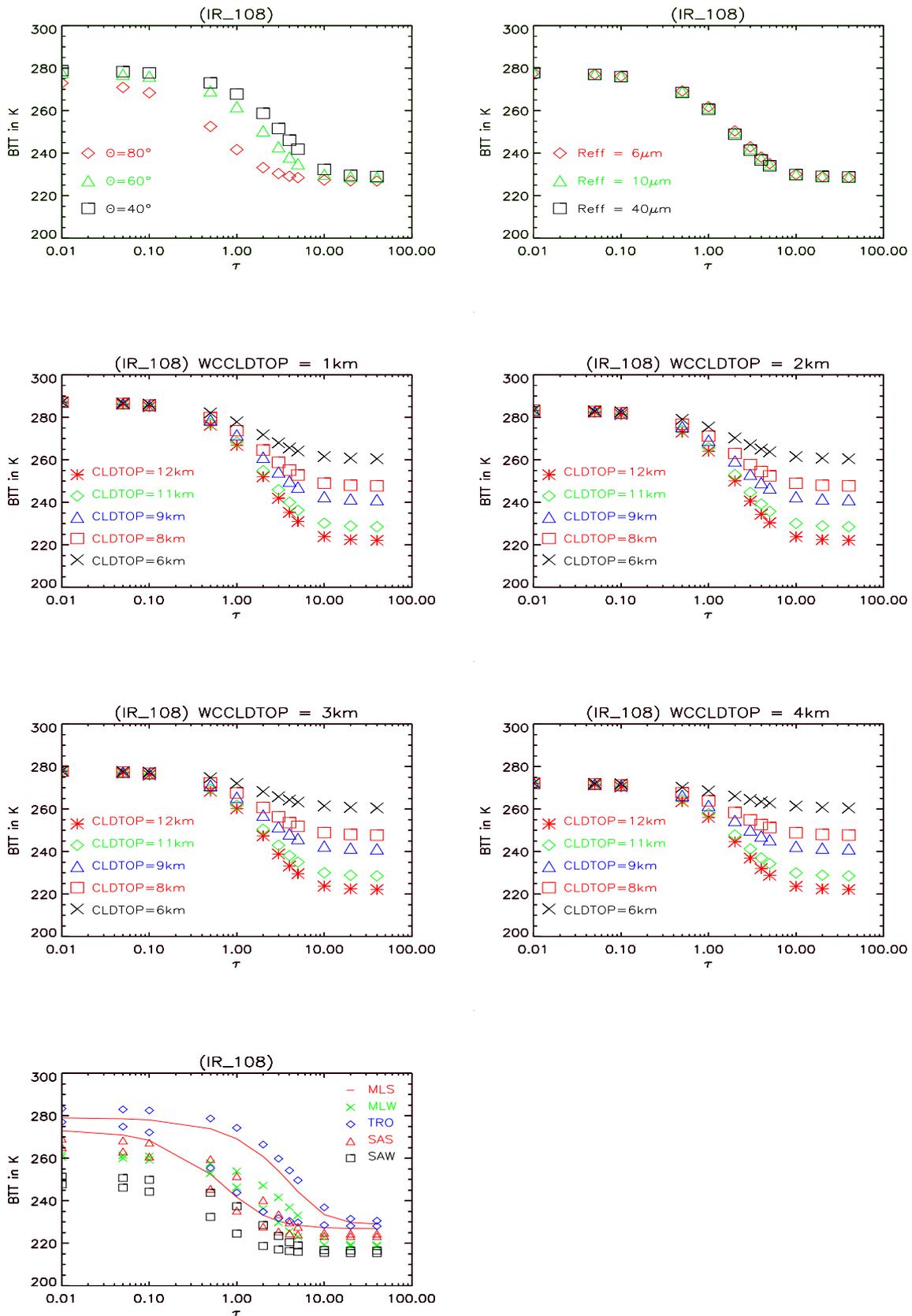


Abbildung D.14: Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirrus über dicker Wasserwolke. Dargestellt ist die Helligkeitstemperatur des Kanals IR\_108 in Abhängigkeit von der optischen Dicke  $\tau$ . Links oben wird der Satellitenzenitwinkel  $\theta$  variiert. Rechts oben wird der Effektivradius variiert. In den mittleren vier Bildern werden die Höhe der Wolkenoberkanten der Zirruswolken variiert. Die Höhe der Oberkanten der Wasserwolken sind mit 1km, 2km, 3km und 4km festgelegt. Unten links wird die Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) variiert.

#### D.4.4 Simulation Zirrus über dünner Wasserwolke

In diesem Szenario wird angenommen, unter einer Zirruswolke befindet sich eine optisch dünne Wasserwolke. In der Realität ist dies durch Zirren über Wolkenrändern von Wasserwolken gegeben, aber auch partielle Bewölkung unterhalb von Zirruswolken soll durch diesen Fall simuliert werden.

Tabelle D.4: Simulationsparameter Zirren über dünner Wasserwolke

Atmosphärenprofile	T	$\Theta$	$\tau_{0.55}$	$R_{eff}$	Wolkenoberkante <i>CTA</i>	geometrische Dicke <i>CGT</i>
Midlatitude Summer	283 K	80°	0.01	6 $\mu m$	12 km	3 km
	288 K	75°	0.05	8 $\mu m$	11 km	2 km
	293 K	70°	0.1	10 $\mu m$	9 km	1 km
	298 K	65°	0.5	20 $\mu m$	8 km	0.5 km
	303 K	60°	1	40 $\mu m$	6 km	0.1 km
		55°	2			
		50°	3			
		45°	4			
		40°	5			
		35°	10			
		30°	20			
			40			
	Midlatitude Winter	243 K	80°			
253 K		75°				
263 K		70°				
273 K		65°				
283 K		60°				
293 K		55°				
		50°				
		45°				
		40°				
		35°				
	30°					
Tropical (Warm+Feucht)	283 K	60°				
	293 K	50°				
	303 K	40°				
		30°				
		20°				
		10°				
Subartical Summer	278 K	80°				
	288 K	75°				
		70°				
		65°				
Subartical Winter	233 K	80°				
	243 K	75°				
	253 K	70°				
	263 K	65°				

Die Eigenschaften der dünnen Wasserwolke werden nicht variiert und sind:

1. Höhe der Wolkenoberkante der Wasserwolke: 2 km
2. Geometrische Dicke der Wasserwolke, *CTAW*: 0.1 km
3. Optische Dicke der Wasserwolke bei 0.55  $\mu m$ ,  $\tau_{0.55}$ : 1.5

4. Effektivradius der Partikel,  $R_{eff}$ :  $1 \mu m$

5. Form der Partikel: sphärisch

Die Zirruspartikelform wird als hexagonal angenommen. Die Variationsparameter der Simulation sind: unterschiedliche Atmosphärenprofile, Bodentemperaturen, Satellitenzenitwinkel, optische Dicke der Zirruswolke, der Effektivradius der Eispartikel der Zirruswolke, die Höhe der Wolkenoberkante und die geometrische Dicke der Zirruswolke.

Das Ergebnis ist eine 6-dimensionale Matrix

$$M = M(T, \Theta, \tau_{0.55}, R_{eff}, CTA, CGT)$$

und wird als IDL-Matrix in einer IDL-SAVE Datei abgelegt. Die Indizes sind:

1. Bodentemperatur: T in K
2. Satellitenzenitwinkel:  $\Theta$
3. Optische Dicke der Zirruswolke bei  $0.55 \mu m$ :  $\tau_{0.55}$
4. Effektivradius der Eispartikel:  $R_{eff}$  in  $\mu m$
5. Höhe der Wolkenoberkante der Zirruswolke: CTA in km
6. Geometrische Dicke der Zirruswolke: CGT in km

Die zugehörigen Werte der Indizes sind ebenfalls gespeichert und entsprechen den Werten in Tabelle D.4. Die Ergebnismatrix enthält Strahldichten in  $\frac{W}{m^2 sr}$ .

Der Eis-Wasser-Gehalt der Zirruswolke, der als Funktion von der optischen Dicke  $\tau_{0.55}$  und der geometrischen Dicke CGT des Zirrus berechnet werden muss, wird ebenfalls gespeichert.

## D.4.4.1 Simulationsergebnisse Zirruserkennungstests, Fall Zirrus über dünner Wasserwolke

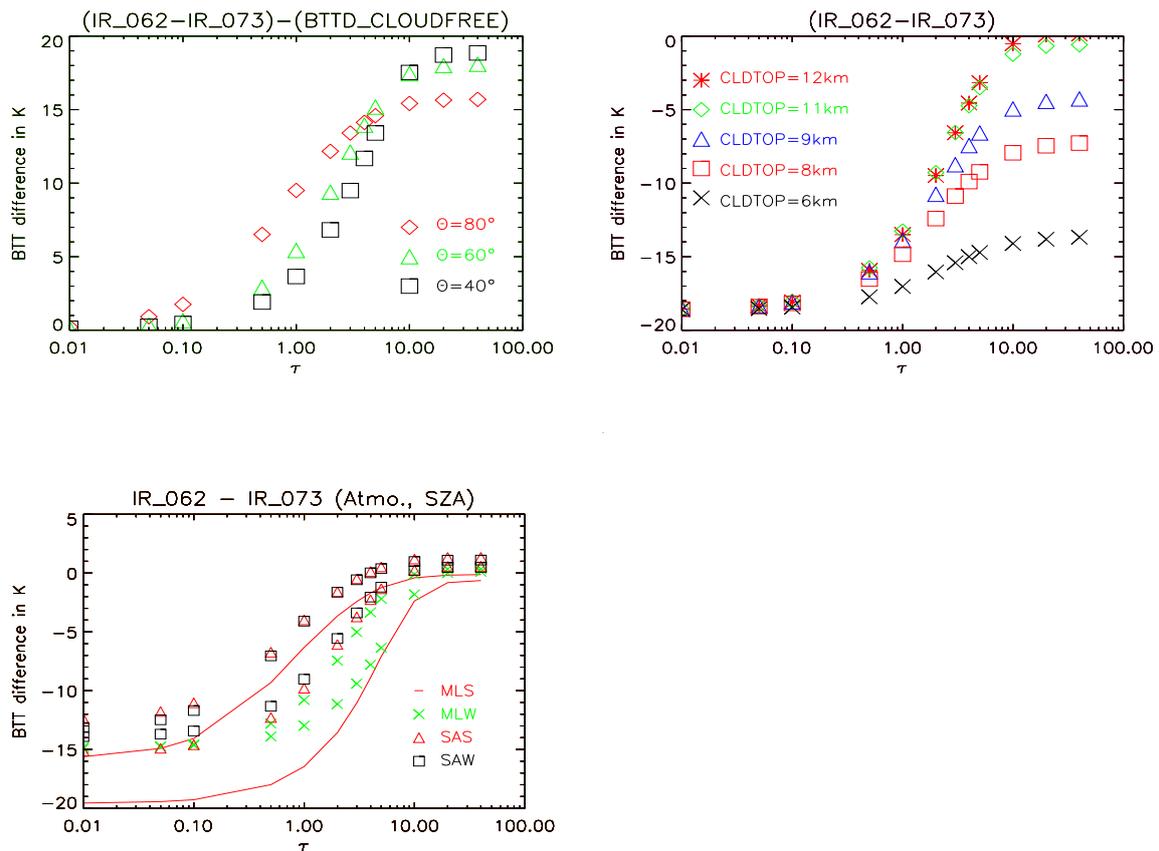


Abbildung D.15: Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirrus über dünner Wasserwolke in Abhängigkeit von der optischen Dicke  $\tau$ . Links oben dargestellt ist Helligkeitstemperaturdifferenz der Wasserdampfkanäle WV\_062 und WV\_073 minus der Helligkeitstemperaturdifferenz für eine wolkenfreie Atmosphäre. Variiert wird der Satellitenzenitwinkel  $\theta$ . Rechts oben wird die Höhe des Zirrusoberkante variiert. Unten links wird die Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) variiert.

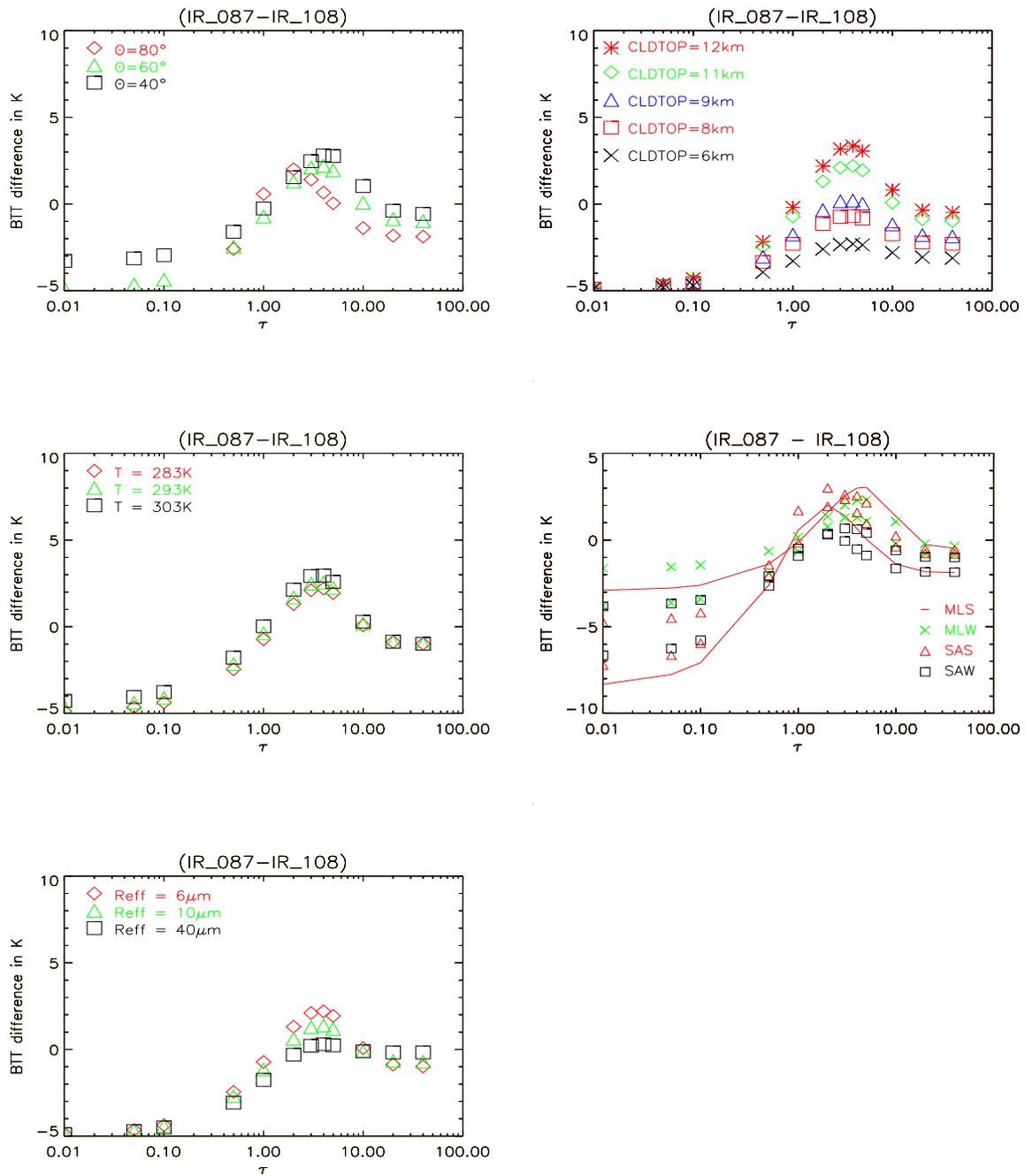


Abbildung D.16: Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirrus über dünner Wasserwolke. Dargestellt ist die Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR\_087 und IR\_108 in Abhängigkeit von der optischen Dicke  $\tau$ . Links oben wird der Satellitenzenitwinkel  $\theta$  variiert. Rechts oben wird die Höhe des Zirrusoberkante variiert. Mitte links wird die Bodentemperatur variiert. Mitte rechts wird die Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) variiert. Unten wird der Effektivradius variiert.

