

---

Der Beitrag des Flugverkehrs zum  
Tagesgang der Zirrenbedeckung  
und der ausgehenden langwelligen  
Strahlung über dem  
Nordatlantischen Flugkorridor

Kaspar Graf

---



München 2013



---

# Der Beitrag des Flugverkehrs zum Tagesgang der Zirrenbedeckung und der ausgehenden langwelligen Strahlung über dem Nordatlantischen Flugkorridor

---

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

vorgelegt von  
Dipl. Phys. Kaspar Graf  
Prien am Chiemsee  
2013

## Gutachter der Dissertation

1. Gutachter: apl. Prof. Dr. Ulrich Schumann
2. Gutachter: Prof. Dr. Bernhard Mayer

Tag der Abgabe der Arbeit: 17. April 2013

Tag der mündlichen Prüfung: 7. Juni 2013

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Stand des Wissens . . . . .	3
1.2	Ziel der Arbeit . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Methoden und Daten</b>	<b>13</b>
2.1	Definition von Strahlungsgrößen . . . . .	13
2.2	Auswahl des Untersuchungsgebiets . . . . .	16
2.3	Der EUROCONTROL-Flugverkehrsdatensatz . . . . .	18
2.4	Der europäische Wettersatellit Meteosat Second Generation . . . . .	19
2.5	Ableitung des Kondensstreifenbedeckungsgrades aus Meteosat-8/9 Daten	23
2.6	Ableitung des Zirrenbedeckungsgrades aus Meteosat-8/9 Daten . . . . .	24
2.7	Ableitung des langwelligen Strahlungsflusses am Oberrand der Atmo- sphäre aus Meteosat-8/9 Daten . . . . .	27
2.8	Ableitung von Tagesgängen von linearer Kondensstreifenbedeckung, Zir- rusbedeckung und des langwelligen Strahlungsflusses . . . . .	29
2.9	Konzept eines linearen Responsemodells und Definition der Transforma- tionsfunktionen . . . . .	30
2.10	Annahme des natürlichen Tagesgang von linearer Kondensstreifenbe- deckung, Zirrusbedeckung und des langwelligen Strahlungsflusses . . . . .	38
2.11	Bedeckungsgrad hoher Wolken und ausgehende langwellige Strahlung im ECMWF-Modell . . . . .	41
<b>3</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>47</b>
3.1	Tagesgang der Flugverkehrsdichte im Untersuchungsgebiet . . . . .	47
3.2	Einzelszenenanalyse der linearen Kondensstreifenbedeckung, der Zirren- bedeckung und des ausgehenden langwelligen Strahlungsflusses . . . . .	49
3.3	Zeitreihen der linearen Kondensstreifenbedeckung, der Zirrenbedeckung und des ausgehenden langwelligen Strahlungsflusses in NAR und SAR . . . . .	56
3.4	Tagesgang der linearen Kondensstreifenbedeckung und der Zirrenbe- deckung . . . . .	59
3.5	Tagesgang der Zirrenbedeckung und des langwelligen Strahlungsflusses	67
3.6	Tagesgang der Zirrenbedeckung und der ausgehenden langwelligen Strah- lungsflussdichte im ECMWF-Modell . . . . .	73
3.7	Quantifizierung der flugverkehrsinduzierten linearen Kondensstreifenbe- deckung, Zirrenbedeckung und langwelligen Strahlungsflussänderung in NAR . . . . .	73

3.8	Vergleich mit MODIS . . . . .	85
<b>4</b>	<b>Diskussion</b>	<b>91</b>
4.1	Qualität des Flugverkehrsdatensatzes . . . . .	91
4.2	Qualität der linearen Kondensstreifenerkennung in SEVIRI-Daten . . . . .	92
4.3	Qualität des Zirrendetektionsalgorithmus MeCiDA2 . . . . .	92
4.4	Qualität der mit RRUMS abgeleiteten langwelligen Strahlungsflussdichten	93
4.5	Einfluss der Zirrenklassifikation auf den Tagesgang der ausgehenden langwelligen Strahlung . . . . .	94
4.6	Diskussion der Kausalität . . . . .	96
4.7	Diskussion der Wirkungsdauer . . . . .	100
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>103</b>
5.1	Zusammenfassung . . . . .	103
5.2	Ausblick . . . . .	106
<b>A</b>	<b>Spezifikation der benutzten ECMWF Daten</b>	<b>109</b>
<b>B</b>	<b>Speicherort der benutzten Daten</b>	<b>111</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>113</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>122</b>
	<b>Erklärung</b>	<b>124</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>126</b>

## Zusammenfassung

Der Flugverkehr trägt durch seine Emissionen auf verschiedene Weise zum Klimawandel bei. Bei der Verbrennung fossiler Treibstoffe entsteht das Treibhausgas Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ). Daneben beeinflussen Stickoxidemissionen ( $\text{NO}_x$ ) die Konzentrationen der Treibhausgase Ozon ( $\text{O}_3$ ) und Methan ( $\text{CH}_4$ ). Wasserdampfemissionen erhöhen zumindest kurzfristig und lokal die Konzentration dieses Treibhausgases in der Atmosphäre. Zusätzlich bilden sich unter bestimmten atmosphärischen Bedingungen im Nachlauf von Flugzeugen Kondensstreifen. Diese Kondensstreifen können – abhängig von den jeweils herrschenden atmosphärischen Bedingungen – längere Zeit existieren. Dabei verlieren sie im Laufe ihrer Evolution ihre anfänglich linienförmige Gestalt und können infolge von Scherung, Diffusion und Turbulenz in ihrer Erscheinungsform nicht mehr von natürlichen Zirren unterschieden werden. Daher ist es bisher nicht gelungen, diese vom Flugverkehr induzierte Zirrenbedeckung in Messungen verlässlich zu quantifizieren. Frühere Studien beschränkten sich entweder auf die Anwendung von Linienerkennungsverfahren und quantifizierten so den Bedeckungsgrad von Kondensstreifen in verschiedenen Regionen, oder analysierten Langzeittrends der Zirrenbedeckung zur Abschätzung des darin enthaltenen Flugverkehrsbeitrags. Auch bei der Quantifizierung des Strahlungsantriebs und der typischen Wirkungsdauer flugverkehrsinduzierter Zirrenbedeckung gibt es große Unsicherheiten.

In dieser Arbeit wird eine neue Methode entwickelt, die in der Lage ist, die gesamte vom Flugverkehr verursachte Änderung der Zirrenbedeckung und die mit ihr verbundene Änderung im langwelligen Strahlungsfluss zu quantifizieren. Die Methode nutzt die Form des Tagesgangs der Flugverkehrsdichte in einem Beobachtungsgebiet. Mithilfe verschiedener Funktionen, die die mittlere Wirkung von Flugverkehrsdichte auf atmosphärische Messgrößen als Funktion des Alters beschreiben, kann der Tagesgang der Flugverkehrsdichte auf einen Tagesgang dieser Messgrößen abgebildet werden. Als solche, Satellitenmessungen zugängliche Messgrößen werden in der Arbeit der lineare Kondensstreifenbedeckungsgrad, der Zirrenbedeckungsgrad und die ausgehende langwellige Strahlungsflussdichte betrachtet. Durch einen Fit des über diese Funktion ermittelten Tagesgangs an den beobachteten Tagesgang – teilweise nach Abzug des natürlicherweise zu erwartenden Tagesgangs – lassen sich die Parameter der Transformationsfunktionen ableiten. Sie erlauben die Quantifizierung der vom Flugverkehr induzierten Wirkung

sowie die Ableitung einer typischen Antwortzeit der Atmosphäre auf ein Flugverkehrsereignis. Die Methode erlaubt es, über den bisher mithilfe von Linearitätskriterien bestimmten Bedeckungsgrad von Kondensstreifen hinaus auch gealterte, nicht mehr linienförmige Kondensstreifen zu erfassen und zu quantifizieren. Sie wird auf ein Untersuchungsgebiet im Nordatlantik angewandt, das weite Teile des Nordatlantischen Flugkorridors abdeckt.

Weite Teile dieser Arbeit sind in den Publikationen Graf et al. (2012) und Schumann und Graf (2013) behandelt.



# Kapitel 1

## Einleitung

Die Luftfahrt hat sich in den vergangenen Jahrzehnten als Garant von Mobilität zu einer zentralen Säule unserer globalisierten Gesellschaft entwickelt. Die Verkehrsleistung ist dabei – abgesehen von temporären Einbrüchen infolge von Wirtschaftskrisen wie der Ölkrise in den siebziger Jahren oder der Finanzmarktkrise 2008, den Terroranschlägen vom 11. September 2001 oder der SARS (Severe acute respiratory syndrome) Epidemie in Asien im Jahr 2003 – beständig angewachsen. Der Vulkanausbruch des isländischen Vulkans Eyjafjallajökull im Jahr 2010 und die dadurch verursachte mehrtägige Sperrung großer Teile des europäischen und transatlantischen Luftraums hat die Abhängigkeit der Gesellschaft und der Wirtschaft von diesem Verkehrsträger verdeutlicht. Nicht nur zahlreiche Passagiere bis hin zur Bundeskanzlerin sind gestrandet, auch in der Wirtschaft standen Produktionsketten teilweise still, da die globalen just-in-time Lieferketten unterbrochen waren.

Mit der Zunahme des Flugverkehrsaufkommens ist auch der Beitrag des Flugverkehrs zum Klimawandel gewachsen. Zwar gelang es der Luftfahrtindustrie, durch effizientere Antriebe und durch höhere Auslastung die Emissionen teilweise vom Wachstum zu entkoppeln. Dennoch steht die Luftfahrt, auch im Kontext ambitionierter internationaler Klimaschutzziele, vor der Herausforderung, ihr prognostiziertes Wachstum im Verkehrsaufkommen mit Umwelt- und Klimaschutzziele in Einklang zu bringen. Verschiedene Akteure der europäischen Luftverkehrsbranche haben sich unter dem Dach von ACARE (Advisory Council for Aeronautics Research in Europe) im Programm Flightpath 2050 auf ambitionierte Reduktionsziele verständigt (European Commission 2011).