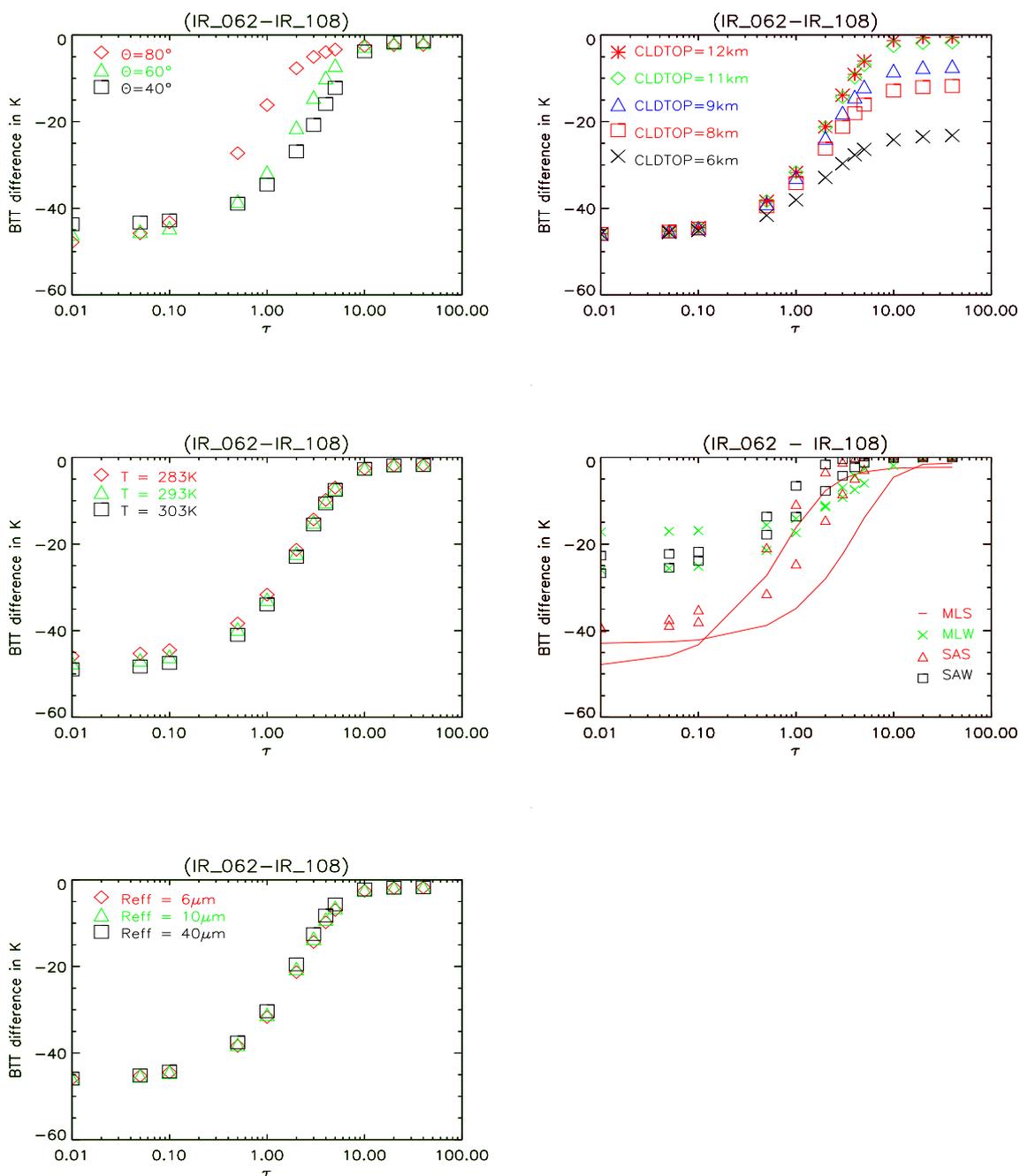


Abbildung D.17: Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirrus über dünner Wasserwolke. Dargestellt ist die Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle WV\_062 und IR\_108 in Abhängigkeit von der optischen Dicke  $\tau$ . Links oben wird der Satellitenzenitwinkel  $\theta$  variiert. Rechts oben wird die Höhe des Zirrusoberkante variiert. Mitte links wird die Bodentemperatur variiert. Mitte rechts wird die Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) variiert. Unten wird der Effektivradius variiert.

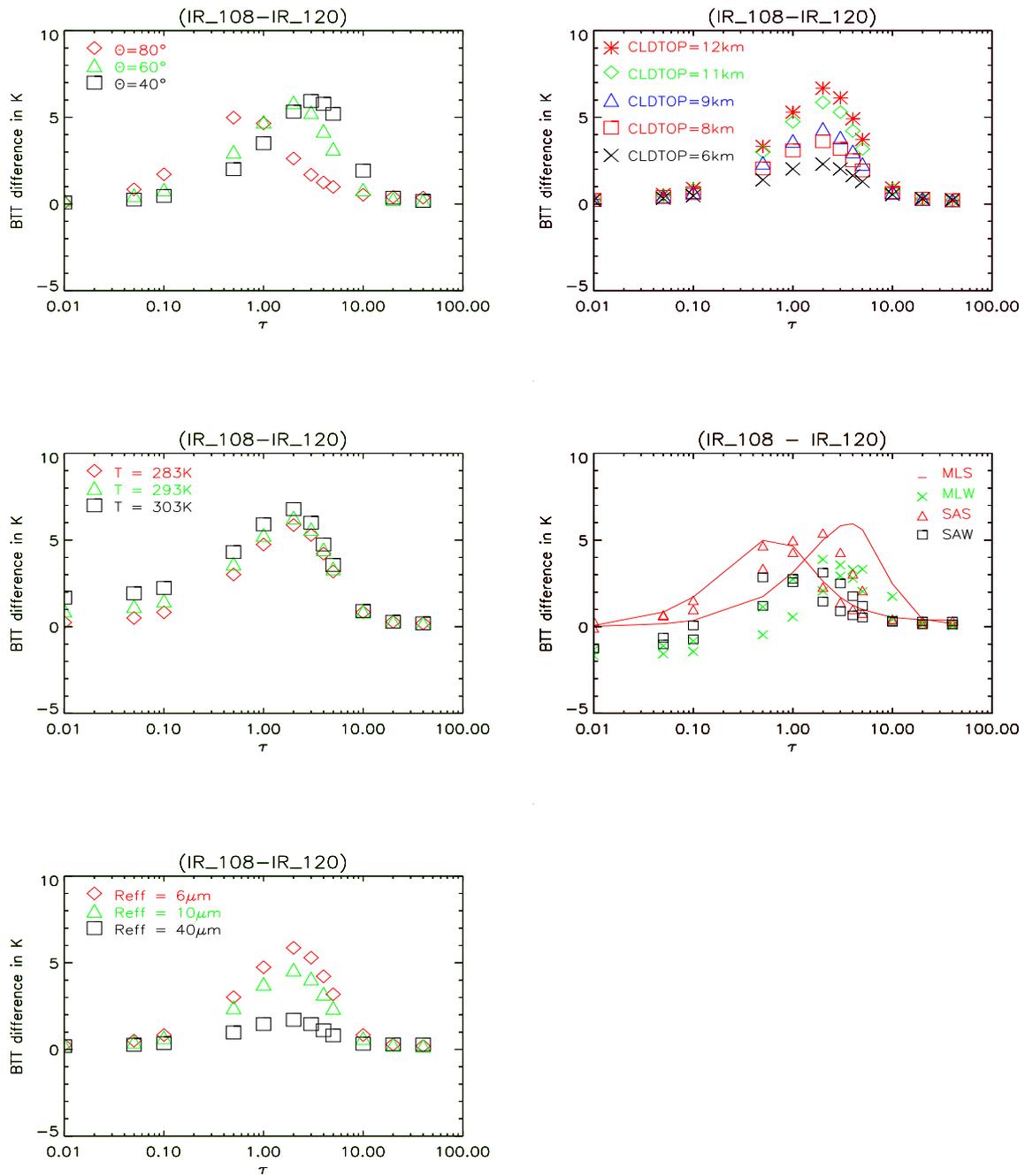


Abbildung D.18: Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirrus über dünner Wasserwolke. Dargestellt ist die Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR\_108 und IR\_120 in Abhängigkeit von der optischen Dicke  $\tau$ . Links oben wird der Satellitenzenitwinkel  $\theta$  variiert. Rechts oben wird die Höhe des Zirrusoberkante variiert. Mitte links wird die Bodentemperatur variiert. Mitte rechts wird die Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) variiert. Unten wird der Effektivradius variiert.

### D.4.5 Simulation von Wasserwolken

In diesem Szenario wird eine reine Wasserwolke simuliert. Die Variationsparameter der Simulation sind: unterschiedliche Atmosphärenprofile, Bodentemperaturen, Satellitenzenitwinkel, optische Dicke der Wasserwolke, der Effektivradius der Wasserwolke, die Höhe der Wolkenoberkante und die geometrische Dicke der Wolke. Die Form der Partikel wird mit sphärisch angenommen.

Tabelle D.5: Simulationsparameter Wasserwolken

Atmosphärenprofile	T	$\Theta$	$\tau_{0.55}$	$R_{eff}$	Wolkenoberkante <i>CTA</i>	geometrische Dicke <i>CGT</i>
Midlatitude Summer	283 K	80°	1	6 $\mu m$	6 km	2 km
	288 K	75°	2	8 $\mu m$	5 km	1 km
	293 K	70°	3	10 $\mu m$	4 km	0.5 km
	298 K	65°	4	12 $\mu m$	3 km	0.1 km
	303 K	60°	5	15 $\mu m$	2 km	0.05 km
		55°	6		1 km	
		50°	7		0.5 km	
		45°	8		0.1 km	
		40°	9			
		35°	10			
Midlatitude Winter	243 K	80°	40			
	253 K	75°				
	263 K	70°				
	273 K	65°				
	283 K	60°				
	293 K	55°				
		50°				
		45°				
		40°				
		35°				
Tropical (Warm+Feucht)	283 K	60°				
	293 K	50°				
	303 K	40°				
		30°				
		20°				
Subartical Summer	278 K	80°				
	288 K	75°				
		60°				
		65°				
Subartical Winter	233 K	80°				
	243 K	70°				
	253 K	60°				
	263 K	65°				

Das Ergebnis ist eine 6-dimensionale Matrix

$$M = M(T, \Theta, \tau_{0.55}, R_{eff}, CTA, CGT)$$

wobei die geometrische Dicke nicht größer als die Höhe der Wolkenoberkante sein darf. Für den Fall  $CGTW > CTAW$  ist das Ergebnis -1 !

Alle anderen Wert sind als IDL-Matrix in einer IDL-SAVE Datei abgelegt. Die Indizes sind:

1. Bodentemperatur:  $T$  in K
2. Satellitenzenitwinkel:  $\Theta$  in  $^\circ$
3. Optische Dicke  $0.55 \mu m$ :  $\tau_{0.55}$
4. Effektivradius Partikel:  $R_{eff}$  in  $\mu m$
5. Höhe der Wolkenoberkante:  $CTA$  in km
6. Geometrische Dicke der Wolke:  $CGT$  in km

Die zugehörigen Werte der Indizes sind ebenfalls gespeichert und entsprechen den Werten in Tabelle D.5. Die Ergebnismatrix enthält Strahldichten in  $\frac{W}{m^2 sr}$

Der Eis-Wasser-Gehalt der Wasserwolke, der als Funktion von der optischen Dicke  $\tau_{0.55}$  und der geometrischen Dicke  $CGTW$  der Wasserwolke berechnet werden muss, wird ebenfalls gespeichert.

#### D.4.5.1 Simulationsergebnisse Zirruserkennungstests

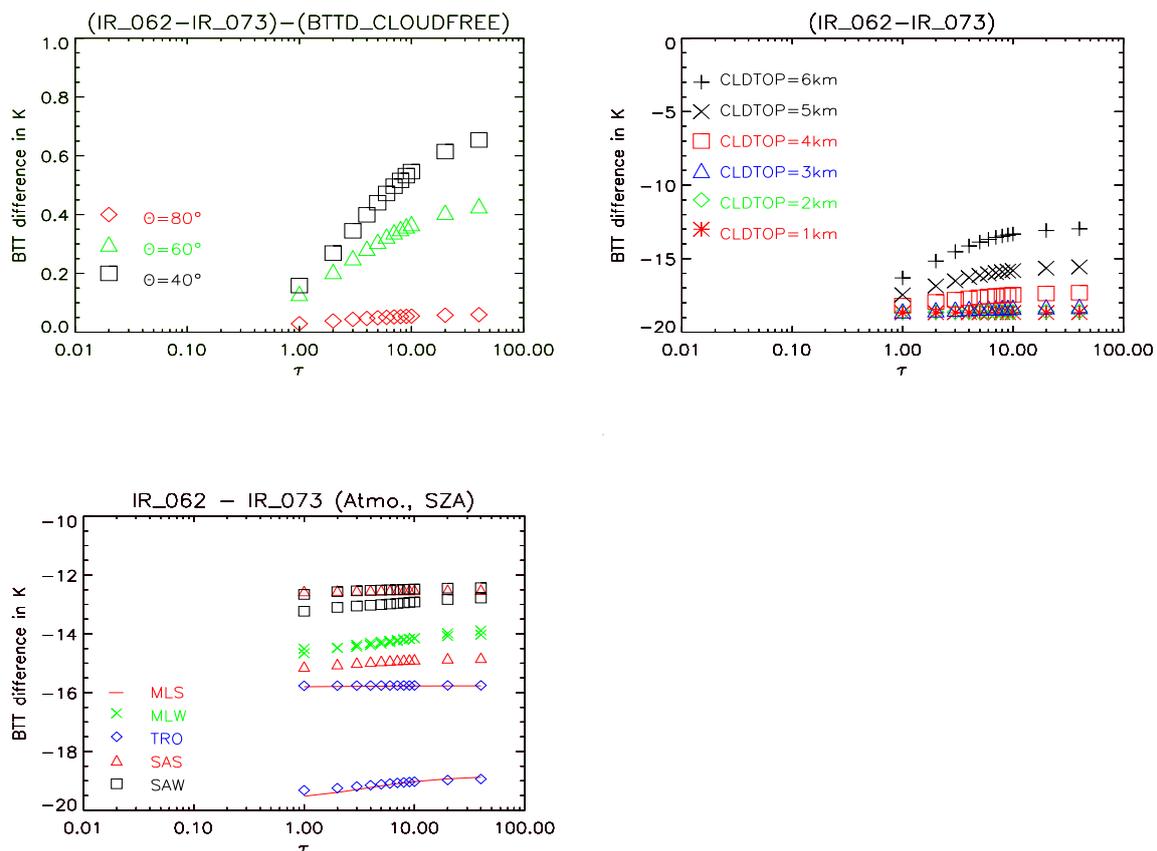


Abbildung D.19: Ergebnisse der Simulation für den Fall Wasserwolke in Abhängigkeit von der optischen Dicke  $\tau$ . Links oben dargestellt ist Helligkeitstemperaturdifferenz der Wasserdampfkanäle WV\_062 und WV\_073 minus der Helligkeitstemperaturdifferenz für eine wolkenfreie Atmosphäre. Variiert wird der Satellitenzenitwinkel  $\theta$ . Rechts oben ist nur die Helligkeitstemperaturdifferenz dargestellt. Variiert wird die Höhe der Wolkenoberkante. Unten links wird die Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) variiert.

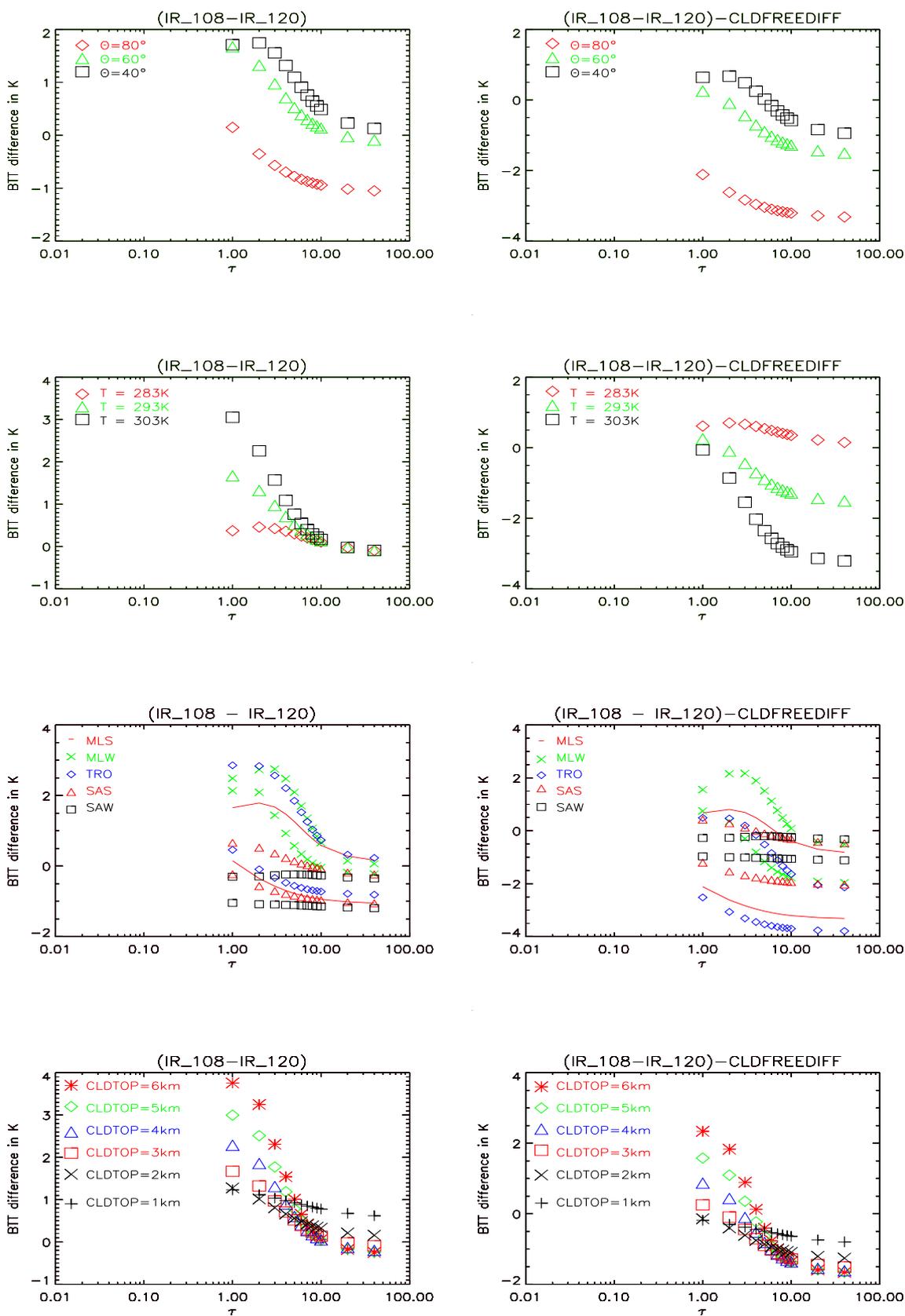


Abbildung D.20: Ergebnisse der Simulation für den Fall Wasserwolke. Links dargestellt ist Helligkeitstemperaturdifferenz der Fensterkanäle IR\_108 und IR\_120. Rechts wird die Helligkeitstemperaturdifferenz für den wolkenfreien Fall von der Kanaldifferenz mit Ziruswolke subtrahiert. Variiert wird (von oben nach unten) der Satellitenzenitwinkel, die Bodentemperatur, Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) und die Höhe der Wolkenoberkante.