Der Flugverkehr wirkt über verschiedene Mechanismen auf das Klima. Der bekannteste und wissenschaftlich am besten verstandene Beitrag wird durch die Emission

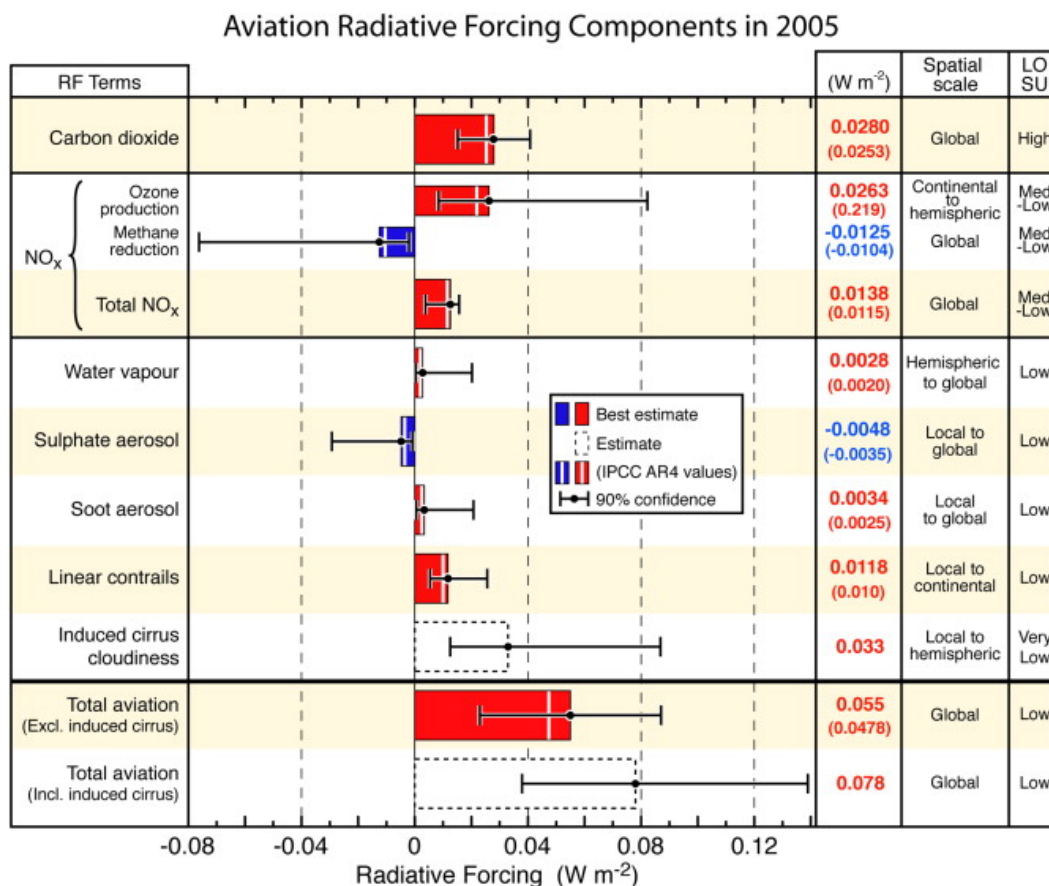


Abbildung 1.1: Beiträge der einzelnen strahlungswirksamen Komponenten des Flugverkehrs zum Strahlungsantrieb. Der für flugverkehrsinduzierte Zirrenbedeckung angegebene Wert beinhaltet lineare Kondensstreifen. Quelle: Lee et al. (2009), mit freundlicher Genehmigung durch Atmos. Env./Elsevier.

von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) verursacht. CO<sub>2</sub> entsteht bei der Verbrennung fossiler Treibstoffe und wirkt aufgrund seiner Absorptionsbande im atmosphärischen Fenster als Treibhausgas. Daneben modifizieren Emissionen von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>), die selbst keine Treibhauswirkung haben, über verschiedene Reaktionen die Konzentrationen der Treibhausgase Ozon (O<sub>3</sub>) und Methan (CH<sub>4</sub>). Dabei kommt es zu einer Erhöhung der atmosphärischen Ozonkonzentration (erwärmender Effekt) und zu einem Abbau der atmosphärischen Methankonzentration (kühlender Effekt), wobei der erstgenannte Effekt überwiegt. Die im Treibstoff enthaltenen Wasserstoffatome bilden beim Verbrennungsprozess mit atmosphärischem Sauerstoff (O<sub>2</sub>) Wassermoleküle (H<sub>2</sub>O). Durch diese Wasserdampfemissionen des Flugverkehrs erhöht sich zumindest kurzfristig die Wasserdampfkonzentration, bis sie durch Wolkenbildung und anschließende Sedimentation oder andere Transportprozesse wieder abgebaut wird. Wasserdampf ist das wichtigste Treibhausgas in der Atmosphäre. Auch Rußpartikel haben einen Klimaeffekt. Zum

einen absorbieren, streuen und emittieren sie solare und thermische Strahlung, andererseits dienen sie als Kondensationskeime und können so die natürliche Wolkenbildung modifizieren. Nicht zuletzt können sich unter bestimmten atmosphärischen und triebwerksspezifischen Bedingungen im Nachlauf von Flugzeugen Kondensstreifen bilden. Diese Kondensstreifen können – abhängig von den jeweils herrschenden atmosphärischen Bedingungen – längere Zeit existieren. Dabei verlieren sie im Laufe ihrer Evolution infolge von Scherung, Diffusion und Turbulenz ihre anfänglich linienförmige Gestalt und entwickeln sich zu sogenannten Kondensstreifen-Zirren, die ohne Kenntnis ihrer Historie nicht mehr anhand ihrer Erscheinung von natürlichen Zirren unterschieden werden können. Ein Überblick über die einzelnen Komponenten des flugverkehrsinduzierten Strahlungsantriebs ist in Lee et al. (2009) gegeben, Abbildung 1.1 verdeutlicht diese einzelnen Komponenten.

Im Abschnitt 1.1 wird auf Kondensstreifen und Kondensstreifen-Zirren, ihre Bildung, Fernerkundung und Klimawirkung genauer eingegangen. In Abschnitt 1.2 wird das Ziel der Arbeit definiert.

## 1.1 Stand des Wissens

Kondensstreifen sind linienförmige Wolken, die unter bestimmten Bedingungen durch Flugzeuge verursacht werden können. In der Literatur hat sich für diese häufig zu beobachtende Himmelserscheinung der Begriff „Contrails“ (Condensation trails) etabliert. Erste wissenschaftliche Arbeiten über Kondensstreifen datieren aus dem Jahr 1919 (Ettenreich 1919; Weickmann 1919). In den Jahren des zweiten Weltkrieges und danach war die Forschung zur Entstehung von Kondensstreifen militärisch motiviert (Rhode und Pearson 1942). Ihre Klimawirkung ist indessen erst später im Zuge der allgemeinen wissenschaftlichen Untersuchung des Klimawandels und in Anbetracht der rasanten Wachstumsraten des Flugverkehrs ins wissenschaftliche Blickfeld gerückt.

Heiße Flugzeugabgase kühlen durch Vermischung mit der Umgebungsluft ab. Dabei steigt die relative Feuchte des Luftgemisches. Wird bei diesem Prozess die Sättigung bezüglich Flüssigwasser erreicht, kommt es zur Kondensation. Die Partikel der Abgase dienen dafür neben bereits vorhandenen Partikeln als zusätzliche Kondensationskeime. Anhand des Schmidt-Appleman-Kriteriums lässt sich bestimmen, ob es unter den jeweils gegebenen atmosphärischen und triebwerksspezifischen Bedingungen zur Bildung von Kondensstreifen kommt (Schmidt 1941; Appleman 1953; Schumann 1996). Allerdings liefert das Schmidt-Appleman-Kriterium keine Information über die Persistenz

des entstandenen Kondensstreifens. Notwendig für die Persistenz eines Kondensstreifens ist eine Eisübersättigung der Umgebungsluft. Wenn die Atmosphäre diese Bedingung nicht erfüllt, verdunsten die Eiskristalle des Kondensstreifens und er löst sich innerhalb kurzer Zeit auf. Für die Persistenz von Kondensstreifen reichen deutlich niedrigere Grade der Eisübersättigung, als sie für das Auslösen natürlicher Zirrenbildung nötig wären. Für die Bildung natürlicher Zirren über homogene Nukleation sind Übersättigungen in der Größenordnung von 145 - 165 % nötig, für heterogene Nukleation reichen in der Regel Werte ab 110 % (Koop et al. 2000; Möhler et al. 2005). Generell ist es also möglich, dass in einer Region über längere Zeit persistente Kondensstreifen bzw. flugverkehrsinduzierte Zirren existieren können, ohne dass es in demselben Gebiet zu natürlicher Zirrenbildung gekommen wäre.

Neben dem Bildungspfad über Flugzeugabgase können Kondensstreifen auch aerodynamisch erzeugt werden (Gierens et al. 2009; Kärcher et al. 2009). Solche aerodynamischen Kondensstreifen bilden sich bei der Umströmung der Tragflächen von Flugzeugen. Über den Tragflächen herrscht Unterdruck. Die umströmende Luft ist dort einer kurzen, aber starken adiabatischen Expansion ausgesetzt, die zu extrem hohen Eisübersättigungswerten führen kann und schlagartig die Bildung von Eispartikeln aus flüssigen Aerosolpartikeln erlaubt. Inwieweit aerodynamische Kondensstreifen aber zum gesamten Aufkommen von Kondensstreifen und ihrer Klimawirkung beitragen, ist offen. Besonders in wärmeren Regionen, in denen das Schmidt-Appleman-Kriterium selten erfüllt ist, könnten sie einen wesentlichen Beitrag zum Kondensstreifenaufkommen leisten (Kärcher et al. 2009).