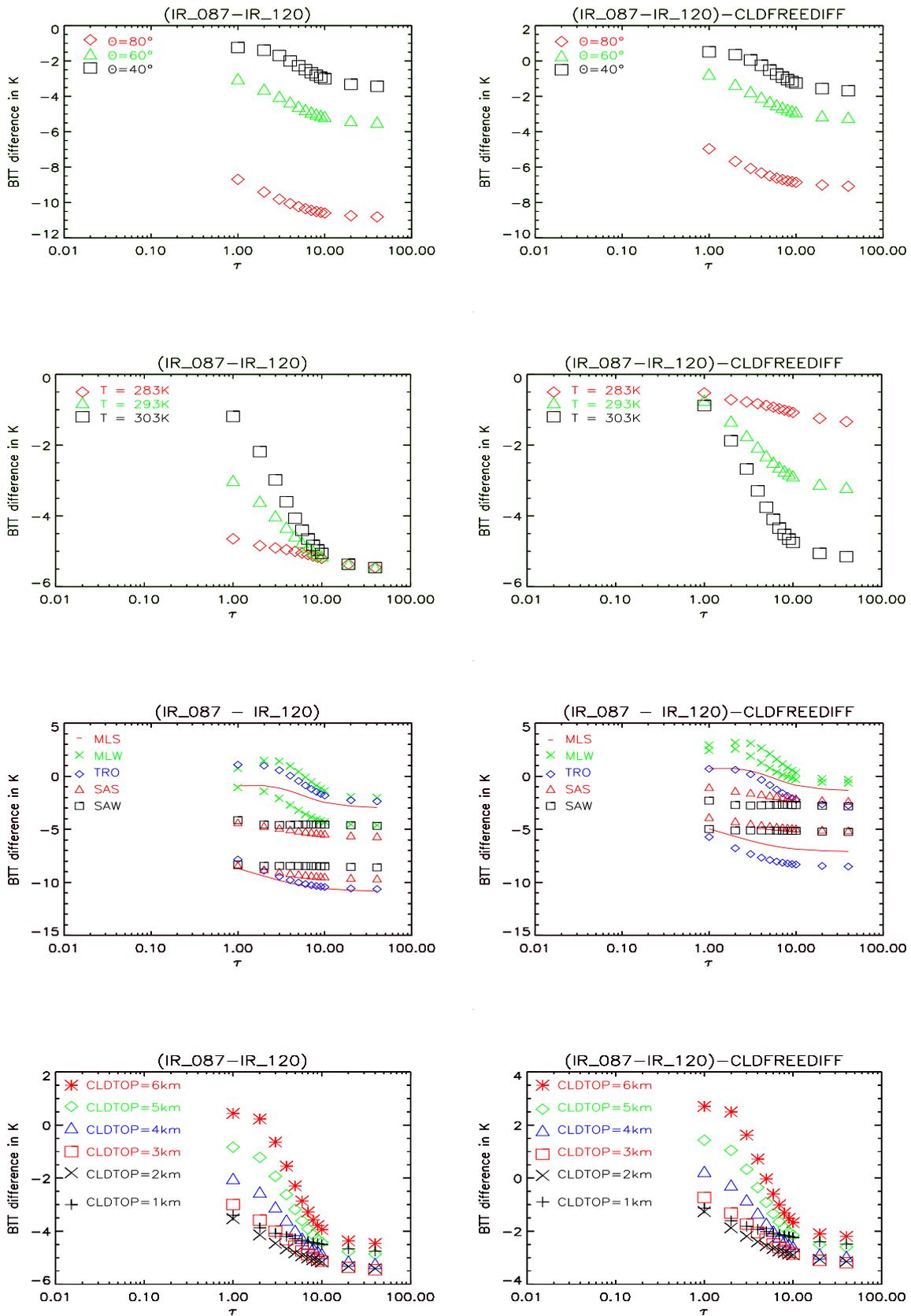


Abbildung D.21: Ergebnisse der Simulation für den Fall Wasserwolke. Links dargestellt ist Helligkeitstemperaturdifferenz der Fensterkanäle IR\_087 und IR\_108. Rechts wird die Helligkeitstemperaturdifferenz für den wolkenfreien Fall von der Kanaldifferenz mit Zirruswolke subtrahiert. Variiert wird (von oben nach unten) der Satellitenzenitwinkel, die Bodentemperatur, Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) und die Höhe der Wolkenoberkante.

# Literaturverzeichnis

- [ACKERMAN et al. 1998] ACKERMAN, S., K. STRABALA, W. MENZEL, F. R.A., C. MOELLER und L. GUMLEY (1998). *Discriminating Clear-sky from Clouds with MODIS*. Journal of Geophysical Research, 103(D24):32,141.
- [ACKERMAN et al. 1996] ACKERMAN, S.A., K. STRABALA, R. FREY, C. MOELLER und W. MENZEL (1996). *Cloud Mask for the MODIS Airborne Simulator (MAS): Preparation for MODIS*. In: *AMS Eight Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, 28. Jan. - 2. Feb., Atlanta, S.* 317–320. American Meteorological Society.
- [APPLEMAN 1953] APPLEMAN, H. (1953). *The formation of exhaust contrails by jet aircraft*. Bulletin of the American Meteorological Society, 34:14–20.
- [BAKAN et al. 1994] BAKAN, S., M. BETANCOR, V. GAYLER und H. GRASSL (1994). *Contrail frequency over Europe from NOAA-satellite images*. Ann. Geophys., 12:962–968.
- [BAKAN und RASCHKE 2002] BAKAN, S. und E. RASCHKE (2002). *Der natürliche Treibhauseffekt*. Promet, 3/4(28):85–24.
- [BANKERT und AHA 1994] BANKERT, R. L. und D. W. AHA (1994). *Cloud Classification of AVHRR Imagery in Maritime Regions Using a Probabilistic Neural Network*. Journal of Applied Meteorology, 33:909–918.
- [BANTGES et al. 1999] BANTGES, R.J., J. RUSSELL und J. HAIGH (1999). *Cirrus cloud top-of-atmosphere radiance spectra in the thermal infrared*. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 63:487–498.
- [BLANCO-MERIEL et al. 2001] BLANCO-MERIEL, M., D. ALARCON-PADILLA, T. LOPEZ-MORATALLA und M. LARA-COIRA (2001). *Computing the Solar Vector*. Solar Energy, 70(No.5):431–441.
- [BOUCHER 1999] BOUCHER, O. (1999). *Influence of air traffic on cirrus occurrence*. Nature, 397:30–31.
- [BREWER 1946] BREWER, A.W. (1946). *Condensation Trails*. Weather, 1:34–40.
- [CHANDRASEKHAR 1950] CHANDRASEKHAR, S. (1950). *Radiative transfer*. Oxford Univ. Press, UK.
- [CHARLOCK und ALBERTA 1996] CHARLOCK, THOMAS P. und T. L. ALBERTA (1996). *The CERES/ARM/GEWEX Experiment (CAGEX) for the Retrieval of Radiative Fluxes with Satellite Data*. Bulletin of the American Meteorological Society, 77(11):197–208.
- [DESBOIS et al. 1982] DESBOIS, M., G. SEZE und G. SZEJWACH (1982). *Automatic classification of clouds on METEOSAT imagery: application to high-level clouds*. Journal of Applied Meteorology, 21:401–412.
- [ESA 2004] ESA (2004). *EarthCARE - Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer, Technical and Programmatic Annex*. Technischer Bericht Annex to ESA 1279(1), ESA.

- [ETTENREICH 1919] ETTENREICH, R (1919). *Wolkenbildung über einer Feuerbrunst und an Flugzeugabgasen*. Meteorologische Zeitschrift, 36:335–336.
- [EUMETSAT 2005a] EUMETSAT (2005a). *Level 1.5 Data Format Description, EUM/MSG/ICD/105*. Technischer Bericht EUM/MSG/ICD/105, EUMETSAT, Am Kavalleriesand 31, Postfach 100555, D-64205 Darmstadt, Germany.
- [EUMETSAT 2005b] EUMETSAT (2005b). *LRIT/HRIT Mission Specific Implementation, EUM/MSG/SPE/057*. Technischer Bericht EUM/MSG/SPE/057, EUMETSAT, Am Kavalleriesand 31, Postfach 100555, D-64205 Darmstadt, Germany.
- [EUMETSAT 2005c] EUMETSAT (2005c). *On the conversion from radiances to equivalent brightness temperatures, EUM/OPS/TEN/05/2556*. Technischer Bericht EUM/OPS/TEN/05/2556, EUMETSAT, Am Kavalleriesand 31, Postfach 100555, D-64205 Darmstadt, Germany.
- [FAHEY et al. 1999] FAHEY, D.W., U. SCHUMANN, S. ACKERMAN, P. ARTAXO, O. BOUCHER, M. DANILIN, B. KÄRCHER, P. MINNIS, T. NAKAJIMA und O. TOON (1999). *Aviation-Produced Aerosols and Cloudiness*, S. 65–120. *Aviation and the Global Atmosphere. A Special Report of IPCC Working Groups I and III.*, J.E. Penner, D.H. Lister, D.J. Griggs, D.J. Dokken, M. McFarland (Hrsg.), Cambridge University Press.
- [FEIJT 2000] FEIJT, A. (2000). *Quantitative Cloud Analysis using Meteorological Satellites*. Doktorarbeit, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, (KNMI).
- [FORTUIN et al. 1995] FORTUIN, J.P.F., R. VAN DORLAND, W. WAUBEN und H. KELDER (1995). *Greenhouse effects of aircraft emissions as calculated by a radiative transfer model*. *Ann. Geophys.*, 13:413–418.
- [FREUDENTHALER et al. 1995] FREUDENTHALER, V., F. HOMBURG und H. JÄGER (1995). *Contrail observations by ground-based scanning lidar: cross-sectional growth*. *Geophys. Res. Lett.*, 22:3501–3504.
- [FREUDENTHALER et al. 1996] FREUDENTHALER, V., F. HOMBURG und H. JÄGER (1996). *Optical parameters of contrails from lidar measurements: Linear depolarization*. *Geophys. Res. Lett.*, 23:3715–3718.
- [FU 1996] FU, Q. (1996). *An accurate parameterization of the solar radiative properties of cirrus clouds in climate models*. *Journal of Climate*, 9:2058–2082.
- [FU et al. 1998] FU, Q., P. YANG und W. SUN (1998). *An accurate parameterization of the infrared radiative properties of cirrus clouds in climate models*. *Journal of Climate*, 11:2223–2237.
- [GAO und KAUFMANN 1998] GAO, B.-C. und Y. KAUFMANN (1998). *Algorithm Technical Background Document. The MODIS Near-IR Water Vapor Algorithm, Product ID: MOD05 - Total Precipitable Water*. Technischer Bericht ATBD-MOD-07, NASA Goddard Space Flight Center.
- [GERTHSEN und VOGEL 1993] GERTHSEN, C und H. VOGEL (1993). *Physik*. Springer Verlag.
- [GIERENS et al. 1999a] GIERENS, K., R. SAUSEN und U. SCHUMANN (1999a). *A diagnostic study of the global coverage by contrails. Part II. Future air traffic scenarios*. *Theor. Appl. Climatol.*, 63:1–9.
- [GIERENS et al. 1999b] GIERENS, K., U. SCHUMANN, M. HELTEN, H. SMIT und A. MARENCO (1999b). *A distribution law for relative humidity in the upper troposphere and lower stratosphere derived from three years of MOZAIC measurements*. *Ann. Geophys.*, 17:1218–1226.
- [GIERENS et al. 2000] GIERENS, K., U. SCHUMANN, M. HELTEN, H. SMIT und P. WANG (2000). *Ice-supersaturated regions and subvisible cirrus in the northern midlatitude upper troposphere*. *Journal of Geophysical Research*, 22(D18):743–753.

- [GIERENS und SPICHTINGER 2000] GIERENS, K. und P. SPICHTINGER (2000). *On the size distribution of ice-supersaturated regions in the upper troposphere and lowermost stratosphere*. Ann. Geophys., 18:499–504.
- [GONZALEZ und WOODS 1992] GONZALEZ, R. und R. WOODS (1992). *Digital Image Processing*. Addison-Wesley Publishing Company, UK.
- [GOVAERTS und CLERICI 2004] GOVAERTS, Y. und M. CLERICI (2004). *MSG1/SEVIRI Solar Channel Calibration, Commissioning Activity Report, EUM/MSG/TEN/04/0024*. Technischer Bericht EUM/MSG/TEN/04/0024, EUMETSAT, Am Kavalleriesand 31, Postfach 100555, D-64205 Darmstadt, Germany.
- [HAAG und KÄRCHER 2004] HAAG, W. und B. KÄRCHER (2004). *The impact of aerosols and gravity waves on cirrus clouds at midlatitudes*. J. Geophys. Res., 109(D12202):10.1029/2004JD004579.
- [HAAG et al. 2003] HAAG, W., B. KÄRCHER, J. STRÖM, A. MINIKIN, U. LOHMANN, J. OVARLEZ und A. STOHL (2003). *Freezing thresholds and cirrus cloud formation mechanisms inferred from in situ measurements of relative humidity*. Atmos. Chem. Phys., 3:1781–1806.
- [HANSEN und TRAVIS 1974] HANSEN, J.E. und L. TRAVIS (1974). *Light scattering in planetary atmospheres*. Space Sci. Rev., 16:527–610.
- [HART et al. 2005] HART, W.D., S. PALM, D. HLAVKA und J. SPINHIRNE (2005). *Lidar global cloud and aerosol layer distribution statistics from GLAS observations*. In: *2nd Symposium on Lidar Atmospheric Applications, 85th AMS Annual Meeting, San Diego, California, January*.
- [HORNİK 1993] HORNİK, K. (1993). *Some new results on neural network approximation*. Neural Networks, 6:1069–1072.
- [HUTCHISON 1999] HUTCHISON, K. D. (1999). *Application of AVHRR/3 Imagery for the Improved Detection of Thin Cirrus Clouds and Specification of Cloud-Top Phase*. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 16:1885–1899.
- [IDL5.6 2002] IDL5.6 (2002). *IDL Reference Guide*. Boulder, CO 80301.
- [IPCC 2001] IPCC (2001). *Climate Change 2001 - The Scientific Basis*. Technischer Bericht 2001, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), IPCC Secretariat, c/o World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- [JÄGER et al. 1998] JÄGER, H., V. FREUDENTHALER und F. HOMBURG (1998). *Remote sensing of optical depth of aerosols and cloud cover related to air traffic*. Atmos. Environ., 32:3123–3127.
- [JENSEN und TOON 1997] JENSEN, E.J. und O. TOON (1997). *The potential impact of soot particles from aircraft exhaust on cirrus clouds*. Geophys. Res. Lett., 24:249–252.
- [JENSEN et al. 1998] JENSEN, E.J., O. TOON, R. PUESCHEL, J. GOODMAN, G. SACHSE, B. ANDERSON, K. CHAN, C. TWOHY, A. GANDRUD, B. HEYMSFELD und R. MIAKE-LYE (1998). *Environmental conditions required for contrail formation and persistence*. Journal of Geophysical Research, 103:3929–3936.
- [KÄRCHER 1999] KÄRCHER, B. (1999). *The initial composition of jet condensation trails*. Surveys Geophys., 20:113–167.
- [KÄRCHER 2000] KÄRCHER, B. (2000). *Contrails: Observations, formation mechanisms, atmospheric impacts, uncertainties*. DLR-Mitt. 2000-01.

- [KÄRCHER et al. 1998] KÄRCHER, B., B. BUSEN, A. PETZOLD, F. SCHRÖDER, U. SCHUMANN und E. JENSEN (1998). *Physicochemistry of aircraft-generated liquid aerosols, soot, and ice particles, 2, Comparison with observations and sensitivity studies*. Journal of Geophysical Research, 103:17129–17148.
- [KÄRCHER und LOHMANN 2002] KÄRCHER, B und U. LOHMANN (2002). *A parameterization of cirrus cloud formation: Homogeneous freezing including effects of aerosol size*. Journal of Geophysical Research, 107(4698):doi:10.1029/2001JD001429.
- [KÄRCHER et al. 1996] KÄRCHER, B., T. PETER, U. BIERMANN und U. SCHUMANN (1996). *The initial composition of jet condensation trails*. J. Atmos. Sci., 53:3066–3083.
- [KAUFMAN und TANRÉ 1998] KAUFMAN, Y.J. und D. TANRÉ (1998). *Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol from MODIS, Product ID: MOD04*. Technischer Bericht ATBD-MOD-02, NASA Goddard Space Flight Center.
- [KEY et al. 2002] KEY, J.R., P. YANG, B. BAUM und S. NASIRI (2002). *Parameterization of short-wave ice cloud optical properties for various particle habits*. Journal of Geophysical Research, 107(D13):10.1029/2001JD000742.
- [KIDDER und VONDER HAAR 1995] KIDDER, S.Q. und T. H. VONDER HAAR (1995). *Satellite Meteorology. An Introduction*. Academic Press.
- [KIEHL und TRENBERTH 1997] KIEHL, J.T. und K. TRENBERTH (1997). *Earth's annual global mean energy budget*. Bulletin of the American Meteorological Society, 78(2):197–208.
- [KING et al. 1997] KING, M.D., S.-C. TSAY, S. PLATNICK, M. WANG und K.-N. LIOU (1997). *Cloud Retrieval Algorithms for MODIS: Optical Thickness, Effective Particle Radius, and Thermodynamic Phase*. Technischer Bericht ATBD-MOD-05, NASA Goddard Space Flight Center.
- [KRIEBEL et al. 2003] KRIEBEL, K.T., G. GESELL, M. KÄSTNER und H. MANNSTEIN (2003). *The cloud analysis tool APOLLO: improvements and validations*. Int. J. Remote Sensing, 24(12):2389–2408.
- [KRISTENSSON et al. 2000] KRISTENSSON, A., J.-F. GAYET, J. STRÖM und F. AURIOL (2000). *In situ observations of a reduction in effective crystal diameter in cirrus clouds near a flight corridor*. Geophys. Res. Lett., 27:681–684.
- [LÖHNER 1940] LÖHNER, H. (1940). *Eisnebelstreifen hinter Flugzeugen in großen Höhen*. Luftwissen, 7:337–339.
- [LUDLAM 1980] LUDLAM, F.H. (1980). *Clouds and Storms*. The Pennsylvania State University Press, University Park, PA, USA.
- [LYNCH et al. 2002] LYNCH, D.K., K. SASSEN, D. STARR und G. STEPHENS, Hrsg. (2002). *Cirrus*. Oxford University Press.
- [MAHESH et al. 2004] MAHESH, A., M. GRAY, S. PALM und W. HART (2004). *Passive and active detection of clouds: Comparison between MODIS and GLAS observations*. Geophysical Research Letters, 31(L04108):doi:10.1029/2003GL018859.
- [MANNSTEIN et al. 1999] MANNSTEIN, H., R. MEYER und P. WENDLING (1999). *Operational detection of contrails from NOAA-AVHRR-data*. Int. J. Remote Sensing, 20(8):1641–1660.
- [MANNSTEIN et al. 2005] MANNSTEIN, H., P. SPICHTINGER und K. GIERENS (2005). *A Note on How to Avoid Contrail Cirrus*. Transportation Research, 10:421 – 426.
- [MANNSTEIN und SCHUMANN 2005] MANNSTEIN, HERMANN und U. SCHUMANN (2005). *Aircraft induced contrail cirrus over Europe*. Meteorologische Zeitschrift, 14(4):549 – 554.

- [MARQUART 2003] MARQUART, S. (2003). *Klimawirkung von Kondensstreifen: Untersuchungen mit einem globalen atmosphärischen Zirkulationsmodell*. Dissertation, Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München.
- [MARQUART et al. 2003] MARQUART, S., M. PONATER, F. MAGER und R. SAUSEN (2003). *Future development of contrail cover, optical depth, and radiative forcing: impacts of increasing air traffic and climate change*. J. Clim., 16:2890–2904.
- [MAYER und KYLLING 2005] MAYER, B. und A. KYLLING (2005). *Technical Note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations: Description and examples of use*. Atmos. Chem. Phys. Discuss., 5:1319–1381.
- [MEERKÖTTER et al. 1999] MEERKÖTTER, R., U. SCHUMANN, P. MINNIS, D. DOELLING, T. NAKAJIMA und Y. TSUSHIMA (1999). *Radiative forcing by contrails*. Ann. Geophys., 17:1080–1094.
- [MENZEL et al. 1997] MENZEL, P., S. SEEMANN, J. LI und L. GUMLEY (1997). *Modis Atmospheric Profile Retrieval. Algorithm Theoretical Basis Document*. Technischer Bericht ATBD-MOD-07, NASA Goddard Space Flight Center.
- [MENZEL und STRABALA 2002] MENZEL, P. und K. STRABALA (2002). *Cloud Top Properties and Cloud Phase Algorithm Theoretical Basis Document*. Technischer Bericht ATBD-MOD-04, NASA Goddard Space Flight Center.
- [MEYER et al. 2002a] MEYER, R., R. BUELL, C. LEITER, H. MANNSTEIN, S. MARQUART, T. OKI und P. WENDLING (2002a). *Contrail observations over Southern and Eastern Asia in NOAA/AVHRR data and comparisons to contrail simulations in a GCM*. J. Remote Sensing. in press.
- [MEYER et al. 2002b] MEYER, R., H. MANNSTEIN, R. MEERKÖTTER, U. SCHUMANN und P. WENDLING (2002b). *Regional radiative forcing byline-shaped contrails derived from satellite data*. J. Geophys. Res., 107(4104):doi:10.1029/2001JD000426.
- [MEYER et al. 2002c] MEYER, R., H. MANNSTEIN, R. MEERKÖTTER und P. WENDLING (2002c). *Contrail and cirrus observations over Europe from 6 years of NOAA-AVHRR data*. Proc. of the 2002 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Dublin, Ireland, 2002 September 2-6, S. 728–735.
- [MIE 1908] MIE, GUSTAV (1908). *Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen*. Annalen der Physik, 25(3):377–445.
- [MILLER und EMERY 1997] MILLER, S. W. und W. J. EMERY (1997). *An Automated Neural Network Cloud Classifier for Use over Land and Ocean Surfaces*. Journal of Applied Meteorology, 36:1346–1362.
- [MINNIS et al. 2005a] MINNIS, P., J. AYERS, R. PALIKONDA und D. PHAN (2005a). *Contrails, cirrus trends, and climate*. J. Clim., 17:1671–1685.
- [MINNIS et al. 1999] MINNIS, P., S. U., D. DOELLING, K. GIERENS und D. FAHEY (1999). *Global distribution of contrail radiative forcing*. Geophys. Res. Lett., 26:1853–1856.
- [MINNIS et al. 1998] MINNIS, P., D. YOUNG, D. GARBER, L. NGUYEN, W. SMITH JR. und R. PALIKONDA (1998). *Transformation of contrails into cirrus during SUCCESS*. Geophys. Res. Lett., 25:1157–1160.
- [MINNIS et al. 2005b] MINNIS, PATRICK, R. PALIKONDA, B. J. WALTER, J. K. AYERS und H. MANNSTEIN (2005b). *Contrail properties over the eastern North Pacific from AVHRR data*. Meteorologische Zeitschrift, 14(4):515 – 523.

- [MYHRE und STORDAL 2001] MYHRE, G. und F. STORDAL (2001). *On the tradeoff of the solar and the thermal infrared radiative impact of contrails*. Geophys. Res. Lett., 28:3119–3122.
- [PALIKONDA et al. 2005] PALIKONDA, RABINDRA, P. MINNIS, D. P. DUDA und H. MANNSTEIN (2005). *Contrail coverage derived from 2001 AVHRR data over the continental United States of America and surrounding areas*. Meteorologische Zeitschrift, 14(4):525 – 536.
- [PENNER et al. 1999] PENNER, J.E., D. LISTER, D. GRIGGS, D. DOKKEN und M. MCFARLAND (1999). *Aviation and the Global Atmosphere*. Technischer Bericht 1999, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), IPCC Secretariat, c/o World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- [PONATER et al. 2002] PONATER, M., S. MARQUART und R. SAUSEN (2002). *Contrails in a comprehensive climate model: parameterisation and radiative forcing results*. Journal of Geophysical Research, 107(4164):doi:10.1029/2001JD000429.
- [PONATER et al. 2005] PONATER, M., S. MARQUART, R. SAUSEN und U. SCHUMANN (2005). *On Contrail Climate Sensitivity*. Geophysical Research Letters, 32:L10706.
- [READ et al. 2001] READ, W. G., J. W. WATERS, D. L. WU, E. M. STONE, Z. SHIPPONY, A. C. SMEDLEY, C. C. SMALLCOMB, S. OLTMANS, D. KLEY, H. G. J. SMIT und J. L. MERGENTHALER (2001). *UARS MLS Upper Tropospheric Humidity Measurement: Method and Validation*. Journal of Geophysical Research, 106:32207–32258.
- [RHODE und PEARSON 1942] RHODE, R.V. und H. PEARSON (1942). *Condensation trails - where they occur and what can be done about them*. Wartime Report, L(L-474).
- [RIND et al. 2000] RIND, D., P. LONERGAN und K. SHAH (2000). *Modeled impact of cirrus cloud increases along aircraft flight paths*. Journal of Geophysical Research, 105(D15):19927–19940.
- [ROSENFELD 2000] ROSENFELD, D. (2000). *Application of the added MSG spectral information for insights into cloud microstructure and precipitation processes*. The 2000 EUMETSAT Meteorological Satellite Data Users' Conference, Session 3, Atmospheric and Oceanic Products and Applications.
- [ROSKOVENSKY und LIOU 2003] ROSKOVENSKY, J. K. und K. N. LIOU (2003). *Detection of thin cirrus using a combination of 1.38- $\mu$ m reflectance and window brightness temperature difference*. Journal of Geophysical Research, 108(D18):doi:10.1029/2002JD003346.
- [ROSSOW und SCHIFFER 1991] ROSSOW, W.B. und R. SCHIFFER (1991). *ISCCP cloud data products*. Bulletin of the American Meteorological Society, 72:2–20.
- [ROSSOW und SCHIFFER 1999] ROSSOW, W.B. und R. SCHIFFER (1999). *Advances in understanding clouds from ISCCP*. Bulletin of the American Meteorological Society, 80:2261–2287.
- [RUMELHART et al. 1986] RUMELHART, D.E., G. HINTON und R. WILLIAMS (1986). *Learning representations by back-propagating errors*. Nature, 323:533–536.
- [SACHS 1969] SACHS, L. (1969). *Statistische Auswertungsmethoden*. Springer Verlag.
- [SASSEN 1997] SASSEN, K. (1997). *Contrail-cirrus and their potential for regional climate change*. Bulletin of the American Meteorological Society, 78:1885–1903.
- [SASSEN und CHO 1992] SASSEN, K. und B. CHO (1992). *Subvisual-thin cirrus lidar dataset for satellite verification and climatological research*. Journal of Applied Meteorology, 28:91–98.
- [SAUSEN et al. 1998] SAUSEN, R., K. GIERENS, M. PONATER und U. SCHUMANN (1998). *A diagnostic study of the global distribution of contrails: Part I: Present day climate*. Theor. Appl. Climatol., 61:127–141.

- [SAUSEN et al. 2005] SAUSEN, R., I. ISAKSEN, V. GREWE, D. HAUGLUSTAINE, D. LEE, G. MYHRE, M. KÖHLER, G. PITARI, U. SCHUMANN, F. STORDAL und C. ZEREFOS (2005). *Aviation radiative forcing in 2000: An update on IPCC (1999)*. Meteorol. Z., 4(14):555–561.
- [SCHMETZ et al. 2002] SCHMETZ, J., P. PILI, S. TJEMKES, D. JUST, J. KERKMANN, S. ROTA und A. RATIER (2002). *An Introduction to Meteosat Second Generation (MSG)*. Bulletin of the American Meteorological Society, 83:977–992.
- [SCHMIDT 1941] SCHMIDT, E. (1941). *Die Entstehung von Eisnebel aus den Auspuffgasen von Flugmotoren*. Schriften der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung, 44:1–15.
- [SCHRÖDER et al. 2000] SCHRÖDER, F., B. KÄRCHER, C. DUROURE, J. STROM, A. PETZOLD, J.-F. GAYET, B. STRAUSS, P. WENDLING und A. THOMAS (2000). *On the transition of contrails into cirrus clouds*. J. Atmos. Sci., 57:464–480.
- [SCHUMANN 1996] SCHUMANN, U. (1996). *On conditions for contrail formation from aircraft exhausts*. Meteorologische Zeitschrift, 5:4–23.
- [SCHUMANN 2002] SCHUMANN, U. (2002). *Contrail Cirrus*, S. 231–255. in: Cirrus, D.K. Lynch, K. Sassen, D.O’C. Starr, G. Stephens (Hrsg.), Oxford Univ. Press, London.
- [SCHUMANN et al. 2000] SCHUMANN, U., H. SCHLAGER, F. ARNOLD, J. OVARLEZ, H. KELDER, O. HOV, G. HAYMAN, I. ISAKSEN, J. STAEHELIN und P. WHITEFIELD (2000). *Pollution from aircraft emissions in the North Atlantic flight corridor: Overview on the POLINAT projects*. J. Geophys. Res., 105:3605–3631.
- [SCHUMANN und WENDLING 1990] SCHUMANN, U. und P. WENDLING (1990). *Determination of contrails from satellite data and observational results*. in: Proc. of a DLR Intern. Coll., Nov. 15/16 Bonn, in: Lecture Notes in Engr., 60:138–153.
- [SCHUMANN 2005] SCHUMANN, ULRICH (2005). *Formation, Properties and Climate Effects of Contrails*. Comptes Rendus Physique, 6:549 – 565.
- [SCREEN und MACKENZIE 2004] SCREEN, J.A. und A. MACKENZIE (2004). *Aircraft condensation trails and cirrus*. Weather, 59:116–121.
- [SHINE 2005] SHINE, K.P. (2005). *Comments on “Contrails, cirrus trends, and climate“*. J. Clim., 68 (2005). J. Clim.
- [SPICHTINGER et al. 2003a] SPICHTINGER, P., K. GIERENS, U. LEITERER und D. H. (2003a). *Ice supersaturation in the tropopause region over Lindenberg, Germany*. Meteor. Z., 12:143–156.
- [SPICHTINGER et al. 2003b] SPICHTINGER, P., K. GIERENS und W. READ (2003b). *The global distribution of ice-supersaturated regions as seen by the microwave limb sounder*. Q. J. Roy. Meteor. Soc., 129:3391–3410.
- [SPICHTINGER et al. 2005] SPICHTINGER, P., K. GIERENS und H. WERNLI (2005). *A case study on the formation and evolution of ice supersaturation in the vicinity of a warm conveyor belt’s outflow region*. Atmos. Phys. Chem., 5:973–987.
- [STEPHENS et al. 2002] STEPHENS, G.L., D. VANE, R. BOAIN, G. MACE, K. SASSEN, Z. WANG, A. ILLINGWORTH, E. O’CONNOR, W. ROSSOW, S. DURDEN, S. MILLER, R. AUSTIN, A. BENEDETTI, C. MITRESCU und THE CLOUDSAT SCIENCE TEAM (2002). *The CloudSat mission and the A-train*. Bulletin of the American Meteorological Society, 83:1771–1790.
- [STEPHENS 1994] STEPHENS, L.S. (1994). *Remote Sensing of Lower Atmosphere, An Introduction*. Oxford University Press.