Lineare Kondensstreifen sind aufgrund ihrer linienförmigen Erscheinung morphologisch klassifizierbar und können entweder bodenbasiert (z. B. Freudenthaler et al. 1996; Mannstein et al. 2010) oder auf der Grundlage von Satellitendaten detektiert werden. Da sich der Absorptionskoeffizient von kleinen Eispartikeln (ein- bis niedriger zweistelliger  $\mu\text{m}$ -Bereich) zwischen Infrarot-Wellenlängen um 10,8  $\mu\text{m}$  und 12  $\mu\text{m}$  stark voneinander unterscheidet (Betancor Gothe und Graßl 1993), sind sie besonders gut in sogenannten Temperaturdifferenz-Feldern zu detektieren (vgl. Abbildung 1.2). Aufgrund ihrer typischen räumlichen Ausdehnung in der Größenordnung von einigen hundert Metern bzw. einigen Kilometern bieten sich hier polarumlaufende Satelliten mit hoher räumlicher Auflösung an. Auf Grundlage von Daten der polarumlaufenden NOAA-Satelliten leiteten Bakan et al. (1994) durch visuelle Auswertung für das Gebiet 30° W – 30° E, 35° N – 75° N (Westeuropa, östlicher Nordatlantik) untertags eine Kondensstreifenbedeckung von 0,50 % und im 24-Stunden-Mittel eine Bedeckung von 0,37 % ab. Zur

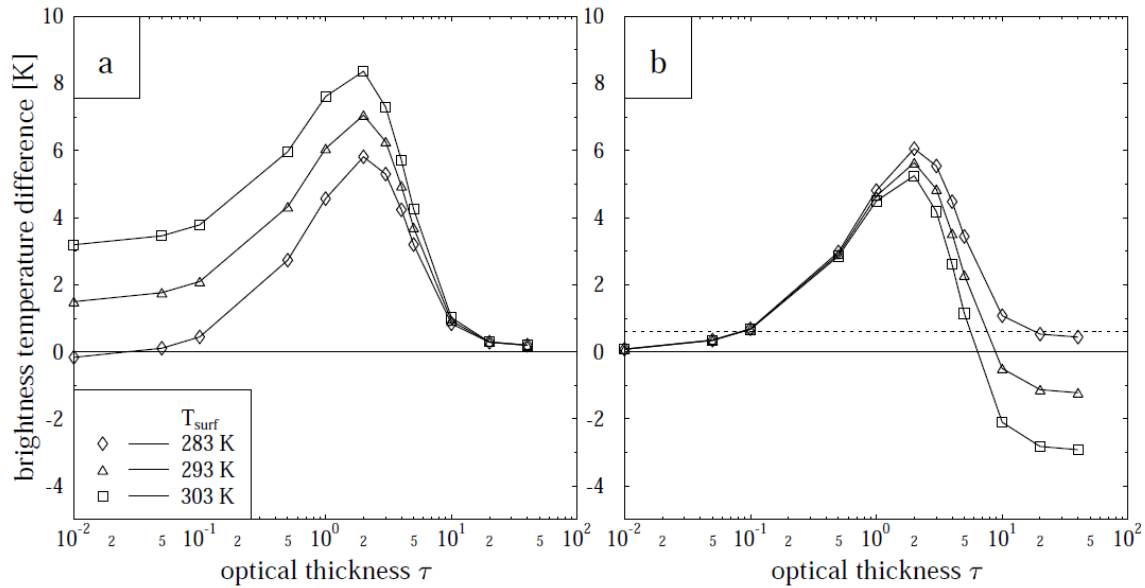


Abbildung 1.2: Abhängigkeit der Helligkeits-Temperaturdifferenz der Kanäle IR\_108 und IR\_120 von der optischen Dicke des betrachteten Zirrus, abgeleitet aus Modellrechnungen mit dem Strahlungstransportmodell libRadtran (Mayer und Kylling 2005), dargestellt für die gesamte Helligkeitstemperaturdifferenz (links), und für eine den wolkenfreien Fall berücksichtigenden korrigierten Helligkeitstemperaturdifferenz (rechts). Quelle: Krebs et al. (2007), Lizenz CC-BY 3.0.

automatisierten Lokalisation und Quantifizierung von linienförmigen Kondensstreifen in NOAA-AVHRR Satelliten wurde ein Kondensstreifenerkennungsalgorithmus (CDA, Contrail Detection Algorithm) entwickelt, der die Linienförmigkeit der Kondensstreifen als morphologisches Identifikationskriterium nutzt (Mannstein et al. 1999). Für das stärker beflogene Gebiet  $10^\circ \text{ W} - 23^\circ \text{ E}$ ,  $40^\circ \text{ N} - 56^\circ \text{ N}$  in Westeuropa wurden Werte von 0,7 % im Jahresmittel, mit Jahrgang (1 % im Winter, 0,4 % im Sommer) und Tagesgang (Verhältnis Tag/Nacht = 3, in Konsistenz mit dem Flugverkehrsaufkommen) gefunden. Durch Vergleich mit benachbarten kondensstreifenfreien Pixeln und unter Annahme gemessener Größenverteilungen von Kondensstreifenpartikeln wurde eine mittlere optische Dicke der detektierten Kondensstreifen von 0,1 abgeleitet (Meyer et al. 2002). Der Algorithmus wurde auch für die Untersuchung weiterer Regionen angewandt (Palikonda et al. 2005; Minnis et al. 2005). Für die Nordhemisphäre wurden mit einem weiterentwickelten Algorithmus, der neben den oben genannten Kanälen bei  $11 \mu\text{m}$  und  $12 \mu\text{m}$  auch Kanäle bei Wellenlängen von  $6,7 \mu\text{m}$ ,  $8,6 \mu\text{m}$  und  $13,3 \mu\text{m}$  zur Detektion nutzt und zudem Flugbewegungsdaten als Sekundärquelle zur Reduktion von Falscherkennung einbezieht, je nach Strenge des verwendeten Linearitätskriteriums Be-

deckungsgrade von linearen Kondensstreifen von 0,07 % bis 0,4 % gefunden (Duda et al. 2013). Skaliert man diese Werte auf den Globus unter Berücksichtigung des wesentlich geringeren Flugverkehrsaufkommens in der Südhemisphäre und unter Annahme vergleichbarer meteorologischer Bedingungen, so ergeben sich Werte zwischen 0,038 % und 0,215 % (Duda et al. 2013). Diese Werte repräsentieren die Kondensstreifenbedeckung zu den jeweiligen Überflugszeiten des MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer) Instruments auf dem Satelliten Aqua um 1:30 und 13:30 Lokalzeit, die aufgrund der Variabilität des Flugverkehrsaufkommens nicht mit dem Tagesmittelwert der Kondensstreifenbedeckung übereinstimmen muss. In Satellitendaten polarumlaufender Satelliten detektierte Kondensstreifen können mit einem Kondensstreifenverfolgungsalgorithmus in ihrer Evolution in Meteosat-Daten mit hoher zeitlicher Auflösung verfolgt werden (Vazquez-Navarro et al. 2010). Allerdings wird hier weiterhin ein, wenn auch abgeschwächtes, Linienkriterium der Verfolgung zugrunde gelegt, wodurch spätere Entwicklungsstadien von gealterten Kondensstreifen unbetrachtet bleiben.

„Linienförmige Kondensstreifen“ sind eine schlecht definierte Größe. Linienförmigkeit ist ein subjektives Kriterium, das unterschiedlich streng in einem Algorithmus implementiert werden kann (Mannstein et al. 1999; Duda et al. 2013). Zudem hängt das Erscheinungsbild eines Kondensstreifens wesentlich vom Beobachtungspunkt ab. Ein älterer, verbreiteter Kondensstreifen kann im Satellitenbild vielleicht noch linienförmig erscheinen, während er vom Boden aus bereits als zerfaserter natürlicher breiter Zirrus erscheinen mag. Ferner sind Parameter, die für linienförmige Kondensstreifen aus Satellitendaten abgeleitet wurden, schwer mit Modellen zu vergleichen. Globale Zirkulationsmodelle lösen die Form eines Kondensstreifens nicht auf. Hilfsweise werden in diesen Klimamodellen „lineare Kondensstreifen“ (z. B. Rap et al. 2010; Frömming et al. 2011) oder „junge Kondensstreifen“ (Burkhardt und Kärcher 2011) anhand von Altersschwellwerten eingeführt, wenngleich auch die Linienförmigkeit eines Kondensstreifens neben dem Alter auch von verschiedenen anderen atmosphärischen Bedingungen wie beispielsweise der Stärke der Windscherung beeinflusst wird. Diese isoliert betrachtet unkritische Vorgehensweise bringt dann Probleme, wenn Modellgrößen dieser linearen Modellkondensstreifen mit aus Satellitendaten abgeleiteten Werten linearer Kondensstreifen verglichen werden.

In der weiteren Entwicklung verlieren Kondensstreifen ihre linienförmige Struktur (z. B. Minnis et al. 1998; Duda et al. 2004; Atlas et al. 2006; Haywood et al. 2009). Verfahren der Bildverarbeitung sind dann nicht mehr in der Lage, in einer Einzelszene durch Musteranalyse Kondensstreifen-Zirren verlässlich von natürlichen Zirren zu trennen. Die

Quantifizierung des Bedeckungsgrades und des verknüpften Strahlungsantriebes gestaltet sich dementsprechend schwierig. In einigen Studien wurden Langzeitveränderungen der Zirrenbedeckung in Gebieten mit starkem und geringem Flugverkehrswachstum verglichen. Boucher (1999) wertete Daten der Zirrenhäufigkeit aus und fand eine Korrelation mit dem Kerosinverbrauch. Auch Wolkendaten aus dem ISCCP-Datensatz (International Satellite Cloud Climatology Project, Rossow und Schiffer (1999)) wurden mit unterschiedlichen statistischen Methoden auf Trends in der Zirrenbedeckung untersucht; dabei wurden Anstiege der Zirrenbedeckung von 1,3 - 2 % pro Dekade festgestellt (Zerefos et al. 2003; Minnis et al. 2004; Stordal et al.; Eleftheratos et al. 2007). Allerdings kann die Änderung der Zirrenbedeckung verschiedenste Ursachen haben (z. B. Effekt des Klimawandels, natürliche Variabilität, Zunahme von bodengebundenen Rußemissionen), so dass die kausale Verknüpfung der beobachteten Veränderungen mit dem Flugverkehr bei dieser Methode nicht zweifelsfrei belegt werden kann.

Korrelationsuntersuchungen zwischen auftretender Flugverkehrsdichte und beobachteter Zirrenbedeckung über Europa und Nordafrika auf Basis eines feinen äquidistanten Gitters ergaben eine Zunahme der Zirrenbedeckung mit steigender Flugverkehrsdichte (Mannstein und Schumann 2005; Krebs 2006). Da jedoch im Nordafrika-Teil des Untersuchungsgebietes weniger Flugverkehr auftritt und die natürliche Zirrenbedeckung dort geringer ist als in Zentraleuropa, erwiesen sich die abgeleiteten Schlussfolgerungen als nicht zwingend (Graf 2007; Mannstein und Schumann 2007).