- [STORDAL et al. 2004] STORDAL, F., G. MYHRE, W. ARLANDER, T. SVENDBY, E. STORDAL, W. ROSSOW und D. LEE (2004). *Is there a trend in cirrus cloud cover due to aircraft traffic?*. Atmos. Chem. Phys., 4:6473–6501.
- [STRAUSS et al. 1997] STRAUSS, B., R. MEERKÖTTER, B. WISSINGER, P. WENDLING und M. HESS (1997). *On the regional climatic impact of contrails: Microphysical and radiative properties of contrails and natural cirrus clouds*. Ann. Geophys., 15:1457–1467.
- [STUBENRAUCH et al. 1999] STUBENRAUCH, C. J., W. B. ROSSOW, F. CHÉRUUY, A. CHÉDIN und N. A. SCOTT (1999). *Clouds as Seen by Satellite Sounders (3I) and Imagers (ISCCP). Part I: Evaluation of Cloud Parameters*. Journal of Climate, 12:2189–2213.
- [STUBENRAUCH und SCHUMANN 2005] STUBENRAUCH, C. J. und U. SCHUMANN (2005). *Impact of Air Traffic on Cirrus Coverage*. Geophysical Research Letters, 32:L14813 –.
- [THOMAS und STAMNES 1999] THOMAS, G.E. und K. STAMNES (1999). *Radiative transfer in the Atmosphere and Ocean*. Cambridge University Press.
- [TJEMKES und SCHMETZ 1998] TJEMKES, S.A. und J. SCHMETZ (1998). *Radiative Transfer Simulations for the Thermal Channels of Meteosat Second Generation*.
- [TRAVIS et al. 2002] TRAVIS, D.J., A. CARLETON und R. LAURITSEN (2002). *Contrails reduce daily temperature range, brief communications*. Nature, 418:601.
- [VORTISCH 2002] VORTISCH, H. (2002). *Beobachtung von Phasenübergängen in einzeln levitierten Schwefelsäuretröpfchen mittels Raman-Spektroskopie und elastischer Lichtstreuung*. PhD, FU Berlin.
- [WEICKMANN 1945] WEICKMANN, H. (1945). *Formen und Bildung atmosphärischer Eiskristalle*. Beitr. Phys. Atmos., 28:12–52.
- [WEICKMANN 1919] WEICKMANN, L. (1919). *Wolkenbildung durch ein Flugzeug*. Naturwissenschaften, 7:625.
- [WIELICKI et al. 1996] WIELICKI, BRUCE A., B. R. BARKSTROM, E. F. HARRISON, R. B. LEE III, G. L. SMITH und E. COOPER, JOHN (1996). *Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES): An Earth Observing System Experiment*. Bulletin of the American Meteorological Society, 77(5):853–868.
- [WMO 1987] WMO, WORLD METEOROLOGICAL ORGANISATION (1987). *International Cloud Atlas, Plates*. Technischer Bericht 407, WMO Geneva.
- [WMO 1995] WMO, WORLD METEOROLOGICAL ORGANISATION (1995). *International Cloud Atlas, Manual on the Observation of Clouds and Other Meteors..* Technischer Bericht I, WMO Geneva.
- [WYSER und STRÖM 1999] WYSER, K. und J. STRÖM (1999). *A possible change in cloud radiative forcing due to aircraft exhaust*. Geophys. Res. Lett., 25:1673–1676.
- [ZEREFOS et al. 2003] ZEREFOS, C., K. ELEFATHERATOS, D. BALIS, P. ZANIS, G. TSELIODIS und C. MELETI (2003). *Evidence of impact of aviation on cirrus cloud formation*. Atmos. Chem. Phys., 3:1633–1644.
- [ZHANG et al. 1999] ZHANG, Y., A. MACKE und F. ALBERS (1999). *Effect of crystal size spectrum and crystal shape on stratiform cirrus radiative forcing*. Atmosph. Res., 52:59–75.

# Index

## A

abgestrahlte Flussdichte, 10  
Absorption, 11  
adaptive Schwellwerte, 37  
äquivalente Helligkeitstemperatur, 23  
Albedoeffekt, 5  
anthropogener Treibhauseffekt, 16  
AQUA, 49  
ausgehende Strahlungsflussdichte am Oberrand  
der Atmosphäre, 55  
Azimut, 10

## B

Bestrahlungsstärke, 9  
Box-Car Filter, 36  
Boxcar Filter, 36  
Brechungsindex, 9

## C

CERES, 62  
Cirrocumulus, 29  
Cirrostratus, 29  
Cirrus, 29  
Cirrus Reflectance Flag, 49  
Cirrus\_Fraction\_SWIR\_FMean, 52  
Clouds and the Earth's Radiant Energy System,  
62

## D

diffuse Strahlung, 14  
Diffusion, 11  
dimensionslose optische Dicke, 12  
direkte Strahlung, 14

## E

Effektivradius, 13  
Einfachstreueralbedo, 12  
eingestrahelte Flussdichte, 9  
Eiswassergehalt, 13  
Emission, 11  
Emissionsvermögen, 11

ESA, 18  
EUMETCast, 19  
EUMETSAT, 18  
EUMETSAT Multicast Distribution System, 19  
Eumetsat Online Archive, 19  
EUROCONTROL, 69  
Europäischen Weltraumorganisation, 18  
European Organisation for the Safety of Air Na-  
vigation, 69  
Extinktionskoeffizient, 12

## F

Falschfarbenbilder, 34  
Flüssigwassergehalt, 13  
Flüssigwasserpfad, 13  
Flugverkehrsdichte, 68  
flugverkehrsinduzierte Zirruswolken, 3

## G

Gauß-Filter, 36  
Geoscience Laser Altimeter System, 49  
Geostationary Earth Radiation Budget, 18  
Geostationary Earth Radiation Budget Experi-  
ment, 22  
GERB, 18, 22  
Gewichtsfunktion, 27  
GLAS, 49

## H

Helligkeitstemperatur, 23  
High Rate Information Transmission, 19  
High Resolution Visible, 20  
Histogrammanalyse, 38  
Hotbird-6, 19  
HRIT, 19  
HRV, 20

## I

instantaner Strahlungsantrieb, 16  
International Satellite Cloud Climatology Pro-  
ject, 30  
ISCCP, 30

**K**

KNN, 58  
 Konvolution, 36  
 Konvolutionskern, 36  
 künstliches neuronales Netz, 58

**L**

libRadtran, 13, 153  
 line-by-line, 25  
 linienförmige Kondensstreifen, 3  
 Liquid Water Content, 13  
 Low Resolution, 20  
 LR, 20  
 LWC, 13

**M**

MCP, 18  
 MeCiDA, 39  
 Meteosat Second Generation, 18  
 METEOSAT-8, 18  
 Mission Communication Payload, 18  
 MOD06.L2, 49  
 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, 49  
 MODIS, 49  
 Morph&Dilate, 39  
 morphologischer Zirrustest, 39  
 MSG, 18  
 MSG Cirrus Detection Algorithm, 39  
 MYD08.M3, 52, 127

**N**

natürlicher Treibhauseffekt, 15  
 Nettostrahlungsflussdichte, 14  
 Neuronale Netze, 38  
 neuronales Netz, 58

**O**

optische Dicke, 12

**P**

Phasenfunktion, 12  
 Plancksche Strahlungsformel, 11  
 potentieller Kondensstreifenbedeckungsgrad, 2

**R**

Rang-Korrelationskoeffizient, 149  
 Reflektivität, 25  
 Reflexion, 11

**S**

S&R, 18  
 schwarzer Strahler, 11  
 Search and Rescue transponder, 18  
 SEVIRI, 18, 19  
 signifikante Mittelwertsdifferenz, 150  
 Signifikanztest, 150  
 SimSat, 32, 153  
 single scattering albedo, 12  
 Spearmansche Rang-Korrelationskoeffizient, 149  
 Spearmanscher Rang-Korrelationskoeffizient, 76  
 spektrale Empfindlichkeitsfunktion, 23  
 spektrale Strahldichte, 10  
 spezifische Ausstrahlung, 10  
 Spinning Enhanced Visible and Infra-Red Imager, 19  
 Stefan Boltzmann Gesetz, 11  
 Stereoskopie, 38  
 Strahlungsantrieb, 5, 16  
 Strahlungsfluss, 9  
 Strahlungsleistung, 9  
 Strahlungstransportgleichung, 14  
 Strahlungsübertragungsgleichung, 14  
 stratosphären-adjustierte Strahlungsantrieb, 16  
 Streuung, 11

**T**

TERRA, 49  
 Transmission, 11  
 Treibhauseffekt, 5

**U**

uvspec, 153

**V**

Validierung, 49, 121

**W**

Wellenlänge, 9  
 Wellenzahl, 9  
 Wien'sches Verschiebungsgesetz, 11

**Z**

Zenitwinkel, 10

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Strahlungsantrieb des Flugverkehrs. Quelle:[SAUSEN et al. 2005]. . . . .	1
1.2	Kondensstreifen und flugverkehrsinduzierte Zirren über Spanien. MSG-SEVIRI 2004/05/28 10:00 UTC. . . . .	4
2.1	Definition der Geometrie, Raumrichtungen und des Raumwinkelementes $d\Omega$ . Quelle: [KIDDER und VONDER HAAR 1995]. . . . .	10
2.2	<b>Links:</b> Die spektrale Intensitätsverteilung der schwarzen Strahlung nach dem Planckschen Strahlungsgesetz. Quelle: [GERTHSEN und VOGEL 1993], S. 543. <b>Rechts:</b> Bei steigender Temperatur verschiebt sich das Maximum der abgestrahlten Energie zu kürzeren Wellenlängen hin (Wiensches Verschiebungsgesetz). Quelle: <a href="http://www.geographie.rub.de/agklima/vorlesung/strahlung/gesetze.html">http://www.geographie.rub.de/agklima/vorlesung/strahlung/gesetze.html</a> . . . . .	11
2.3	Normalisierte Schwarzkörperkurven für die solare und terrestrische Strahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge $\lambda[\mu m]$ . Quelle: [TJEMKES und SCHMETZ 1998].	15
2.4	Global und über das Jahr gemittelte Energiebilanz der Erde. Quelle: [BAKAN und RASCHKE 2002]. . . . .	15
2.5	Meteosat-8 bzw. Meteosat Second Generation 1 (MSG-1). Quelle: <a href="http://www.zdf.de">http://www.zdf.de</a> . . . . .	18
2.6	SEVIRI scan. Quelle: [EUMETSAT 2005a] . . . . .	19
2.7	<b>Links:</b> 1. SEVIRI HRV-Kanal Bild vom 28. November 2002. <b>Rechts:</b> 1. SEVIRI VIS 0.6 Kanal Bild vom 28. November 2002. Quelle: <a href="http://www.eumetsat.int">http://www.eumetsat.int</a> . . . . .	20
2.8	Falschfarbenbild aus den drei nördlichen SEVIRI Segmenten. . . . .	20
2.9	Geostationary Earth Radiation Budget Experiment (GERB). Quelle: <a href="http://www.ssd.rl.ac.uk/gerb/photos.htm">http://www.ssd.rl.ac.uk/gerb/photos.htm</a> . . . . .	21
2.10	<b>Links:</b> 1. GERB-Gesamtspektrumbild vom 12. Dezember 2002. <b>Rechts:</b> 1. GERB-Solarspektrumbild vom 12. Dezember 2002. Quelle: <a href="http://www.eumetsat.int">http://www.eumetsat.int</a> . . . . .	22
2.11	Spektrale Empfindlichkeitsfunktionen der Kanäle: WV_062, WV_073, IR_087, IR_097, IR_108, IR_120, IR_134 . . . . .	23
2.12	Äquivalente Helligkeitstemperatur als approximierte Funktion der gemessenen Strahldichte für die SEVIRI Kanäle: WV_062, WV_073, IR_087, IR_097, IR_108, IR_120, IR_134. Die Linien bei 150K und 350K markieren den Gültigkeitsbereich. . . . .	24
2.13	Nach oben gerichtete Strahldichte am Oberrand der “mid-latitude summer“ Atmosphäre, aufgetragen als äquivalente Helligkeitstemperatur als Funktion der Wellenzahl. Die Position der thermischen SEVIRI Kanäle ist oben aufgetragen und mit der zentralen Wellenlänge in $\mu m$ markiert. Unten sind die wichtigsten Absorptionsbänder der verschiedenen Spurengase schematisch aufgetragen. Quelle: [TJEMKES und SCHMETZ 1998]. . . . .	25

2.14	(a) Normalisierte Schwarzkörperkurven für die solare und terrestrische Strahlung. (b) Das gesamte Absorptionsspektrum der Atmosphäre vom Boden und (c) oberhalb von 11km. (d) Absorptionsspektrum der wichtigsten Spurengase. Quelle: [THOMAS und STAMNES 1999]. . . . .	26
2.15	Simulierte Helligkeitstemperaturen für eine Atmosphäre mit Eiswolken (Form: zufällig verteilte prolata Sphäroide) als Funktion der Wellenzahl für unterschiedliche Eis-Wasser-Pfade. Quelle: [BANTGES et al. 1999]. . . . .	26
2.16	Mittlere Gewichtsfunktion der thermischen Kanäle. Quelle: [EUMETSAT 2005a] . . . . .	27
3.1	ISSCP Klassifikation der bewölkten Bildelemente. Klassifikation erfolgt nach optischer Dicke und Druck an der Wolkenoberkante. Nachts wird nur der Druck an der Wolkenoberkante bestimmt, so dass nur nach "low", "middle" und "top" klassifiziert wird. Quelle: [ROSSOW und SCHIFFER 1999]. . . . .	30
3.2	<b>Links:</b> Simulation der Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR_108 und IR_120 in Abhängigkeit von der optischen Dicke einer Eiswolke für verschiedene Atmosphärenprofile, <i>MLS Midlatitude Summer, MLW Midlatitude Winter, TRO Tropical, SAS Subartical Summer, SAW Subartical Winter</i> und für zwei verschiedene Satellitenzenitwinkel. <b>Rechts:</b> Simulation der Helligkeitstemperaturdifferenz minus der Differenz ohne die Zirruswolke der Kanäle IR_108 und IR_120 in Abhängigkeit der optischen Dicke einer Eiswolke für verschiedene Atmosphärenprofile, <i>MLS Midlatitude Summer, MLW Midlatitude Winter, TRO Tropical, SAS Subartical Summer, SAW Subartical Winter</i> und für zwei verschiedene Satellitenzenitwinkel. . . . .	32
3.3	Simulation der Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle WV_062 und WV_073 in Abhängigkeit der optischen Dicke einer Eiswolke für verschiedene Wolkenoberkanten. . . . .	33
3.4	<b>Links:</b> Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR_62 und IR_73. <b>Rechts:</b> Falschfarbenbild rot: VIS006, grün: VIS008, blau: IR_108 invertiert. . . . .	34
3.5	<b>Links:</b> Kondensstreifen über Mallorca. Falschfarbenbild rot: VIS006, grün: VIS008, blau: IR_108 invertiert <b>Rechts:</b> Falschfarbenbild der selben Szene mit HRV. rot:VIS006+HRV, grün:HRV, blau:IR_108 invertiert. . . . .	35
3.6	Helligkeitstemperatur des Wasserdampfkanals WV_073. . . . .	35
3.7	2-D Gaußverteilung mit Mittelwert (0,0) $\sigma = 1$ . . . . .	37
3.8	<b>Links:</b> Boxcar-Filter angewandt auf den Wasserdampfkanal WV_073. Das Originalbild ist vom geglätteten Bild subtrahiert. <b>Rechts:</b> Zirrusmaske als Ergebnis des morphologischen Zirrustests $BOXCAR(T_{7,3}) - T_{7,3} > 0.5K$ . . . . .	37
3.9	Simulationsergebnis der Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle WV_062 und WV_073 in Abhängigkeit der optischen Dicke für verschiedene Höhen der Wolkenoberkante einer Zirruswolke. Atmosphäre: Mid Latitude Summer, Satellitenblickwinkel: $60^\circ$ , geometrische Dicke: 1 km, Effektivradius: $6\mu m$ . . . . .	39
3.10	<b>Links:</b> Simulationsergebnis der Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR_108 und IR_120 in Abhängigkeit der optischen Dicke für verschiedene Bodentemperaturen. Satellitenblickwinkel: $60^\circ$ , Wolkenoberkante: 11 km, geometrische Dicke: 1 km, Effektivradius: $6\mu m$ . <b>Rechts:</b> Selbe Szene subtrahiert mit der Helligkeitstemperaturdifferenz der wolkenfreien Atmosphäre. . . . .	40
3.11	<b>Links:</b> Simulationsergebnis der Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR_087 und IR_120 in Abhängigkeit der optischen Dicke für verschiedene Bodentemperaturen. Satellitenblickwinkel: $60^\circ$ , Wolkenoberkante: 11 km, geometrische Dicke: 1 km, Effektivradius: $6\mu m$ . <b>Rechts:</b> Selbe Szene subtrahiert mit der Helligkeitstemperaturdifferenz der wolkenfreien Atmosphäre. . . . .	40