Neben der hier beschriebenen Veränderung der Zirrenbedeckung infolge der Alterung von Kondensstreifen können Flugzeuge auch auf einem zweiten Wirkungspfad die Zirkeneigenschaften verändern. Die in den Abgasen enthaltenen Partikel könnten auch erst zu späteren Zeitschritten als Kondensationskeime dienen und so an Orten, an denen sonst keine Kondensation eingesetzt hätte, Kondensation ermöglichen oder in Gebieten, in denen auch ohne diese Partikel Kondensation stattgefunden hätte, durch die höhere Anzahl an Kondensationskeimen die für die optischen Eigenschaften von Wolken entscheidenden Parameter der Partikelanzahl und Partikelgröße und damit die optische Dicke verändern (Penner et al. 2009; Hendricks et al. 2011). Dieser Effekt ist an die Verweildauer der ausgestoßenen Partikel in der Atmosphäre gekoppelt und kann, abhängig von den atmosphärischen Randbedingungen, Tage oder Wochen nach der Emission an völlig anderen Orten der Erde wirksam werden.

Prinzipiell beeinflussen Kondensstreifen ebenso wie natürliche Zirren den Strahlungstransport auf zwei Arten. Zum einen wird durch die Erhöhung der Zirrenbedeckung die solare Einstrahlung, die die Erdoberfläche erreicht, reduziert (Albedoeffekt). Zum

anderen wird durch Kondensstreifen die thermische Abstrahlung am Oberrand der Atmosphäre reduziert (Meerkötter et al. 1999; Fahey et al. 1999). Für den ersten Effekt ist die optische Dicke der entscheidende Parameter, im thermischen Spektralbereich sind die Temperatur und die von der optischen Dicke abhängige Emissivität die bestimmenden Größen. Für die mittlere optische Dicke linienförmiger Kondensstreifen werden verschiedene Größen meist im Bereich zwischen 0,1 und 0,5 angeführt (Minnis et al. 2004; Sassen 1997; Freudenthaler et al. 1996; Jäger et al. 1998; Meyer et al. 2002; Meerkötter et al. 1999). Neuere Arbeiten ermittelten mit CALIOP (vgl. Abschnitt 2.4) Werte von 0,19 (für visuell identifizierte linienförmige Kondensstreifen, Iwabuchi et al. 2012) oder mit MODIS 0,21 (für CDA-detektierte Kondensstreifen, Bedka et al. 2013). Der Netto-Strahlungsantrieb ist die Summe des kurzwelligen und des langwelligen Beitrages. Während sich untertags bei solarer Einstrahlung der kurz- und langwellige Effekt teilweise balancieren, entfällt nachts der kurzwellige Beitrag. Der Nettoeffekt entspricht dann dem langwelligen Strahlungsantrieb. Stuber et al. (2006) untersuchten ein Gebiet im Südosten Englands und fanden für den stark überflogenen Ort Herstmonceux einen jahresgemittelten mittleren lokalen Netto-Strahlungsantrieb von  $0,23 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  durch lineare Kondensstreifen, der sich aus einem thermischen Beitrag von  $0,78 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  und einem kurzwelligen Beitrag von  $-0,54 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  zusammensetzt. Sie zeigten auch, dass Nachtflüge im Winter für den größten Teil dieses Strahlungsantriebes verantwortlich sind. Aktuell wird der global gemittelte Strahlungsantrieb für lineare Kondensstreifen mit  $0,012 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  und der Grad des wissenschaftlichen Verständnisses als gering angegeben (Lee et al. 2009). Der Strahlungsantrieb von Kondensstreifen-Zirren wird mit  $0,033 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  angegeben, mit einem großen Unsicherheitsbereich (vgl. Abbildung 1.1). Mit einem globalen Kondensstreifen-Zirrenmodell, das auch die Rückwirkung von Kondensstreifen-Zirren auf die natürliche Zirrenbildung berücksichtigt (Burkhardt und Kärcher 2009), wurden Werte von  $31 \frac{\text{mW}}{\text{m}^2}$  gefunden (Burkhardt und Kärcher 2011).

Neben der Klimawirkung sind besonders auch die Wirkungsdauer sowie der zeitliche Verlauf der Wirkung von Kondensstreifen und Kondensstreifen-Zirren von zentraler Bedeutung. Allerdings sind diese Größen und Funktionen weitgehend unbekannt. Publikationen beschränken sich weitgehend auf Fallstudien (z. B. Minnis et al. 1998). Da für solche Fallstudien aber üblicherweise besonders illustrative Situationen betrachtet werden, sind diese Werte nicht notwendigerweise repräsentativ. Das oben genannte globale Modell CCMoD (Burkhardt und Kärcher 2009) löst zwar nicht einzelne Kondensstreifen und die individuelle zeitliche Entwicklung ihrer Wirkung auf, Analysen von Tagesgängen der Kondensstreifen-Zirren-Bedeckung deuten aber auf eine geringe



tageszeitliche Variation der Kondensstreifen-Zirrenbedeckung auch in Gebieten mit variablem Flugverkehrstagesgang hin (Newinger 2010), was auf eine Wirkungsdauer von Kondensstreifen auf Bedeckungsgrad und Strahlung im hohen einstelligen oder niedrigen zweistelligen Stundenbereich hindeutet (Newinger und Burkhardt 2012).

Während sich beispielsweise die Klimawirkung der CO<sub>2</sub> Emissionen des Flugverkehrs direkt aus der Menge des verbrannten Treibstoffs ergibt und sich, abgesehen vom Einsatz von Wasserstoff als Energieträger, nur durch Effizienzsteigerungen in begrenztem Umfang reduzieren lässt, ist die Klimawirkung eines individuellen Fluges infolge der Bildung von Kondensstreifen sehr variabel und hängt wesentlich von den atmosphärischen Randbedingungen und dem Sonnenstand ab. Die vertikale Ausdehnung von eisübersättigten Regionen liegt häufig im Bereich von wenigen hundert Metern (Spichtinger et al. 2003; Dickson et al. 2009). So wurde vorgeschlagen, durch eine geringe, der aktuellen meteorologischen Situation angepasste Veränderung der Flughöhe oder ein horizontales Umfliegen solcher Gebiete Kondensstreifenbildung zu vermeiden bzw. eine Reduzierung der Klimawirkung von Kondensstreifen zu erreichen (Mannstein et al. 2005).

## 1.2 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Quantifizierung der flugverkehrsinduzierten Zirrenbedeckung und der damit verbundenen Änderung der langwelligen Strahlungsflussdichte, den Kondensstreifen bzw. Kondensstreifen-Zirren während ihrer gesamten Lebensdauer entfalten. Wie erläutert, scheidet für gealterte Kondensstreifen eine Quantifizierung auf Basis ihrer Morphologie aus. In dieser Arbeit wird ein völlig neuer Ansatz zur Quantifizierung des Bedeckungsgrades und des langwelligen Strahlungsantriebs auch dieser gealterten Kondensstreifen verfolgt. Dazu wird die Hypothese aufgestellt, dass der Tagesgang des Flugverkehrsaufkommens sich in der Atmosphäre entfaltet und in der Zirrenbedeckung und der ausgehenden langwelligen Strahlung nachgewiesen werden kann.

Unter gewissen atmosphärischen Bedingungen (vgl. Abschnitt 1.1) werden durch Flugzeuge Kondensstreifen gebildet. Während manche Kondensstreifen schnell verdunsten, breiten sich persistente Kondensstreifen oft über mehrere Stunden hinweg aus. In diesem Stadium wächst die durch dieses Flugzeug verursachte Wirkung (lineare Kondensstreifenbedeckung (LiCC), Zirrenbedeckung (CC) und Änderung der langwelligen Strahlungsflussdichte (OLR)) an. Im weiteren Verlauf wird diese Wirkung durch verschiedene Prozesse wieder abnehmen. Im statistischen Mittel wird die Wirkung eines Flugzeuges auf die AIC also eine Funktion der Zeit sein, die zunächst ansteigt, ihr

Maximum annimmt und schließlich wieder abklingt. Die Form dieser Funktion variiert je nach betrachteter Wirkung; bei der linearen Kondensstreifenbedeckung wird – ungeachtet der oben adressierten Definitionsschwierigkeiten – das Maximum nach kürzerer Zeit erreicht sein als beispielsweise bei der Zirrenbedeckung.

In Gebieten mit geringem Flugverkehrsaufkommen sind in erster Näherung Sättigungseffekte vernachlässigbar (Mannstein und Schumann 2005); hier kann von einem linearen Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung ausgegangen werden: Zwei Flugzeuge gleichen Typs entfalten dort bei gleichen atmosphärischen Randbedingungen im Mittel doppelt so viel Wirkung wie ein einzelnes Flugzeug. Die Gesamtwirkung kann dann als Superposition der Wirkung jedes einzelnen Flugzeugs verstanden werden, unter Beachtung der Zeitspanne zwischen Flug und Beobachtung (vgl. Abbildung 2.10). In stärker beflogenen Gebieten ist diese Linearität nicht mehr gegeben: Bei steigendem Flugverkehrsaufkommen überlappt ein neu hinzukommender Kondensstreifen großteils mit bereits bestehender flugverkehrsinduzierter Zirrenbedeckung. Bei solch einem Überlapp kommt es definitionsgemäß zu keiner Veränderung des Bedeckungsgrades. Bei der Änderung der ausgehenden langwelligen Strahlungsflussdichte kommt es bei dünnen Zirren zunächst zu einer näherungsweisen Addition der Einzelbeiträge; später geht der anfänglich lineare Anstieg mit steigender Flugverkehrsdichte in eine Sättigung über.

Wäre das Flugverkehrsaufkommen in einem Beobachtungsgebiet zeitlich und räumlich z. B. im Tagesverlauf konstant, so wäre – gleiche Hintergrundbedingungen angenommen – kein Tagesgang der Wirkung zu erwarten. Da das Flugverkehrsaufkommen aber räumlich und zeitlich hochvariabel ist, lässt sich aus den obigen Betrachtungen die Hypothese ableiten, dass im langzeitlichen Mittel auch eine Variabilität in der Wirkung zu beobachten ist, welche durch die Variabilität in der Ursache hervorgerufen wird.

Wie bereits diskutiert, ist die Transformationsfunktion, die den mittleren zeitlichen Verlauf der Wirkung (hier lineare Kondensstreifenbedeckung, flugverkehrsinduzierte Zirrenbedeckung, flugverkehrsinduzierte Änderung der langwelligen Strahlungsflussdichte) eines Flugverkehrereignis als Funktion des Alters beschreibt, weitgehend unbekannt. Bekannt ist jedoch das Flugverkehrsaufkommen als Ursache (ein geeigneter Flugverkehrsdatensatz wird vorausgesetzt). Die Wirkung ist zwar nicht isoliert bekannt, jedoch in Beobachtungsdaten der linearen Kondensstreifenbedeckung, der gesamten Zirrenbedeckung und der gesamten ausgehenden langwelligen Strahlungsflussdichte enthalten. In dieser Arbeit wird eine Methode entwickelt und eingesetzt, die auf Basis der bekannten Ursache, der beobachteten Größen, einer angenommenen Transformationsfunktion  $\text{Flugverkehr} \Rightarrow \text{Wirkung}$  und einer Annahme eines natürlichen Hintergrundtagesgangs

der Beobachtungsgrößen die Ableitung der Parameter der Transformationsfunktion erlauben. Nach Ermittlung dieser Parameter kann die flugverkehrsinduzierte Wirkung quantifiziert werden.