3.12	Volumenabsorptionskoeffizient von Eispartikeln (durchgezogen Linie) im Vergleich mit den SEVIRI Kanälen IR_087, IR_108 und IR_120 (gestrichelte Linien). Effektivradius: $10\mu m$ , Eiswassergehalt $1\frac{g}{m^3}$ , Form: hexagonal. Simuliert mit <b>cldprp</b> aus dem libRadtran Paket. Eisparametrisierung aus [KEY et al. 2002]. . . . .	41
3.13	Simulationsergebnis der Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR_087 und IR_108 in Abhängigkeit der optischen Dicke für verschiedene Bodentemperaturen. Satellitenblickwinkel: $60^\circ$ , Wolkenoberkante: 11 km, geometrische Dicke: 1 km, Effektivradius: $6\mu m$ . . . . .	41
3.14	Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR_097 und IR_134. . . . .	42
3.15	<b>Links:</b> Simulationsergebnis der Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR_097 und IR_134 in Abhängigkeit der optischen Dicke für verschiedene Bodentemperaturen. Satellitenblickwinkel: $60^\circ$ , Wolkenoberkante: 11 km, geometrische Dicke: 1 km, Effektivradius: $6\mu m$ . <b>Rechts:</b> Selbe Szene subtrahiert mit der Helligkeitstemperaturdifferenz der wolkenfreien Atmosphäre. . . . .	43
3.16	<b>Oben:</b> Ergebnis des MeCiDA-Zirrustests für die oberen 3 Segmente in Satellitenprojektion. Die Zirren sind unterschiedlich gefärbt dargestellt. Blau sind die Ergebnisse der Tests T4, T5 und T6. Gelb sind die Ergebnisse der Tests T1, T2 und T3. Weiß sind die von beiden Kombinationen erkannten Zirren. <b>Unten:</b> Zum Vergleich ein Falschfarbenbild der selben Szene. Datum: 2004/03/03. Zeit: 14:30 UTC. . . . .	45
3.17	Das Ergebnis des MeCiDA Zirrenerkennungsalgorithmus projiziert auf eine äquidistante zylindrische Projektion. Hellblau sind die Gebiete mit einem Satellitenzenitwinkel größer $75^\circ$ . Datum: 2004/03/03. Zeit: 14:30 UTC. Koordinaten: $80^\circ W - 50^\circ O, 20^\circ N - 75^\circ N$ . . . . .	46
3.18	Mittlere Zirrusdichte in äquidistanter zylindrischer Projektion für das Intervall 12:00-17:45 UTC, 2004/03/03. Hellblau sind die Gebiete mit einem Satellitenzenitwinkel größer $75^\circ$ . . . . .	46
3.19	Morph & Dilate- Zirrustest . . . . .	47
3.20	Morphologischer Zirrustest . . . . .	48
3.21	Vergleich der Ergebnisse des SEVIRI MeCiDa-Algorithmus mit MODIS-Terra Cirrus Reflectance Flag aus MOD06_L2. Datum: 2004/05/31 11:00 UTC . . . . .	49
3.22	<b>Oben:</b> Falschfarbenbild mit HRV-Kanal über Anatolien. Datum: 2004/03/09 08:45 UTC. <b>Unten:</b> Falschfarbenbild mit HRV-Kanal über der Sinai Halbinsel. Datum: 2004/03/09 08:45 UTC. . . . .	51
3.23	<b>Links:</b> Der SEVIRI MeCiDa Monatsmittelwert, Monat Mai 2004 für das <b>CONTRAILS</b> Gebiet: $80^\circ W, 50^\circ O, 20^\circ N, 75^\circ N$ . <b>Rechts:</b> MODIS Cirrus_Fraction_SWIR_FMean Zirrus Monatsmittelwert aus MYD08_M3, Monat Mai 2004. . . . .	52
3.24	Vergleich der MeCiDA Monatsmittelwerte und der MODIS SWIR Zirrus Monatsmittelwerte aus MYD08_M3, Mai 2004. . . . .	52
3.25	<b>Links Oben:</b> Der SEVIRI MeCiDa Jahresmittelwert 2004 für das <b>CONTRAILS</b> Gebiet: $80^\circ W, 50^\circ O, 20^\circ N, 75^\circ N$ . <b>Rechts Oben:</b> MODIS Cirrus_Fraction_SWIR_FMean Cirrus Jahresmittelwert aus MYD08_M3, 2004. <b>Unten:</b> Vergleich der SEVIRI MeCiDA Jahresmittelwerte und der MODIS SWIR Cirrus Jahresmittelwerte aus MYD08_M3, 2004. . . . .	53
3.26	Gefittete langwellige Strahlungsflussdichte umgewandelt in Temperatur im Vergleich mit den Modelldaten für Szenen mit Zirrus und ohne Zirrus. . . . .	56
3.27	Gefittete kurzwellige Strahlungsflussdichte im Vergleich mit den Modelldaten für Szenen mit Zirrus und ohne Zirrus. . . . .	57

3.28	Neuron mit Ein- und Ausgabe. . . . .	59
3.29	Mit Hilfe des neuronalen Netzes berechnete kurzwellige Strahlungsflussdichte im Vergleich mit den Modelldaten für Szenen mit Zirrus und ohne Zirrus. . . . .	61
3.30	Ausgehende kurzwellige Strahlungsflussdichte in $\frac{W}{m^2}$ am Oberrand der Atmosphäre 2004/03/10 10:00 UTC. Berechnet mit neuronalem Netz aus MSG-Daten. . . . .	61
3.31	Differenz der ausgehenden langwelligen Strahlungsflussdichten am Oberrand der Atmosphäre, abgeleitet aus MSG Daten und CERES Daten. . . . .	62
3.32	Vergleich der ausgehenden langwelligen Strahlungsflussdichten zwischen CERES und MSG. . . . .	63
3.33	<b>Links:</b> Vergleich der ausgehenden langwelligen Strahlungsflussdichten der Zirruswolken zwischen CERES und MSG. <b>Rechts:</b> Vergleich der ausgehenden langwelligen Strahlungsflussdichten ohne Zirruswolken zwischen CERES und MSG (Neuronales Netz). . . . .	63
3.34	Differenz der ausgehenden kurzwelligen Strahlungsflussdichten am Oberrand der Atmosphäre, abgeleitet aus MSG Daten und CERES Daten. . . . .	64
3.35	Vergleich der ausgehenden kurzwelligen Strahlungsflussdichten zwischen CERES und MSG (Neuronales Netz). . . . .	64
3.36	<b>Links:</b> Vergleich der ausgehenden kurzwelligen Strahlungsflussdichten der zirrusbedeckten Bildelemente zwischen CERES und MSG. <b>Rechts:</b> Vergleich der ausgehenden kurzwelligen Strahlungsflussdichten der zirrusfreien Bildelemente zwischen CERES und MSG (Neuronales Netz). . . . .	64
4.1	<b>Links:</b> Aus MSG-SEVIRI abgeleitete Zirrusmaske für das Teilgebiet $15^\circ W - 20^\circ O, 30^\circ N - 60^\circ N$ , 2004/02/11 07:45 UTC. <b>Rechts:</b> Integrierte Flugverkehrsdichte im Zeitintervall 07:30 - 07:45 UTC, 2004/02/11. . . . .	69
4.2	<b>Links:</b> Autokorrelationskoeffizienten $k_{i,j,1}$ der Zirrusmaske für Februar 2004. <b>Rechts:</b> Autokorrelationskoeffizienten $k_{0,0,1}$ der Zirrusmaske für Februar 2004 . . . .	71
4.3	<b>Links:</b> Autokorrelationskoeffizienten $k_{i,j,1}$ der Flugverkehrsdichte für Februar 2004. <b>Rechts:</b> Autokorrelationskoeffizienten $k_{0,0,1}$ der Flugverkehrsdichte für Februar 2004	71
4.4	<b>Obere Grafik:</b> Mittlere Zirrusbedeckung (oben) und mittlere Flugverkehrsdichte für das Teilgebiet für den Zeitraum Mai 2004. <b>Untere Grafik:</b> Tagesgang des mittleren Bedeckungsgrades der Zirren (Rauten) und Tagesgang der Flugverkehrsdichte (Sterne) gemittelt aus 31 Tagen des Mai 2004. . . . .	72
4.5	<b>Obere Grafik:</b> Zirrusbedeckung in Abhängigkeit der mittleren Flugverkehrsdichte für das Teilgebiet für den Zeitraum Mai 2004. Die gestrichelte Linie ist die Abhängigkeit der Zirrusbedeckung ohne Berücksichtigung des Tagesgangs. Die durchgezogene Linie ist die Abhängigkeit mit Berücksichtigung des Tagesgangs. <b>Untere Grafik:</b> Zirrusbedeckung in Abhängigkeit der mittleren Flugverkehrsdichte für das Teilgebiet für den Zeitraum Mai 2004. Die gestrichelte Linie ist die Abhängigkeit der Zirrusbedeckung ohne Berücksichtigung des Tagesgangs. Die durchgezogene Linie ist die Abhängigkeit mit Berücksichtigung des Tagesgangs. . . . .	73
4.6	Mittlerer Bedeckungsgrad in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für Februar 2004. Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) wurden aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet. . . . .	78
4.7	Mittlere Zirrusbedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für Februar 2004 für die Bildelemente über Land aus dem Gebiet ( $15^\circ W - 20^\circ O, 30^\circ N - 60^\circ N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) wurden aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet. . . . .	78

4.8	Mittlere Zirusbedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für Februar 2004 für die Bildelemente über Wasser aus dem Gebiet ( $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 30^{\circ}N - 60^{\circ}N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) wurden aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet. . . . .	79
4.9	Mittlere Zirusbedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für März bis Dezember 2004 für die Bildelemente aus dem Gebiet ( $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 30^{\circ}N - 60^{\circ}N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) wurden aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet. . . . .	80
4.10	Mittlere Zirusbedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für März bis Dezember 2004 für die Bildelemente über Land aus dem Gebiet ( $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 30^{\circ}N - 60^{\circ}N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) wurden aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet. . . . .	81
4.11	Mittlere Zirusbedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für März bis Dezember 2004 für die Bildelemente über Wasser aus dem Gebiet ( $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 30^{\circ}N - 60^{\circ}N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) wurden aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet. . . . .	82
4.12	Zirusbedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für UTC 03:00, 08:00, 12:30 und 18:00 für das Jahr 2004 für die Bildelemente aus dem Gebiet ( $15^{\circ}W - 30^{\circ}N, 20^{\circ}O - 60^{\circ}N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) wurden aus 2000 Bildelementen pro Klasse berechnet. . . . .	84
4.13	Zirusbedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für UTC 03:00, 08:00, 12:30 und 18:00 für das Jahr 2004 für die Bildelemente über Land aus dem Gebiet ( $15^{\circ}W - 30^{\circ}N, 20^{\circ}O - 60^{\circ}N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) wurden aus 2000 Bildelementen pro Klasse berechnet. . . . .	85
4.14	Zirusbedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für UTC 03:00, 08:00, 12:30 und 18:00 für das Jahr 2004 für die Bildelemente über Wasser aus dem Gebiet ( $15^{\circ}W - 30^{\circ}N, 20^{\circ}O - 60^{\circ}N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) wurden aus 2000 Bildelementen pro Klasse berechnet. . . . .	85
4.15	Zirusbedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für 2004 für das Gebiet ( $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 30^{\circ}N - 60^{\circ}N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) wurden aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet. . . . .	87
4.16	Zirusbedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für 2004 für die Bildelemente über Land aus dem Gebiet ( $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 30^{\circ}N - 60^{\circ}N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) wurden aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet. . . . .	88
4.17	Zirusbedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für 2004 für die Bildelemente über Wasser aus dem Gebiet ( $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 30^{\circ}N - 60^{\circ}N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) wurden aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet. . . . .	88
4.18	Mittlere Flugverkehrsdichte pro $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ -Box für das Jahr 2004 (11 Monate) für das Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ). . . . .	91
4.19	Zirusbedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für 2004 für das Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) wurden aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet. . . . .	92
4.20	Zirusbedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für 2004 für die Bildelemente über Land aus dem Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) wurden aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet. . . . .	92

- 4.21 Zirrusbedeckung in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für 2004 für die Bildelemente über Wasser aus dem Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) wurden aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet. . . . . 93
- 5.1 **Oben:** Mittlere ausgehende Strahlungsflussdichte (langwellig + kurzwellig) am Oberrand der Atmosphäre [ $\frac{W}{m^2}$ ] pro  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ -Box für das Jahr 2004 (11 Monate) für das gesamte Untersuchungsgebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ) und Europa-Nordafrika-Teilregion ( $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 20^{\circ}N - 60^{\circ}N$ ). **Mitte:** Langwelliger Anteil der Strahlungsflussdichte [ $\frac{W}{m^2}$ ]. **Unten:** Kurzwelliger Anteil der Strahlungsflussdichte [ $\frac{W}{m^2}$ ]. 99
- 5.2 Mittlere ausgehende Strahlungsflussdichte (kurzwellig + langwellig) am Oberrand der Atmosphäre für Februar, Mai, Juli und Oktober 2004 in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte. Bildelemente sind zufällig aus dem Gebiet ( $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 20^{\circ}N - 60^{\circ}N$ ) ausgewählt. Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet. . . . . 100
- 5.3 Mittlere ausgehende Strahlungsflussdichte (kurzwellig + langwellig) am Oberrand der Atmosphäre für 11 Monate des Jahres 2004 in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte. Bildelemente sind zufällig aus dem Gebiet ( $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 20^{\circ}N - 60^{\circ}N$ ) ausgewählt. Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet. . . . . 102
- 5.4 Mittlere ausgehende Strahlungsflussdichte (kurzwellig + langwellig) am Oberrand der Atmosphäre um 03:00, 06:00, 09:00, 12:00, 15:00, 18:00 und 21:00 UTC 2004 in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte. Bildelemente sind zufällig aus dem Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ) ausgewählt. Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) aus 2000 Bildelementen pro Klasse berechnet. . . . . 104
- 5.5 Tagesgang der Wirkung des Flugverkehrs auf den Strahlungsantrieb . . . . . 105
- 5.6 **Oben:** Ausgehende Strahlungsflussdichte (kurzwellig + langwellig) am Oberrand der Atmosphäre in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für 2004 für die Bildelemente aus dem Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet. **Unten links:** Kurzwellige ausgehende Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte. **Unten rechts:** Langwellige ausgehende Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte. . . . . 107
- 5.7 **Oben:** Ausgehende Strahlungsflussdichte (kurzwellig + langwellig) am Oberrand der Atmosphäre in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für 2004 für die Bildelemente über Land aus dem Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet. **Unten links:** Kurzwellige ausgehende Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte. **Unten rechts:** Langwellige ausgehende Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte. . . . . 110
- 5.8 **Oben:** Ausgehende Strahlungsflussdichte (kurzwellig + langwellig) am Oberrand der Atmosphäre in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte für 2004 für die Bildelemente über Wasser aus dem Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ). Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) aus 20000 Bildelementen pro Klasse berechnet. **Unten links:** Kurzwellige ausgehende Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte. **Unten rechts:** Langwellige ausgehende Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit von der Flugverkehrsdichte. . . . . 112
- A.1 Vergleich der Ergebnisse des SEVIRI MeCiDa-Algorithmus mit MODIS-Terra Cirrus Reflectance Flag aus MOD06\_L2. Datum: 2004/02/12 11:15 UTC . . . . . 121

A.2 Vergleich der Ergebnisse des SEVIRI MeCiDa-Algorithmus mit MODIS-Terra Cirrus Reflectance Flag aus MOD06\_L2. Datum: 2004/03/09 08:45 UTC . . . . . 122

A.3 Vergleich der Ergebnisse des SEVIRI MeCiDa-Algorithmus mit MODIS-Terra Cirrus Reflectance Flag aus MOD06\_L2. Datum: 2004/04/22 14:00 UTC . . . . . 122

A.4 Vergleich der Ergebnisse des SEVIRI MeCiDa-Algorithmus mit MODIS-Terra Cirrus Reflectance Flag aus MOD06\_L2. Datum: 2004/05/31 11:00 UTC . . . . . 123

A.5 Vergleich der Ergebnisse des SEVIRI MeCiDa-Algorithmus mit MODIS-Terra Cirrus Reflectance Flag aus MOD06\_L2. Datum: 2004/06/05 12:45 UTC . . . . . 123

A.6 Vergleich der Ergebnisse des SEVIRI MeCiDa-Algorithmus mit MODIS-Terra Cirrus Reflectance Flag aus MOD06\_L2. Datum: 2004/07/23 09:30 UTC . . . . . 124

A.7 Vergleich der Ergebnisse des SEVIRI MeCiDa-Algorithmus mit MODIS-Terra Cirrus Reflectance Flag aus MOD06\_L2. Datum: 2004/08/14 14:00 UTC . . . . . 124

A.8 Vergleich der Ergebnisse des SEVIRI MeCiDa-Algorithmus mit MODIS-Terra Cirrus Reflectance Flag aus MOD06\_L2. Datum: 2004/09/17 12:00 UTC . . . . . 125

A.9 Vergleich der Ergebnisse des SEVIRI MeCiDa-Algorithmus mit MODIS-Terra Cirrus Reflectance Flag aus MOD06\_L2. Datum: 2004/10/03 10:15 UTC . . . . . 125

A.10 Vergleich der Ergebnisse des SEVIRI MeCiDa-Algorithmus mit MODIS-Terra Cirrus Reflectance Flag aus MOD06\_L2. Datum: 2004/11/14 11:00 UTC . . . . . 126

A.11 Vergleich der Ergebnisse des SEVIRI MeCiDa-Algorithmus mit MODIS-Terra Cirrus Reflectance Flag aus MOD06\_L2. Datum: 2004/12/03 09:45 UTC . . . . . 126