Für diese Untersuchung sind periodisch wiederkehrende Variationen im Flugverkehrsaufkommen nötig. Prinzipiell gibt es solche Periodizitäten im Tagesgang, im Wochengang und im Jahresgang. Im Abschnitt 3.1 wird der Tagesgang der Flugverkehrsdichte für das Untersuchungsgebiet vorgestellt. Wochengänge im Flugverkehrsaufkommen wären zur Untersuchung der Flugverkehrswirkung prinzipiell besonders interessant, da die Woche, anders als der Tag, keine physikalische Bedeutung besitzt und beobachtete Variationen in der Wirkung direkt dem Flugverkehr zugeordnet werden könnten<sup>1</sup>. Allerdings ist die Variation des Flugverkehrsaufkommens auf der Wochenskala nach bisherigen Analysen klein. Jahresgänge im Flugverkehrsaufkommen zeigen ebenso nur eine geringe Variation, die durch sie eventuell hervorgerufene Variation in der Wirkung wäre sicherlich deutlich kleiner als die Amplitude der natürlichen Jahresgänge in den Beobachtungsgrößen (vgl. Abbildung 3.6). Daher erscheint es unmöglich, auf der Jahresskala die flugverkehrsinduzierte Wirkung isolieren zu können.

Methodisch bedingt kann allerdings nicht die Herkunft der beobachteten flugverkehrsinduzierten Zirrenbedeckung identifiziert werden. Soweit im Folgenden von flugverkehrsinduzierter Zirrenbedeckung (AIC, Aviation Induced Cirrus) gesprochen wird, sind in dieser Größe auch ggf. Beiträge durch Soot-Zirrus enthalten.

---

<sup>1</sup>Verschiedene meteorologische Situationen wie Tiefdruckgebiete können zwar auch eine typische Zeitskala von einigen Tagen besitzen, sie dürften jedoch bei Analyse entsprechend langer Zeiträume keine Periodizität von exakt 7,0 Tagen aufweisen.



# Kapitel 2

## Methoden und Daten

Um die in Abschnitt 1.2 skizzierte Methode umsetzen zu können, muss ein geeignetes Untersuchungsgebiet definiert werden (Abschnitt 2.2), in dem Flugverkehrsdaten (Abschnitt 2.3) sowie geeignete Satellitendaten (Abschnitt 2.4) verfügbar sind und der Tagesgang der Flugverkehrsdichte eine für die Anwendung der Methode geeignete Form aufweist. Um aus den Satellitendaten Produkte zur Ermittlung der Flugverkehrswirkung abzuleiten, werden ein Verfahren zur Detektion linearer Kondensstreifen (Abschnitt 2.5), ein Verfahren zur Detektion der Zirrenbedeckung (Abschnitt 2.6) und ein Algorithmus zur Ableitung der langwelligen Strahlungsflussdichte (Abschnitt 2.7) eingesetzt. Mithilfe dieser Algorithmen lassen sich Zeitreihen und mittlere Tagesgänge dieser Beobachtungsgrößen ableiten (Abschnitt 2.8). Der Tagesgang der Flugverkehrsdichte wird sodann über geeignete Transformationsfunktionen (Abschnitt 2.9) mit den beobachteten Tagesgängen verknüpft. Bei der Anwendung der Methode sind Annahmen über die Form der natürlichen Tagesgänge der Beobachtungsgrößen zu treffen, die ohne Flugverkehr zu beobachten wären (Abschnitt 2.10). Teilweise werden hierfür Modell-daten aus einem numerischen Wettervorhersagemodell (Abschnitt 2.11) herangezogen. Zunächst werden jedoch in Abschnitt 2.1 grundlegende Begriffe der Satellitenmeteorologie eingeführt, die zum Verständnis der behandelten Satellitenprodukte erforderlich sind.

### 2.1 Definition von Strahlungsgrößen

Strahlung wird mit der Größe der spektralen Strahldichte (engl. spectral radiance) beschrieben. Diese Größe gibt die Strahlungsenergie  $\Phi$  an, die von einer Punktquelle bei einer bestimmten Wellenlänge in die durch den Polarwinkel  $\theta$  und den Azimuthwin-

kel  $\phi$  definierte Richtung pro Zeit-, Flächen-, Raumwinkel<sup>1</sup>- und Wellenlängeneinheit abgestrahlt wird,

$$L_{\Omega \lambda}(\theta, \phi, \lambda) = \frac{d^3\Phi}{\cos(\beta) dA d\Omega d\lambda} \quad (2.1)$$

Sie trägt die Einheit  $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{m}^{-1}$ . Anstatt auf ein Wellenlängenintervall  $d\lambda$  kann sie auch auf ein Wellenzahlintervall  $d\nu$  bezogen sein. Die spektrale Strahldichte liefert die detaillierteste Darstellung der Strahlungseigenschaften eines Strahlers. Sie ist an jedem Punkt im Raum definiert.

Durch Integration über alle Wellenlängen ergibt sich aus der spektralen Strahldichte die Strahldichte (engl. radiance).

Durch Integration der spektralen Strahldichte über den Halbraum ergibt sich die spektrale Strahlungsflussdichte. Berücksichtigt man nur die einfallende Strahlung, bezeichnet man diese Größe als spektrale Bestrahlungsstärke, während bei Berücksichtigung der ausgehenden Strahlung der Begriff spektrale Ausstrahlung benutzt wird. Die Größe ergibt sich jeweils als

$$E = \int_{\Omega} L \cos(\epsilon) d\Omega. \quad (2.2)$$

Die Gewichtung der Strahldichte mit dem Faktor  $\cos(\epsilon)$  trägt der Orientierung des Flächenelements  $d\Omega$  Rechnung. Wird hingegen die vom betrachteten Punkt in den Halbraum ausgehende Strahlung betrachtet, so wird die Größe als spektrale Ausstrahlung bezeichnet.

Nach dem Kirchhoffschen Gesetz ist das Absorptionsvermögen eines Körpers bei einer bestimmten Wellenlänge gleich zu seinem Emissionsvermögen bei derselben Wellenlänge,

$$\alpha(\lambda) = \epsilon(\lambda), \text{ mit } 0 \leq \alpha \leq 1. \quad (2.3)$$

Ein Körper, der die gesamte einfallende Strahlung der Wellenlänge  $\lambda$  absorbiert, wird als schwarzer Körper bezeichnet. Dieser idealisierte Körper emittiert nach Gleichung 2.3 auch die für die gegebene Temperatur maximal mögliche Strahlung isotrop. Diese maximal mögliche spektrale Strahlungsflussdichte eines Körpers der Temperatur  $T$  wird

---

<sup>1</sup>gemessen in Steradian, sr

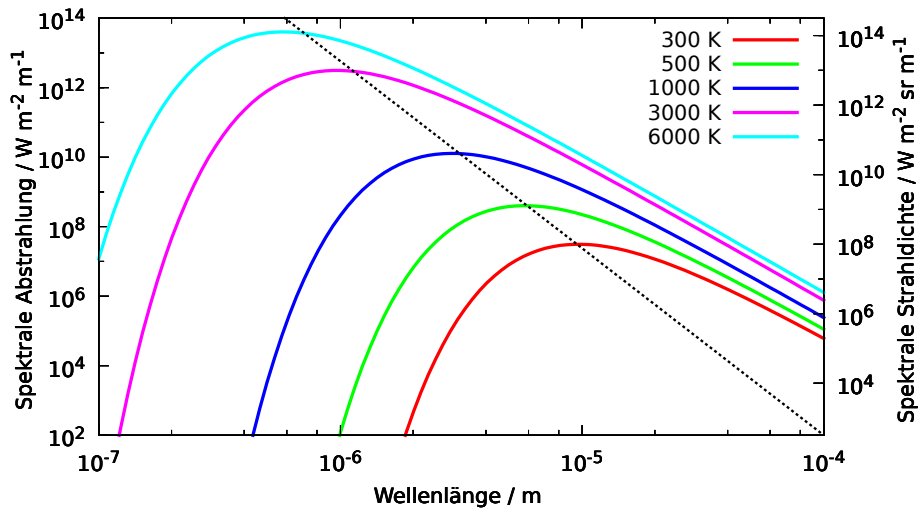


Abbildung 2.1: Spektrale Ausstrahlung (linke Achse) bzw. spektrale Strahldichte (rechte Achse) für verschiedene Schwarzkörpertemperaturen. Die schwarze Gerade kennzeichnet die Lage der Maxima der Kurvenschar.

durch das Plancksche Strahlungsgesetz gegeben,

$$M_{\lambda}(T) = \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5 (e^{(hc)/(\lambda kT)} - 1)}, \quad (2.4)$$

wobei  $\lambda$  die Wellenlänge,  $T$  die Temperatur,  $h$  das Plancksche Wirkungsquantum ( $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ W s}^2$ ),  $c$  die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ( $2,9979 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ) und  $k$  die Boltzmannkonstante ( $1,3804 \cdot 10^{-23} \text{ W s K}^{-1}$ ) bezeichnen. In Abbildung 2.1 sind die spektralen Strahldichten sowie die spektrale Abstrahlung für verschiedene Temperaturen dargestellt. In der gewählten doppelt-logarithmischen Darstellung liegen die Maxima der spektralen Strahldichten bzw. der spektralen Abstrahlung auf einer Geraden. Das Plancksche Strahlungsgesetz (vgl. Gleichung 2.4) erlaubt die eindeutige Zuordnung einer beobachteten Strahldichte mit der Wellenlänge  $\lambda$  zu einer Referenztemperatur, die ein schwarzer Strahler haben müsste, um bei der Wellenlänge  $\lambda$  die beobachtete Strahldichte zu emittieren. Diese Referenztemperatur bezeichnet man als Helligkeitstemperatur (engl. „brightness temperature“).

In der Meteorologie werden häufig der solare Spektralbereich und der terrestrische Spektralbereich separat untersucht (vgl. Abbildung 2.2). Der solare (oder kurzwellige) Spektralbereich überdeckt hierbei den Wellenlängenbereich, in dem von der Sonne Strahlung emittiert wird. Der terrestrische (oder thermische oder langwellige) Spektralbereich umfasst Wellenlängen von ca.  $3,5 \mu\text{m}$  aufwärts.