A.12 **Links Oben:** Der SEVIRI MeCiDa Jahresmittelwert 2004 für das **CONTRAILS** Gebiet:  $80^{\circ}W, 50^{\circ}O, 20^{\circ}N, 75^{\circ}N$ . **Rechts Oben:** MODIS Cirrus\_Fraction\_SWIR\_FMean Cirrus Jahresmittelwert aus MYD08\_M3, 2004. **Unten:** Vergleich der SEVIRI MeCiDA Jahresmittelwerte und der MODIS SWIR Cirrus Jahresmittelwerte aus MYD08\_M3, 2004. . . . . 127

A.13 **Links Oben:** Der SEVIRI MeCiDa Monatsmittelwert, Februar 2004 für das **CONTRAILS** Gebiet:  $80^{\circ}W, 50^{\circ}O, 20^{\circ}N, 75^{\circ}N$ . **Rechts Oben:** MODIS Cirrus\_Fraction\_SWIR\_FMean Zirrus Monatsmittelwert aus MYD08\_M3, Februar 2004. **Unten:** Vergleich der SEVIRI MeCiDA Monatsmittelwerte und der MODIS SWIR Zirrus Monatsmittelwerte aus MYD08\_M3, Februar 2004. . . . . 128

A.14 **Links:** Der SEVIRI MeCiDa Monatsmittelwert, März 2004 für das **CONTRAILS** Gebiet:  $80^{\circ}W, 50^{\circ}O, 20^{\circ}N, 75^{\circ}N$ . **Rechts:** MODIS Cirrus\_Fraction\_SWIR\_FMean Zirrus Monatsmittelwert aus MYD08\_M3, März 2004. **Unten:** Vergleich der SEVIRI MeCiDA Monatsmittelwerte und der MODIS SWIR Zirrus Monatsmittelwerte, März 2004. . . . . 128

A.15 **Links:** Der SEVIRI MeCiDa Monatsmittelwert, April 2004 für das **CONTRAILS** Gebiet:  $80^{\circ}W, 50^{\circ}O, 20^{\circ}N, 75^{\circ}N$ . **Rechts:** MODIS Cirrus\_Fraction\_SWIR\_FMean Zirrus Monatsmittelwert aus MYD08\_M3, April 2004. **Unten:** Vergleich der SEVIRI MeCiDA Monatsmittelwerte und der MODIS SWIR Zirrus Monatsmittelwerte, April 2004. . . . . 129

A.16 **Links:** Der SEVIRI MeCiDa Monatsmittelwert, Mai 2004 für das **CONTRAILS** Gebiet:  $80^{\circ}W, 50^{\circ}O, 20^{\circ}N, 75^{\circ}N$ . **Rechts:** MODIS Cirrus\_Fraction\_SWIR\_FMean Zirrus Monatsmittelwert aus MYD08\_M3, April 2004. **Unten:** Vergleich der SEVIRI MeCiDA Monatsmittelwerte und der MODIS SWIR Zirrus Monatsmittelwerte, April 2004. . . . . 129

- A.17 **Links:** Der SEVIRI MeCiDa Monatsmittelwert, Juni 2004 für das **CONTRAILS** Gebiet:  $80^{\circ}W, 50^{\circ}O, 20^{\circ}N, 75^{\circ}N$ . **Rechts:** MODIS Cirrus\_Fraction\_SWIR\_FMean Zirus Monatsmittelwert aus MYD08\_M3, Juni 2004. **Unten:** Vergleich der SEVIRI MeCiDA Monatsmittelwerte und der MODIS SWIR Zirus Monatsmittelwerte, Juni 2004. . . . . 130
- A.18 **Links:** Der SEVIRI MeCiDa Monatsmittelwert, Juli 2004 für das **CONTRAILS** Gebiet:  $80^{\circ}W, 50^{\circ}O, 20^{\circ}N, 75^{\circ}N$ . **Rechts:** MODIS Cirrus\_Fraction\_SWIR\_FMean Zirus Monatsmittelwert aus MYD08\_M3, Juli 2004. **Unten:** Vergleich der SEVIRI MeCiDA Monatsmittelwerte und der MODIS SWIR Zirus Monatsmittelwerte, Juli 2004. . . . . 130
- A.19 **Links:** Der SEVIRI MeCiDa Monatsmittelwert, August 2004 für das **CONTRAILS** Gebiet:  $80^{\circ}W, 50^{\circ}O, 20^{\circ}N, 75^{\circ}N$ . **Rechts:** MODIS Cirrus\_Fraction\_SWIR\_FMean Zirus Monatsmittelwert aus MYD08\_M3, August, 2004. **Unten:** Vergleich der SEVIRI MeCiDA Monatsmittelwerte und der MODIS SWIR Zirus Monatsmittelwerte, August 2004 . . . . . 131
- A.20 **Links:** Der SEVIRI MeCiDa Monatsmittelwert, September 2004 für das **CONTRAILS** Gebiet:  $80^{\circ}W, 50^{\circ}O, 20^{\circ}N, 75^{\circ}N$ . **Rechts:** MODIS Cirrus\_Fraction\_SWIR\_FMean Zirus Monatsmittelwert aus MYD08\_M3, September 2004. **Unten:** Vergleich der SEVIRI MeCiDA Monatsmittelwerte und der MODIS SWIR Zirus Monatsmittelwerte, September 2004. . . . . 131
- A.21 **Links:** Der SEVIRI MeCiDa Monatsmittelwert, Oktober 2004 für das **CONTRAILS** Gebiet:  $80^{\circ}W, 50^{\circ}O, 20^{\circ}N, 75^{\circ}N$ . **Rechts:** MODIS Cirrus\_Fraction\_SWIR\_FMean Zirus Monatsmittelwert aus MYD08\_M3, Oktober 2004. **Unten:** Vergleich der SEVIRI MeCiDA Monatsmittelwerte und der MODIS SWIR Zirus Monatsmittelwerte, Oktober 2004. . . . . 132
- A.22 **Links:** Der SEVIRI MeCiDa Monatsmittelwert, November 2004 für das **CONTRAILS** Gebiet:  $80^{\circ}W, 50^{\circ}O, 20^{\circ}N, 75^{\circ}N$ . **Rechts:** MODIS Cirrus\_Fraction\_SWIR\_FMean Zirus Monatsmittelwert aus MYD08\_M3, November 2004. **Unten:** Vergleich der SEVIRI MeCiDA Monatsmittelwerte und der MODIS SWIR Zirus Monatsmittelwerte, November 2004. . . . . 132
- A.23 **Links:** Der SEVIRI MeCiDa Monatsmittelwert, Dezember 2004 für das **CONTRAILS** Gebiet:  $80^{\circ}W, 50^{\circ}O, 20^{\circ}N, 75^{\circ}N$ . **Rechts:** MODIS Cirrus\_Fraction\_SWIR\_FMean Zirus Monatsmittelwert aus MYD08\_M3, Dezember 2004. **Unten:** Vergleich der SEVIRI MeCiDA Monatsmittelwerte und der MODIS SWIR Zirus Monatsmittelwerte, Dezember 2004. . . . . 133
- C.1 Signifikanz des Spearmanschen Rangkorrelationskoeffizienten  $r_s$ . Quelle: [SACHS 1969], S. 391, Tabelle 103. (n = Anzahl der Stichproben) . . . . . 150
- C.2 Signifikanzschranken der t-Verteilung Quelle: [SACHS 1969], S. 140, Tabelle 27. FG = Freiheitsgrad . . . . . 151
- D.1 Ergebnisse der Simulation der thermischen MSG Kanäle für den wolkenfreien Fall unter Annahme einer *Midlatitude Summer* Atmosphäre. Dargestellt ist die Helligkeitstemperatur in Abhängigkeit vom Satellitenzenitwinkel  $\cos(\theta)$ . . . . . 156
- D.2 Ergebnisse der Simulation der Tests für den wolkenfreien Fall für verschiedene Atmosphärenprofile, MLS - *Midlatitude Summer*, MLW - *Midlatitude Winter*, TRO - *Tropical*, SAS - *Subartical Summer*, SAW - *Subartical Winter*. Dargestellt die Helligkeitstemperaturdifferenz in Abhängigkeit vom Satellitenzenitwinkel  $\cos(\theta)$ . Zusätzlich wird die Bodentemperatur variiert. . . . . 157

D.3 Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirruswolken. Dargestellt ist Helligkeitstemperaturdifferenz der Wasserdampfkanäle WV\_062 und WV\_073 in Abhängigkeit von der optischen Dicke  $\tau$ . Zusätzlich variiert wird (oben links) der Satellitenzenitwinkel  $\theta$ , (oben rechts) die Höhe der Zirrusoberkante, (unten) Atmosphäre. Im unteren Bild sind die Ergebnisse für zwei Satellitenzenitwinkel dargestellt. Im Bild oben links wird von der Helligkeitstemperaturdifferenz der beiden Kanäle die Helligkeitstemperaturdifferenz für den wolkenfreien Fall subtrahiert. . . . . 159

D.4 Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirruswolken. Links dargestellt ist Helligkeitstemperaturdifferenz der Fensterkanäle IR\_108 und IR\_120. Rechts wird die Helligkeitstemperaturdifferenz für den wolkenfreien Fall von der Kanaldifferenz mit Zirruswolke subtrahiert. Variiert wird (von oben nach unten) der Satellitenzenitwinkel, die Bodentemperatur, Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) und die Höhe der Zirrusoberkante. . . . . 160

D.5 Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirruswolken. Links dargestellt ist Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR\_087 und IR\_108. Rechts wird die Helligkeitstemperaturdifferenz für den wolkenfreien Fall von der Kanaldifferenz mit Zirruswolke subtrahiert. Variiert werden (von oben nach unten) der Satellitenzenitwinkel, die Bodentemperatur, Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) und die Höhe der Zirrusoberkante. . . . . 161

D.6 Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirruswolken. Links dargestellt ist Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR\_087 und IR\_120. Rechts wird die Helligkeitstemperaturdifferenz für den wolkenfreien Fall von der Kanaldifferenz mit Zirruswolke subtrahiert. Variiert werden (von oben nach unten) der Satellitenzenitwinkel, die Bodentemperatur, Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) und die Höhe der Zirrusoberkante. . . . . 162

D.7 Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirruswolken. Links dargestellt ist Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR\_097 und IR\_134. Rechts wird die Helligkeitstemperaturdifferenz für den wolkenfreien Fall von der Kanaldifferenz mit Zirruswolke subtrahiert. Variiert werden (von oben nach unten) der Satellitenzenitwinkel, die Bodentemperatur, Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) und die Höhe der Zirrusoberkante. . . . . 163

D.8 Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirruswolken. Links dargestellt ist Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle WV\_062 und IR\_108. Rechts wird die Helligkeitstemperaturdifferenz für den wolkenfreien Fall von der Kanaldifferenz mit Zirruswolke subtrahiert. Variiert werden (von oben nach unten) der Satellitenzenitwinkel, die Bodentemperatur, Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) und die Höhe der Zirrusoberkante. . . . . 164

D.9 Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirruswolken. Links dargestellt ist Helligkeitstemperatur des Kanals IR\_108. Rechts wird die Helligkeitstemperatur für den wolkenfreien Fall von der Helligkeitstemperatur mit Zirruswolke subtrahiert. Variiert werden (von oben nach unten) der Satellitenzenitwinkel, die Bodentemperatur, Atmosphären (für zwei Satellitenzenitwinkel) und die Höhe der Zirrusoberkante. . . . . 165

D.10 Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirrus über dicker Wasserwolke in Abhängigkeit von der optischen Dicke  $\tau$ . Links oben dargestellt ist Helligkeitstemperaturdifferenz der Wasserdampfkanäle WV\_062 und WV\_073 minus der Helligkeitstemperaturdifferenz für eine wolkenfreie Atmosphäre. Variiert wird der Satellitenzenitwinkel  $\theta$ . Rechts oben wird die Höhe der Zirrusoberkante variiert. Mitte links, mitte rechts und unten links werden die Höhe der Wolkenoberkante der Wasserwolke variiert. Die Höhen der Zirrusoberkanten werden mit 11km, 8km und 6km festgelegt. Unten rechts wird die Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) variiert. . . . . 168

- D.11 Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirrus über dicker Wasserwolke. Dargestellt ist die Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR\_087 und IR\_108 in Abhängigkeit von der optischen Dicke  $\tau$ . Links oben wird der Satellitenzenitwinkel  $\theta$  variiert. Rechts oben wird die Höhe des Zirrusoberkante variiert. Mitte links wird der Effektivradius variiert. Mitte rechts und unten links werden die Höher der Wolkenoberkante der Wasserwolke variiert. Die Höher der Zirrusoberkanten werden mit 11km, 8km und 6km festgelegt. Unten rechts wird die Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) variiert. . . . . 169
- D.12 Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirrus über dicker Wasserwolke. Dargestellt ist die Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR\_062 und IR\_108 in Abhängigkeit von der optischen Dicke  $\tau$ . Links oben wird der Satellitenzenitwinkel  $\theta$  variiert. Rechts oben wird die Höhe des Zirrusoberkante variiert. Mitte links wird der Effektivradius variiert. Mitte rechts und unten links werden die Höhe der Wolkenoberkante der Wasserwolke variiert. Die Höhe der Zirrusoberkanten werden mit 11km, 8km und 6km festgelegt. Unten rechts wird die Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) variiert. . . . . 170
- D.13 Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirrus über dicker Wasserwolke. Dargestellt ist die Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR\_108 und IR\_120 in Abhängigkeit von der optischen Dicke  $\tau$ . Links oben wird der Satellitenzenitwinkel  $\theta$  variiert. Rechts oben wird die Höhe des Zirrusoberkante variiert. Mitte links wird der Effektivradius variiert. Mitte rechts und unten links wird die Höhe der Wolkenoberkante der Wasserwolke variiert. Die Höhe der Zirrusoberkanten werden mit 11km, 8km und 6km festgelegt. Unten rechts wird die Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) variiert. . . . . 171
- D.14 Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirrus über dicker Wasserwolke. Dargestellt ist die Helligkeitstemperatur des Kanals IR\_108 in Abhängigkeit von der optischen Dicke  $\tau$ . Links oben wird der Satellitenzenitwinkel  $\theta$  variiert. Rechts oben wird der Effektivradius variiert. variiert. In den mittleren vier Bildern werden die Höhe der Wolkenoberkanten der Zirruswolken variiert. Die Höhe der Oberkanten der Wasserwolken sind mit 1km, 2km, 3km und 4km festgelegt. Unten links wird die Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) variiert. . . . . 172
- D.15 Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirrus über dünner Wasserwolke in Abhängigkeit von der optischen Dicke  $\tau$ . Links oben dargestellt ist Helligkeitstemperaturdifferenz der Wasserdampfkanäle WV\_062 und WV\_073 minus der Helligkeitstemperaturdifferenz für eine wolkenfreie Atmosphäre. Variiert wird der Satellitenzenitwinkel  $\theta$ . Rechts oben wird die Höhe des Zirrusoberkante variiert. Unten links wird die Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) variiert. . . . . 175
- D.16 Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirrus über dünner Wasserwolke. Dargestellt ist die Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR\_087 und IR\_108 in Abhängigkeit von der optischen Dicke  $\tau$ . Links oben wird der Satellitenzenitwinkel  $\theta$  variiert. Rechts oben wird die Höhe des Zirrusoberkante variiert. Mitte links wird die Bodentemperatur variiert. Mitte rechts wird die Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) variiert. Unten wird der Effektivradius variiert. . . . . 176
- D.17 Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirrus über dünner Wasserwolke. Dargestellt ist die Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle WV\_062 und IR\_108 in Abhängigkeit von der optischen Dicke  $\tau$ . Links oben wird der Satellitenzenitwinkel  $\theta$  variiert. Rechts oben wird die Höhe des Zirrusoberkante variiert. Mitte links wird die Bodentemperatur variiert. Mitte rechts wird die Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) variiert. Unten wird der Effektivradius variiert. . . . . 177

- D.18 Ergebnisse der Simulation für den Fall Zirrus über dünner Wasserwolke. Dargestellt ist die Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR\_108 und IR\_120 in Abhängigkeit von der optischen Dicke  $\tau$ . Links oben wird der Satellitenzenitwinkel  $\theta$  variiert. Rechts oben wird die Höhe des Zirrusoberkante variiert. Mitte links wird die Bodentemperatur variiert. Mitte rechts wird die Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) variiert. Unten wird der Effektivradius variiert. . . . . 178
- D.19 Ergebnisse der Simulation für den Fall Wasserwolke in Abhängigkeit von der optischen Dicke  $\tau$ . Links oben dargestellt ist Helligkeitstemperaturdifferenz der Wasserdampfkanäle WV\_062 und WV\_073 minus der Helligkeitstemperaturdifferenz für eine wolkenfreie Atmosphäre. Variiert wird der Satellitenzenitwinkel  $\theta$ . Rechts oben ist nur die Helligkeitstemperaturdifferenz dargestellt. Variiert wird die Höhe der Wolkenoberkante. Unten links wird die Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) variiert. 180
- D.20 Ergebnisse der Simulation für den Fall Wasserwolke. Links dargestellt ist Helligkeitstemperaturdifferenz der Fensterkanäle IR\_108 und IR\_120. Rechts wird die Helligkeitstemperaturdifferenz für den wolkenfreien Fall von der Kanaldifferenz mit Zirruswolke subtrahiert. Variiert wird (von oben nach unten) der Satellitenzenitwinkel, die Bodentemperatur, Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) und die Höhe der Wolkenoberkante. . . . . 181
- D.21 Ergebnisse der Simulation für den Fall Wasserwolke. Links dargestellt ist Helligkeitstemperaturdifferenz der Fensterkanäle IR\_087 und IR\_108. Rechts wird die Helligkeitstemperaturdifferenz für den wolkenfreien Fall von der Kanaldifferenz mit Zirruswolke subtrahiert. Variiert wird (von oben nach unten) der Satellitenzenitwinkel, die Bodentemperatur, Atmosphäre (für zwei Satellitenzenitwinkel) und die Höhe der Wolkenoberkante. . . . . 182