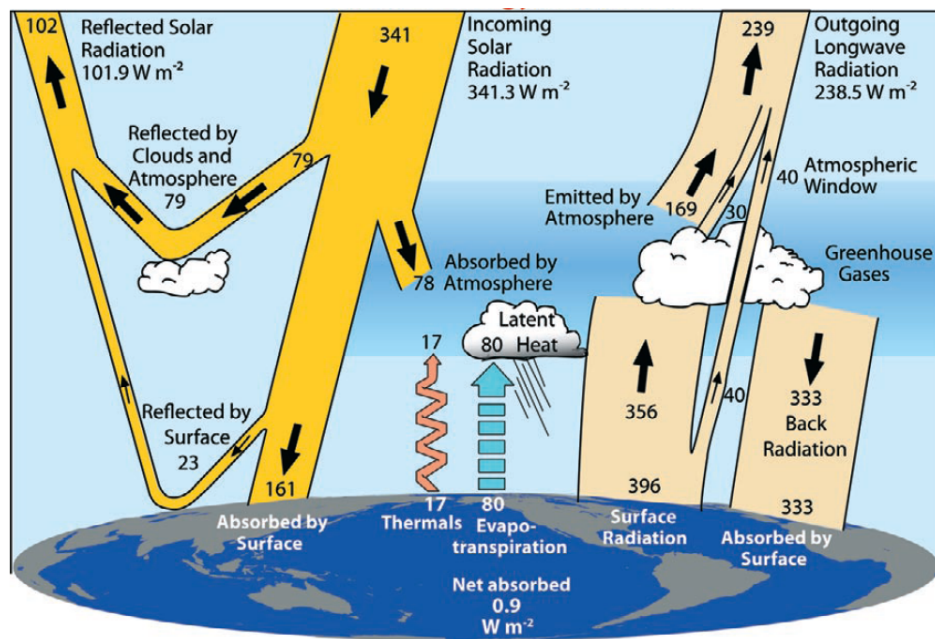


Abbildung 2.2: Globales Strahlungshaushalt des Erde-Atmosphäre-Systems. Alle Werte sind in  $\text{W/m}^{-2}$  angegeben. Quelle: Trenberth et al. (2009, mit freundlicher Genehmigung durch die Amer. Met. Soc.)

Kondensstreifen und Kondensstreifen-Zirren verändern den Strahlungstransport in beiden Spektralbereichen. Im kurzwelligen Spektralbereich reflektieren sie, wie die anderen Wolken auch, einfallende Solarstrahlung, im thermischen Spektralbereich absorbieren sie die von der Erdoberfläche oder anderen Atmosphärenschichten emittierte thermische Strahlung und emittieren gemäß ihrer eigenen Emissivität und Temperatur. Dieses Verhalten ist symbolisch in Abbildung 2.2 dargestellt.

## 2.2 Auswahl des Untersuchungsgebiets

Die in dieser Arbeit entworfene Fragestellung stellt besondere Anforderungen an das Untersuchungsgebiet. Der Tagesgang des Flugverkehrsaufkommens soll dort eine hohe tageszeitliche Variation und ein charakteristisches Profil aufweisen, das sich deutlich von Tagesgängen natürlicher atmosphärischer Einflussgrößen abgrenzen lässt. Zentral-europa wäre beispielsweise als Untersuchungsgebiet ungeeignet; das Flugverkehrsaufkommen ist dort stark mit der solaren Einstrahlung korreliert, mit hohem Flugverkehrsaufkommen untertags und niedrigem Verkehrsaufkommen in den Nachtstunden (Krebs 2006). Vom Tagesgang des Flugverkehrs aufgeprägte Signaturen etwa in der Zirrenbedeckung können dann nicht von den durch Einstrahlung und dadurch ange-



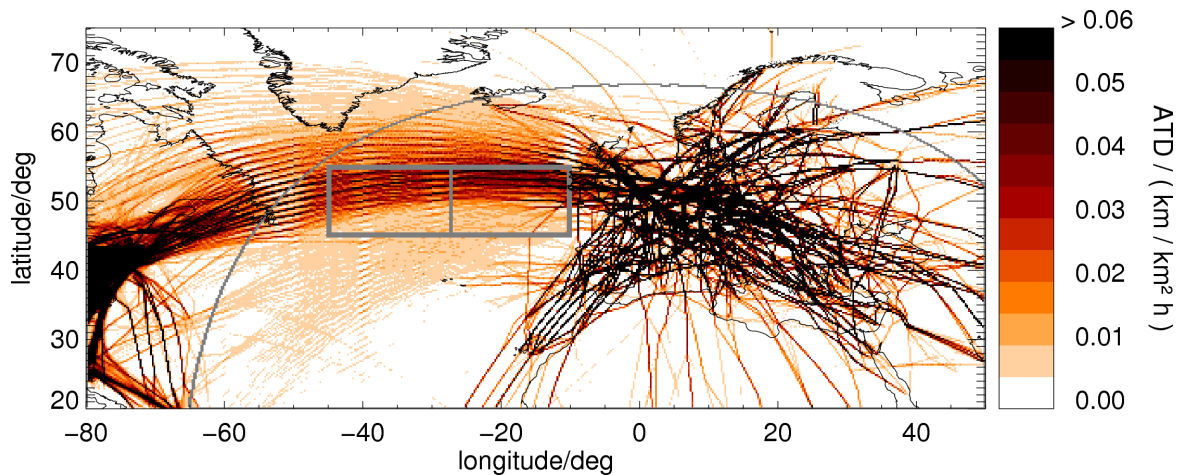


Abbildung 2.3: Räumliche Verteilung der Flugverkehrsdichte des EUROCONTROL-Datensatzes, gemittelt über alle Tageszeiten. Die graue Box kennzeichnet das NAR-Gebiet, aufgeteilt in Ost- und Westteil. Die graue Linie kennzeichnet den von einem am Nullmeridian platzierten geostationären Satelliten abgedeckten Bereich (Satellitenzenitwinkel  $75^\circ$ ) dar.

triebener Konvektion verursachten Signaturen getrennt werden.

Generell müssen natürlich sowohl Flugverkehrsdaten als auch geeignete Satellitendaten für das Gebiet zur Verfügung stehen. Um Tagesgänge atmosphärischer Parameter analysieren zu können, sind hierfür geostationäre Satelliten heranzuziehen, da sie eine hohe zeitliche Auflösung besitzen und so eine zeitlich homogene Auflösung von Tagesgängen erlauben.

Für diese Arbeit wurde das Gebiet  $45^\circ \text{ W} - 10^\circ \text{ W}$ ,  $45^\circ \text{ N} - 55^\circ \text{ N}$  ausgewählt, das im Folgenden als NAR (North Atlantic Region) bezeichnet wird. Es überdeckt einen großen Bereich des Nordatlantischen Flugkorridors, und liegt zudem innerhalb des von Meteosat-8/9 abgedeckten Bereichs (vgl. Abb. 2.3). Die Abmessungen des Gebiets betragen etwa  $2500 \text{ km} \times 1000 \text{ km}$ . Stellenweise werden der Ost- und der Westteil von NAR separat ausgewertet; diese Teilgebiete werden dann als NAR-W (Westteil) bzw. NAR-E (Ostteil) bezeichnet. Die Trennlinie dieser beiden Gebiete verläuft bei  $27,5^\circ \text{ W}$ . Zu Vergleichszwecken, die in Abschnitt 2.10 näher erläutert werden, wird auch das am Äquator gespiegelte Gebiet SAR (South Atlantic Region,  $45^\circ \text{ W} - 10^\circ \text{ W}$ ,  $45^\circ \text{ S} - 55^\circ \text{ S}$ ) betrachtet. In SAR ist das Flugverkehrsaufkommen praktisch null.

## 2.3 Der EUROCONTROL-Flugverkehrsdatensatz

Zur Analyse flugverkehrsinduzierter Tagesgänge ist ein zeitlich und räumlich hochaufgelöster Flugverkehrsdatensatz nötig. Für diese Untersuchung stand ein Flugverkehrsdatensatz zur Verfügung, der für sechs ausgewählte Wochen des Jahres 2004 und das Gebiet  $80^\circ \text{ W} - 50^\circ \text{ E}$ ,  $20^\circ \text{ N} - 75^\circ \text{ N}$  die über je  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  Längen-Breitengrad-Boxen und 15 min aufakkumulierten geflogenen Distanzen enthält (Krebs 2006). Dabei gehen Strecken ein, die von zivilen Verkehrsflugzeugen in einer Flughöhe von 200 - 450 Hektofuss (hft, ca. 6,1 km bis 13,7 km) zurückgelegt wurden. Die Untergrenze von 6,1 km stellt im Nordatlantischen Flugkorridor keine wesentliche Einschränkung dar; nach Wilkerson et al. (2010) finden dort 96 % aller Flugbewegungen oberhalb von 7 km statt. Militärische Flugbewegungen sind nicht berücksichtigt. Eine Unterscheidung nach verschiedenen Flugzeugtypen und -größen ist nicht enthalten. Der Datensatz ist zweidimensional, weder über die Flughöhe der einzelnen Maschinen noch die Flughöhenverteilung liegen Informationen vor. Dieser Datensatz wurde im Rahmen des ESA-DUE Projekts „contrails“ von der europäischen Flugsicherungsbehörde EUROCONTROL zur Verfügung gestellt.

Die in den Originaldaten aufgeführten Distanzen pro  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  Box eignen sich nur begrenzt für den direkten Vergleich des Flugverkehrsaufkommens zweier Boxen, da je nach Breitengrad die Flächen der einzelnen Boxen variieren. Daher wurden die Flugdistanzen durch Division mit der Boxfläche analog zu Krebs (2006) und Mannstein und Schumann (2005) in die Einheit  $\text{km}/(\text{km}^2 \text{ h})$  oder  $\text{km}^{-1} \text{ h}^{-1}$  umgewandelt. Die räumliche Auflösung des Datensatzes ist davon unberührt. Abb. 2.3 zeigt die so über die sechs Wochen und alle Uhrzeiten gemittelte räumliche Verteilung der Flugverkehrsdichte dieses Datensatzes.