# Tabellenverzeichnis

2.1	Alle SEVIRI Kanäle: Zentrale Wellenlänge, Spektralband, Auflösung und vergleichbare Kanäle auf anderen Satelliten. Quelle: [SCHMETZ et al. 2002] . . . . .	21
2.2	Zentrale Wellenzahl $\nu_c$ (in $cm^{-1}$ ), Koeffizienten A und B für die analytischen Beziehungen (Gl. 2.40) und (Gl. 2.39) zwischen Temperatur und Strahldichte für thermische Kanäle von SEVIRI auf MSG-1 . . . . .	24
2.3	Bandbreite der solaren SEVIRI Kanäle, zentrale Wellenlänge $\lambda_0$ , Bestrahlungsstärke der Sonne in dem entsprechenden Kanalband. Quelle: [GOVAERTS und CLERICI 2004]. . . . .	25
3.1	Vergleich MeCiDA Zirren mit MODIS Zirren. Datum: 2004/05/31 11:00 UTC . . . . .	50
3.2	Vergleich MODIS Cirrus Reflectance Flag mit MeCiDA Ergebnissen. . . . .	50
3.3	Regressionskoeffizienten und Korrelationskoeffizienten der Vergleiche MODIS vs. MeCiDA. . . . .	53
3.4	Wertebereiche der Winkel . . . . .	58
3.5	Auswertung Validierung der Strahlungsflussdichten . . . . .	65
4.1	Definition der Flugverkehrsdichteklassen, (mit FVD = Flugverkehrsdichte in $[\frac{km}{km^2h}]$ ) . . . . .	75
4.2	Statistiken der Zirrusbedeckung für Februar 2004 . . . . .	77
4.3	Statistiken der Zirrusbedeckung für Februar 2004 (nur Land) . . . . .	78
4.4	Statistiken der Zirrusbedeckung für Februar 2004 (nur Wasser) . . . . .	79
4.5	Zusammenfassung der Untersuchung des Jahresgangs (Land und Wasser) . . . . .	83
4.6	Zusammenfassung der Untersuchung des Tagesgangs (Land und Wasser) . . . . .	86
4.7	Statistiken der Zirrusbedeckung für 2004 für Teilgebiet $15^\circ W - 20^\circ O, 30^\circ N - 60^\circ N$ . . . . .	87
4.8	Statistiken der Zirrusbedeckung für 2004 für Teilgebiet $15^\circ W - 20^\circ O, 30^\circ N - 60^\circ N$ (nur Land) . . . . .	88
4.9	Statistiken der Zirrusbedeckung für 2004 Teilgebiet $15^\circ W - 20^\circ O, 30^\circ N - 60^\circ N$ (nur Wasser) . . . . .	88
4.10	Statistiken der Zirrusbedeckung für das Gesamtgebiet $80^\circ W - 50^\circ O, 20^\circ N - 75^\circ N$ , 2004 . . . . .	91
4.11	Statistiken der Zirrusbedeckung für das Gesamtgebiet $80^\circ W - 50^\circ O, 20^\circ N - 75^\circ N$ , 2004 (nur Land) . . . . .	92
4.12	Statistiken der Zirrusbedeckung für das Gesamtgebiet $80^\circ W - 50^\circ O, 20^\circ N - 75^\circ N$ , 2004 (nur Wasser) . . . . .	93

5.1	Zusammenfassung der Untersuchung des Jahresgang . . . . .	101
5.2	Statistiken der gesamten (kurzwellig + langwellig) ausgehenden Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre für die Teilregion $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 20^{\circ}N - 60^{\circ}N$ , 2004 . . . . .	102
5.3	Zusammenfassung der Untersuchung des Tagesgangs . . . . .	105
5.4	Statistiken der gesamten (kurzwellig + langwellig) ausgehenden Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ), 2004 . . . . .	108
5.5	Statistiken der ausgehenden langwelligigen Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ), 2004 . . . . .	108
5.6	Statistiken der ausgehenden kurzwelligigen Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ), 2004 . . . . .	108
5.7	Statistiken der gesamten (kurzwellig + langwellig) ausgehenden Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ), 2004 (nur Land). . . . .	109
5.8	Statistiken der ausgehenden langwelligigen Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ), 2004 (nur Land). . . . .	109
5.9	Statistiken der ausgehenden kurzwelligigen Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ), 2004 (nur Land). . . . .	109
5.10	Statistiken der gesamten (kurzwellig + langwellig) ausgehenden Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ), 2004 (nur Wasser). . . . .	111
5.11	Statistiken der langwelligigen ausgehenden Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ), 2004 (nur Wasser). . . . .	111
5.12	Statistiken der kurzwelligigen ausgehenden Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ), 2004 (nur Wasser). . . . .	111
B.1	Statistiken der Zirrusbedeckung für März 2004 . . . . .	135
B.2	Statistiken der Zirrusbedeckung für März 2004 (nur Land) . . . . .	135
B.3	Statistiken der Zirrusbedeckung für März 2004 (nur Wasser) . . . . .	136
B.4	Statistiken der Zirrusbedeckung für April 2004 . . . . .	136
B.5	Statistiken der Zirrusbedeckung für April 2004 (nur Land) . . . . .	136
B.6	Statistiken der Zirrusbedeckung für April 2004 (nur Wasser) . . . . .	136
B.7	Statistiken der Zirrusbedeckung für Mai 2004 . . . . .	137
B.8	Statistiken der Zirrusbedeckung für Mai 2004 (nur Land) . . . . .	137
B.9	Statistiken der Zirrusbedeckung für Mai 2004 (nur Wasser) . . . . .	137
B.10	Statistiken der Zirrusbedeckung für Juni 2004 . . . . .	137
B.11	Statistiken der Zirrusbedeckung für Juni 2004 (nur Land) . . . . .	138
B.12	Statistiken der Zirrusbedeckung für Juni 2004 (nur Wasser) . . . . .	138
B.13	Statistiken der Zirrusbedeckung für Juli 2004 . . . . .	138

B.14 Statistiken der Zirkusbedeckung für Juli 2004 (nur Land) . . . . .	138
B.15 Statistiken der Zirkusbedeckung für Juli 2004 (nur Wasser) . . . . .	139
B.16 Statistiken der Zirkusbedeckung für August 2004 . . . . .	139
B.17 Statistiken der Zirkusbedeckung für August 2004 (nur Land) . . . . .	139
B.18 Statistiken der Zirkusbedeckung für August 2004 (nur Wasser) . . . . .	139
B.19 Statistiken der Zirkusbedeckung für September 2004 . . . . .	140
B.20 Statistiken der Zirkusbedeckung für September 2004 (nur Land) . . . . .	140
B.21 Statistiken der Zirkusbedeckung für September 2004 (nur Wasser) . . . . .	140
B.22 Statistiken der Zirkusbedeckung für Oktober 2004 . . . . .	140
B.23 Statistiken der Zirkusbedeckung für Oktober 2004 (nur Wasser) . . . . .	141
B.24 Statistiken der Zirkusbedeckung für Oktober 2004 (nur Wasser) . . . . .	141
B.25 Statistiken der Zirkusbedeckung für November 2004 . . . . .	141
B.26 Statistiken der Zirkusbedeckung für November 2004 (nur Land) . . . . .	141
B.27 Statistiken der Zirkusbedeckung für November 2004 (nur Wasser) . . . . .	142
B.28 Statistiken der Zirkusbedeckung für Dezember 2004 . . . . .	142
B.29 Statistiken der Zirkusbedeckung für Dezember 2004 (nur Land) . . . . .	142
B.30 Statistiken der Zirkusbedeckung für Dezember 2004 (nur Wasser) . . . . .	142
B.31 Statistiken der Zirkusbedeckung für UTC 03:00 2004 . . . . .	143
B.32 Statistiken der Zirkusbedeckung für UTC 03:00 2004 (nur Land) . . . . .	143
B.33 Statistiken der Zirkusbedeckung für UTC 03:00 2004 (nur Wasser) . . . . .	143
B.34 Statistiken der Zirkusbedeckung für UTC 08:00 2004 . . . . .	143
B.35 Statistiken der Zirkusbedeckung für UTC 08:00 2004 (nur Land) . . . . .	144
B.36 Statistiken der Zirkusbedeckung für UTC 08:00 2004 (nur Wasser) . . . . .	144
B.37 Statistiken der Zirkusbedeckung für UTC 12:30 2004 . . . . .	144
B.38 Statistiken der Zirkusbedeckung für UTC 12:30 2004 (nur Land) . . . . .	144
B.39 Statistiken der Zirkusbedeckung für UTC 12:30 2004 (nur Wasser) . . . . .	145
B.40 Statistiken der Zirkusbedeckung für UTC 18:00 2004 . . . . .	145
B.41 Statistiken der Zirkusbedeckung für UTC 18:00 2004 (nur Land) . . . . .	145
B.42 Statistiken der Zirkusbedeckung für UTC 18:00 2004 (nur Wasser) . . . . .	145
B.43 Statistiken der gesamten (kurzwellig + langwellig) ausgehenden Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre für die Teilregion $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 20^{\circ}N - 60^{\circ}N$ , Februar 2004 . . . . .	146
B.44 Statistiken der gesamten (kurzwellig + langwellig) ausgehenden Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre für die Teilregion $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 20^{\circ}N - 60^{\circ}N$ , Mai 2004 . . . . .	146
B.45 Statistiken der gesamten (kurzwellig + langwellig) ausgehende Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre für die Teilregion $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 20^{\circ}N - 60^{\circ}N$ , Juli 2004 . . . . .	146

B.46	Statistiken der gesamten (kurzwellig + langwellig) ausgehenden Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre für die Teilregion $15^{\circ}W - 20^{\circ}O, 20^{\circ}N - 60^{\circ}N$ , Oktober 2004 . . . . .	146
B.47	Statistiken der gesamten (kurzwellig + langwellig) ausgehenden Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ), 2004, UTC 03:00 . . . . .	147
B.48	Statistiken der gesamten (kurzwellig + langwellig) ausgehenden Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ), 2004, UTC 06:00 . . . . .	147
B.49	Statistiken der gesamten (kurzwellig + langwellig) ausgehenden Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ), 2004, UTC 09:00 . . . . .	147
B.50	Statistiken der gesamten (kurzwellig + langwellig) ausgehenden Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ), 2004, UTC 12:00 . . . . .	147
B.51	Statistiken der gesamten (kurzwellig + langwellig) ausgehenden Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ), 2004, UTC 15:00 . . . . .	148
B.52	Statistiken der gesamten (kurzwellig + langwellig) ausgehenden Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ), 2004, UTC 18:00 . . . . .	148
B.53	Statistiken der gesamten (kurzwellig + langwellig) ausgehenden Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre für das gesamte Gebiet ( $80^{\circ}W - 50^{\circ}O, 20^{\circ}N - 75^{\circ}N$ ), 2004, UTC 21:00 . . . . .	148
D.1	Simulationsparameter wolkenfreier Fall . . . . .	155
D.2	Simulationsparameter Zirren . . . . .	158
D.3	Simulationsparameter Zirren über dicker Wasserwolke . . . . .	166
D.4	Simulationsparameter Zirren über dünner Wasserwolke . . . . .	173
D.5	Simulationsparameter Wasserwolken . . . . .	179

# Danksagung

Diese Arbeit wäre ohne Unterstützung einiger Personen und Organisationen in dieser Form nicht möglich gewesen.

An erster Stelle möchte ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr. Ulrich Schumann bedanken, der mich immer unterstützt und es mir ermöglicht hat, diese Arbeit am Institut für Physik der Atmosphäre durchzuführen. Ich danke Prof. Dr. Ulrich Schumann sehr für die wertvollen Ratschläge und Verbesserungsvorschläge und für sein offenes und stetes Interesse an meiner Arbeit.

Prof. Dr. Susanne Crewell danke ich sehr für die Übernahme der Zweitkorrektur und die konstruktiven Verbesserungsvorschläge und Hinweise.

Diese Arbeit war Teil eines von der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) finanzierten internationalen Forschungsprojektes **CONTRAILS**. Das Projekt wurde von Dr. Hermann Mannstein (DLR) geleitet und von Dr. Simon Pinnock (ESA) koordiniert. Die Projektpartner waren das Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI), Dundee Satellite Receiving Station (DSRS) und das Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Die Europäische Flugsicherung, European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL) hat die im Rahmen dieser Arbeit notwendigen Flugverkehrsdaten zur Verfügung gestellt. Ohne diese Daten wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Ich danke Frank Jelinek und Niku Stancioi für die freundliche Bereitstellung dieser Daten. Natürlich gilt allen am CONTRAILS Projekt beteiligten Organisationen und insbesondere allen an diesem Projekt beteiligten Menschen mein ausdrücklicher Dank.

Mein besonderer Dank gilt Dr. Hermann Mannstein, der mir mit unzähligen wertvollen Ratschlägen während meiner gesamten Promotionszeit zur Seite stand. Seine ständige Bereitschaft zur Diskussion und sein tiefgreifendes Verständnis und Interesse an meiner Arbeit waren mir eine unschätzbare Hilfe.

Bei Dr. Peter Wendling möchte ich mich für die Aufnahme in die Abteilung bedanken. Dr. Bernhard Mayer danke ich für die riesige Unterstützung bei der Entwicklung der Werkzeuge zur Ableitung der Strahlungsflussdichten und für die unzähligen Diskussionen über den Strahlungstransfer in der Atmosphäre. Ohne sein tiefes Wissen auf diesem Gebiet wäre eine Entwicklung von Werkzeugen zur Berechnung des Strahlungsflussdichten aus MSG-Daten in so kurzer Zeit nicht möglich gewesen. Sebastian Proske danke für die Unterstützung bei der Validierung der Strahlungsflussdichten.

Winfried Beer danke ich für seine freundliche Hilfe in allen Computerbelangen. Insbesondere danke ich ihm und den Kollegen am DFD für die Unterstützung beim Aufbau der MSG-Empfangsanlagen.

Bei Dr. Luca Bugliaro möchte ich mich für die sehr große Hilfe bei der Durchführung der theoretischen Studie und vor allem für die sehr angenehme Zusammenarbeit und viele konstruktive Diskussionen bedanken. Dies gilt für alle Kollegen meiner Abteilung und viele Kollegen aus dem Institut, die mir mit interessanten Anregungen eine große und freundliche Hilfe waren. Für die angenehme Arbeitsatmosphäre möchte ich mich bei allen bedanken.

Mein herzlicher Dank gilt meiner Frau Monika, die mich auch in schwierigen Zeiten stets aufgemuntert hat und immer Interesse an meiner Arbeit gezeigt hat. Meinen Freunden danke ich herzlich für die Hilfe beim Bewahren der kritischen Distanz, die zu jeder Arbeit dazugehört. Auch meiner Familie gilt ein herzliches Dankeschön.



# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Name: Waldemar Krebs  
geboren in: Belye Wody, UdSSR  
Familienstand: verheiratet  
Staatsangehörigkeit: deutsch

## Schulbildung

1978-1982 91. Polytechnische Oberschule in Novosibirsk, UdSSR  
1982-1986 Schillerschule Radebeul, DDR  
1986-1989 Bickenbergschule Villingen, Villingen-Schwenningen  
1989-1992 Technisches Gymnasium Schwenningen, Villingen-Schwenningen

## Studium

1992-2000 Studium der Physik an der Universität Ulm  
Mai, 2000 Abschluss als Diplom-Physiker  
Thema der Diplomarbeit: *Mustererkennung und Symmetrieuntersuchungen von gewöhnlichen Differentialgleichungen 1. Ordnung*  
2002-2003 Promotionsstudium Meteorologie  
an der Ludwig-Maximilian-Universität München

## Berufstätigkeit

1996-2000 wissenschaftliche Hilfskraft  
am Forschungsinstitut für anwendungsorientierte  
Wissensverarbeitung (FAW), Ulm,  
Abteilung: Verkehrsinformatik  
2000-2002 Entwickler und Berater  
bei Visual Analysis AG, München,  
Abteilung: Advanced Engineering  
seit 2002 wissenschaftlicher Mitarbeiter  
am Institut für Physik der Atmosphäre,  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Oberpfaffenhofen  
Abteilung: Fernerkundung der Atmosphäre