Der Nordatlantik ist das dichtbeflogenste ozeanische Gebiet (ICAO 2011), etwa 8 %<sup>2</sup> des globalen zivilen Flugverkehrsaufkommens wird dort generiert (Wilkerson et al. 2010). In weiten Teilen steht aber keine Radarnavigation zur Verfügung. In diesem NMPSA (North Atlantic minimum Navigation Performance Specifications Airspace) gelten daher besondere Regeln, um die Sicherheit des transatlantischen Flugverkehrs zu gewährleisten und um Kollisionen zu verhindern. Neben bestimmten Anforderungen an die technische Ausrüstung der Flugzeuge zählen dazu insbesondere Separationsregeln. So werden täglich, entsprechend der aktuellen Wetterlage und unter Berücksichtigung anderer Einflüsse, Wegpunkte definiert, auf denen Flüge zulässig sind. Abb. 2.4 zeigt

---

<sup>2</sup>Der Zahlenwert bezieht sich auf das in Wilkerson et al. (2010) definierte größere Gebiet NAFC, nicht auf das in dieser Arbeit untersuchte Gebiet NAR.

exemplarisch eine solche Routenfestlegung für die von Amerika nach Europa gehenden Flüge eines Tages. Bei geeigneter meteorologischer Situation ist das gebündelte Auftreten von Kondensstreifen an den auf diese Weise definierten Wegpunkten in Satellitendaten zu beobachten.



Abbildung 2.4: Exemplarisch für einen bestimmten Tag vorgegebene Routen für ostwärts gehende Flüge im NMPA. Quelle: (ICAO 2011)

## 2.4 Der europäische Wettersatellit Meteosat Second Generation

Zur Analyse von Tagesgängen ist eine hohe zeitliche Auflösung der zugrundeliegenden Beobachtungsdaten nötig. Polarumlaufende Satelliten bieten zwar eine hohe räumliche Auflösung, überfliegen aber Gebiete in den mittleren Breiten nur etwa zweimal pro Tag. Zwar kann für Fallstudien insbesondere in höheren Breiten auch durch eine Kombination verschiedener polarumlaufender Satelliten eine zeitliche Auflösung im Stundenbereich erreicht werden (z. B. Haywood et al. 2009). Infolge sich verändernder Überflugszeiten, verschiedener Instrumentenempfindlichkeiten der einzelnen Satelliten und verschiedener Beobachtungsgeometrien ist eine systematische Kombination dieser Satelliten zur Ableitung von Tagesgängen schwierig. So könnten unterschiedliche Empfindlichkeiten der einzelnen Satelliten zu Artefakten im abgeleiteten Tagesgang führen. Solche Verfahren werden daher üblicherweise nur in polaren Breiten zur Tagesgangana-

lyse genutzt (z. B. Schulz et al. 2009), da diese Gebiete vom geostationären Orbit aus nicht beobachtet werden können.

Dagegen bieten geostationäre Satelliten eine homogen hohe zeitliche Auflösung und eine konstante Beobachtungsgeometrie. Sie werden in unterschiedlicher Instrumentierung von mehreren Ländern, teilweise in Kooperation, betrieben. Der amerikanische Kontinent wird hier von zwei Satelliten der GOES Baureihe (Geostationary Operational Environmental Satellite) der US-amerikanischen NASA (National Aeronautics and Space Administration) abgedeckt (Menzel und Purdom 1994). Japan betreibt Satelliten der MTSAT Baureihe (Multifunctional Transport Satellites, Puschell et al. 2002). Auch China (Fengyun-2) und Indien (INSAT) betreiben geostationäre meteorologische Satelliten.

Für Europa liefern die Meteosat-Satelliten des europäischen Betreibers EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites) seit 1977 Daten über die meteorologische Situation. Die erste Generation dieser Satelliten (Meteosat First Generation, MFG) wurde 2004 durch Meteosat-Satelliten der zweiten Generation (Meteosat Second Generation, MSG, Schmetz et al. 2002), mit höherer zeitlicher, räumlicher und spektraler Auflösung abgelöst<sup>3</sup>. Die verwendete geostationäre Position am Nullmeridian ist für die Beobachtung von Afrika, weiten Teilen des Atlantiks und Europa optimal.

Derzeit (2013) sind drei Satelliten dieser Baureihe im Orbit, die als Meteosat-8, Meteosat-9 und Meteosat-10 bezeichnet werden. Der vierte und letzte Satellit (MSG-4<sup>4</sup>) dieser Baureihe soll 2014 in die Umlaufbahn gebracht werden. Ab 2020 wird dann die dritte Generation (Meteosat Third Generation, MTG, Rodriguez et al. 2009) die Satelliten der MSG-Serie ablösen. Die zeitliche Auflösung des jeweils operationellen Satelliten (aktuell Meteosat-10) beträgt 15 Minuten. Daneben wird seit 2008 von einem bei 9,5° E positionierten Schwestersatelliten gleicher Bauart (aktuell Meteosat-8) ein „Rapid Scanning Service“ durchgeführt, der den für EUMETSAT und die europäischen Wetterdienste besonders interessanten nördlichen Teil der Erdscheibe mit einer Auflösung von 5 Minuten scannt. An Bord der MSG-Satelliten befinden sich mehrere Instrumente. Das Hauptinstrument ist das abbildende Radiometer SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infra-Red Imager). SEVIRI misst in elf Wellenlängenbändern Strahldichten mit einer räumlichen Auflösung von bis zu<sup>5</sup> 3 km x 3 km. Der HRV-

---

<sup>3</sup>Ein Satellit der Baureihe MFG befindet sich noch im operationellen Betrieb und ist derzeit (2013) bei 57° E stationiert

<sup>4</sup>Dieser Satellit wird nach Inbetriebnahme in Meteosat-11 umbenannt werden

<sup>5</sup>Die Angaben des Auflösungsvermögens in der Form „bis zu“ bezieht sich auf die Auflösung am Subsatellitenpunkt. Mit zunehmenden Satellitenzenitwinkel fällt das Auflösungsvermögen geometrie-



Abbildung 2.5: Startvorbereitungen am Satelliten MSG-3 (umbenannt in Meteosat-10 nach Aufnahme des operationellen Betriebs). Quelle: ESA/CNES/Arianespace/Optique Video du CSG - S. Martin

Kanal (High Resolution Visible) besitzt eine Auflösung von bis zu 1 km x 1 km, die gewonnenen Daten stehen jedoch wegen begrenzter Datentransferrate nicht für den gesamten von MSG abgedeckten Bereich zur Verfügung. Ein weiteres Instrument an Bord von MSG ist GERB (Geostationary Earth Radiation Budget Experiment, Harries et al. 2005). GERB ist ebenfalls ein abbildendes Radiometer, das zwei breitbandige Kanäle besitzt. Ein Kanal erfasst hier den solaren Spektralbereich von 320 nm bis 4  $\mu\text{m}$ , der zweite Kanal deckt den solaren und thermischen Spektralbereich von 320 nm bis 30  $\mu\text{m}$  ab. Aus der Differenz lässt sich so der Strahlungsfluss im thermischen Spektralbereich ableiten. Im Vergleich zu SEVIRI besitzt GERB eine deutlich geringere räumliche SSP-Auflösung (Sub Satellite Point) von 50 km x 50 km. Daneben gibt es noch Instrumente

bedingt ab.

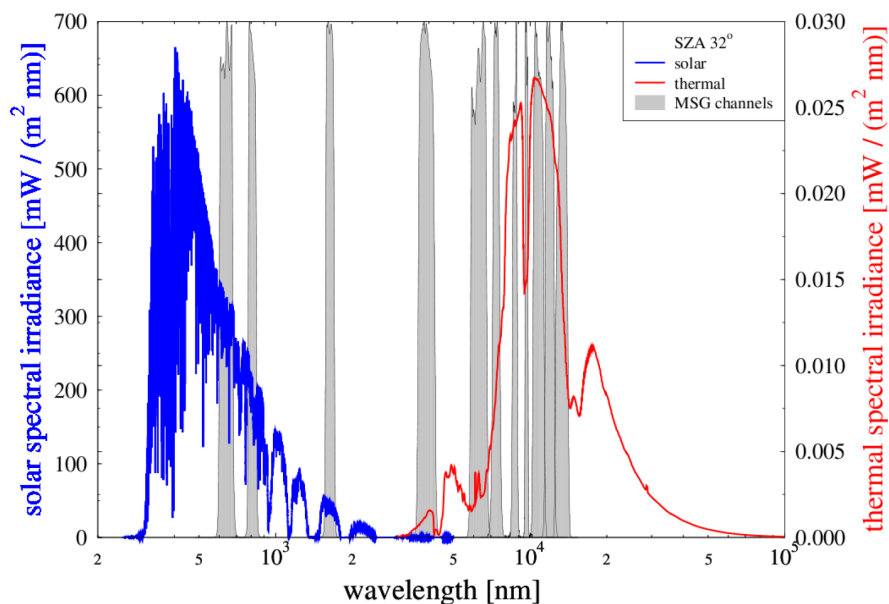


Abbildung 2.6: Lage der elf MSG-SEVIRI Spektralkanäle (ohne HRV Kanal), sowie beispielhafte Spektren von ausgehender langwelliger Strahlung (rot) und reflektierter solarer Strahlung (blau). Quelle: Vazquez-Navarro et al. (2012), Lizenz CC-BY 3.0.

Kanal	zentrale Wellenlänge in $\mu\text{m}$	Bandbreite in $\mu\text{m}$	max. Auflösung
VIS006	0.635	0.56 - 0.71	3 km x 3 km
VIS008	0.81	0.74 - 0.88	3 km x 3 km
IR_016	1.64	1.50 - 1.78	3 km x 3 km
IR_039	3.92	3.48 - 4.36	3 km x 3 km
WV_062	6.25	5.35 - 7.15	3 km x 3 km
WV_073	7.35	6.85 - 7.85	3 km x 3 km
IR_087	8.70	8.30 - 9.10	3 km x 3 km
IR_097	9.66	9.38 - 9.94	3 km x 3 km
IR_108	10.8	9.80 - 11.80	3 km x 3 km
IR_120	12.0	11.00 - 13.00	3 km x 3 km
IR_134	13.4	12.40 - 14.40	3 km x 3 km
HRV	-	0.40 - 1.10	1 km x 1 km

Tabelle 2.1: Liste der MSG-SEVIRI Kanäle, mit zentraler Wellenlänge und Breite des Spektralbandes, sowie Auflösung am Subsatellitenpunkt. Quelle: Schmetz et al. (2002).

für Datenverarbeitungs- und Kommunikationszwecke sowie ein Modul zur Verarbeitung von Notfall-Transpondermeldungen. Eine ausführliche Dokumentation der Ausstattung der MSG Satelliten findet sich in Schmetz et al. (2002). Meteosat-8 ist seit Ende Januar 2004 im operationellen Betrieb. Für diese Arbeit standen damit acht Jahre (Februar 2004 – Januar 2012) Daten von Meteosat-8 und Meteosat-9 zur Verfügung.

## 2.5 Ableitung des Kondensstreifenbedeckungsgrades aus Meteosat-8/9 Daten

Wie in Abschnitt 1.1 dargestellt, können lineare Kondensstreifen morphologisch mithilfe eines Kondensstreifenerkennungsalgorithmus detektiert werden. Üblicherweise werden derartige Verfahren auf Daten polarumlaufender Satelliten angewandt, da sie durch ihre höhere räumliche Auflösung<sup>6</sup> Kondensstreifen bereits in früheren Entwicklungsstadien detektieren können. Prinzipiell kann das Prinzip der Kondensstreifenerkennung aber auch unter Inkaufnahme einer geringeren Detektionseffizienz<sup>7</sup> auf die räumlich niedriger aufgelösten Daten von SEVIRI angewandt werden (Mannstein et al. 2010, 2012). Als Eingangsgrößen dienen hier, wie in Mannstein et al. (1999), die Helligkeitstemperaturen der Kanäle IR\_108 und IR\_120.

Genaugenommen handelt es sich bei dem Kondensstreifenerkennungsalgorithmus um einen Detektionsalgorithmus für lineare Zirren. Es werden also neben Kondensstreifen auch natürlich gebildete lineare Zirrenstrukturen detektiert. Eine Einbindung von Flugbewegungsdaten, wie sie etwa in Duda et al. (2013) Anwendung findet, die eine weitgehende Elimination falsch erkannter Kondensstreifen erlauben würde, wurde nicht vorgenommen. Hierzu wäre ein homogener, achtjähriger Flugverkehrsdatensatz mit exakten Koordinaten des Flugverkehrs nötig, wie er derzeit nicht zur Verfügung steht. In dieser Arbeit wird der Bedeckungsgrad durch lineare Kondensstreifen (LiCC) aber ohnehin nur zum Konsistenzcheck benutzt. Es ist der große Vorteil der in dieser Arbeit verfolgten Methode, kein Verfahren einsetzen zu müssen, welches ein Linienkriterium nutzt und damit zwangsläufig ältere Entwicklungsstadien ausblendet. Dadurch wird der zeitliche Beobachtungshorizont von flugverkehrsinduzierten Zirren über ihr anfängliches Stadium als linienförmiger Kondensstreifen hinaus erweitert.

---

<sup>6</sup>MODIS besitzt beispielsweise in den Infrarotkanälen eine Auflösung von 1 km.

<sup>7</sup>In Mannstein et al. (2010) wurde bei Anwendung des CDA auf SEVIRI-Daten eine Detektionseffizienz von 19 %, bei Anwendung des CDA auf AVHRR eine Detektionseffizienz von 17 %, jeweils bezogen auf vom Boden aus erkannte lineare Kondensstreifen, festgestellt. Die Repräsentativität dieser Ergebnisse erscheint aber angesichts der großen Unterschiede in der räumlichen Auflösung zweifelhaft.

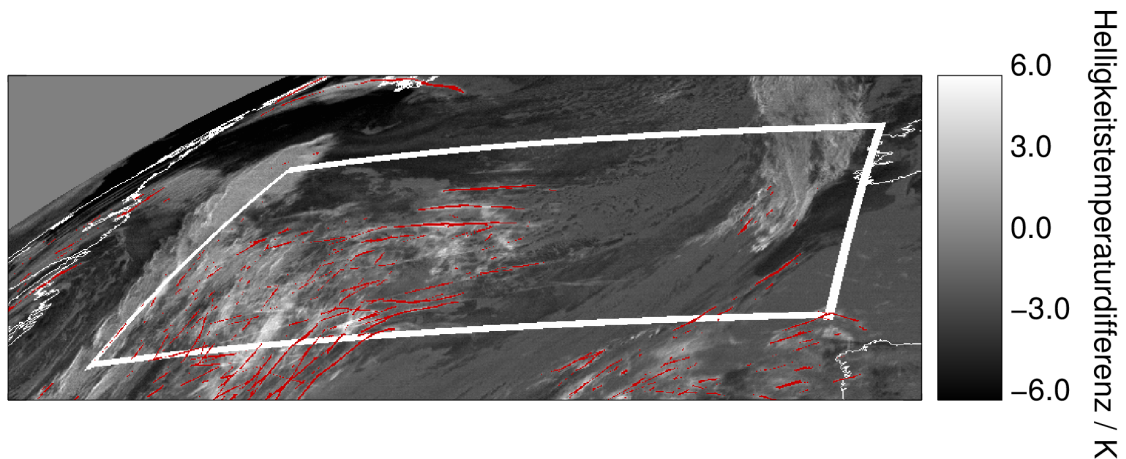


Abbildung 2.7: Resultat des Kondensstreifenerkennungsalgorithmus, beispielhaft für den 26. April 2004, 03:00 UTC. Die rot gekennzeichneten Pixel wurden als linienförmige Struktur detektiert. Im Hintergrund ist die Helligkeitstemperaturdifferenz der Kanäle IR\_108 und IR\_120 dargestellt.

## 2.6 Ableitung des Zirrenbedeckungsgrades aus Meteorosat-8/9 Daten

Zur Ableitung der Zirrenbedeckung aus Satellitendaten wird eine Vielzahl von Verfahren eingesetzt. Auf polarumlaufenden Satelliten liefern insbesondere Sounder wie TOVS (Stubenrauch et al. 2006), HIRS (Wylie et al. 1994, 2005) und SAGE-II (McCormick 1987) dreidimensionale Wolkeninformation, aber auch Lidarinstrumente wie CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) an Bord von CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) sind sensitiv auf Zirren und erlauben die Erkennung von optisch dünnen Zirren (Winker et al. 2009). Auf MSG Satelliten stehen dagegen keine Sounder zur Verfügung<sup>8</sup>. Zur Ableitung der Zirrenbedeckung aus den passiven SEVIRI Kanälen gibt es verschiedene Verfahren. Verfahren, die sowohl solare als auch thermische Kanäle von MSG zur Ableitung einer Wolkenmaske und anschließender Bestimmung von u.a. der Wolkenphase heranziehen (z. B. Derrien und Le Gléau 2005; Bugliaro et al. 2011), nutzen je nach Sonnenstand unterschiedliche Prozessketten zur Analyse. Tagsüber kann prinzipiell infolge verfügbarer Zusatzinformation in solaren Kanälen ein besseres Ergebnis erzielt werden als nachts; jedoch führt die Umschaltung von Tages- auf Nachtalgorithmus zu Sprüngen in der Detektionseffizienz und damit in der Zirrenbedeckung. Da in dieser Arbeit die Tagesgänge der Zirrenbedeckung untersucht werden sollen, stören solche Sprünge massiv

<sup>8</sup>Für MTG ist eine Instrumentierung mit Soundern vorgesehen (Rodriguez et al. 2009).



die Auswertung mittlerer Tagesgänge. Es bietet es sich daher an, auf die Zusatzinformation aus den solaren Kanälen von SEVIRI zu verzichten und nur die thermischen Kanäle, die ganztägig zur Verfügung stehen, zur Zirrendetektion heranzuziehen.

Mit dem Algorithmus MeCiDA (Meteosat Cirrus Detection Algorithm) stand für diese Arbeit ein solches Verfahren zur Verfügung (Krebs et al. 2007). MeCiDA kombiniert sechs verschiedene Zirrentests mit einer logischen OR-Verknüpfung. Im Rahmen dieser Arbeit wurden jedoch Defizite im MeCiDA-Algorithmus identifiziert; insbesondere der Einsatz im Südatlantikgebiet SAR (vgl. Abschnitt 2.2) offenbarte Probleme, denen durch die Entwicklung einer verbesserten Version MeCiDA2 (Ewald et al. 2013) Rechnung getragen wurde. Zur Ableitung der in dieser Arbeit diskutierten Tagesgänge und auch als Eingangsgröße in die Ableitung der langwelligen Strahlungsflussdichte (vgl. 2.7) wurden ausschließlich Daten der Version MeCiDA2 herangezogen.

Die sechs in MeCiDA2 benutzten Zirrentests lassen sich in zwei Gruppen einteilen: Test 1, 2, 3 und 6 sind Tests, die verschiedene Kombinationen der thermischen Kanäle von MSG auf Überschreiten von zirrenspezifischen Schwellwerten abfragen. Die Tests 4 und 5 nutzen hingegen die Inhomogenität, die durch Zirren in die ansonsten sehr glatten Wasserdampfkanäle eingetragen werden (Ewald et al. 2013). Abbildung 2.8 illustriert für eine Einzelszene das Ergebnis der sechs Einzeltests aus MeCiDA2. In der gezeigten nicht repräsentativen Szene trägt Test 4 wenig und Test 5 kaum zum Gesamtergebnis bei. Das Gesamtergebnis ist im unteren Bildabschnitt gezeigt. In der Arbeit wird stets nur dieses Gesamtergebnis analysiert.

MeCiDA2 detektiert Wolken, deren Oberrand aus Eiskristallen besteht. Es werden also nicht nur filigrane Federwolken, als die Zirren nach WMO-Klassifikation definiert sind (WMO 1995, 1987), erfasst, sondern ebenfalls hohe Cumuluswolken, deren Oberrand vereist ist (Ewald et al. 2013), oder ausgedehnte Cirrostratusbewölkung. Nach Krebs et al. (2007) detektiert MeCiDA 50 % aller Zirren bei optischer Dicke von 0,1.

Parallel zu dieser Arbeit wurde zur Ableitung der optischen Dicke von Zirren aus den thermischen Kanälen von SEVIRI mithilfe eines neuronalen Netzes der Algorithmus COCS (Cirrus Optical properties derived from CALIOP and SEVIRI) entwickelt (Kox 2012). Das neuronale Netz wurde mithilfe von aus CALIOP-Daten abgeleiteten optischen Dicken von Zirren trainiert. Ergebnisse dieses Algorithmus werden in der vorliegenden Arbeit nicht genutzt, es sind aber hierzu zukünftige Studien angedacht (vgl. Abschnitt 5.2). In Abschnitt 4.3 werden jedoch die mit MeCiDA2 abgeleiteten Tagesgänge hinsichtlich ihrer Konsistenz zu COCS diskutiert.

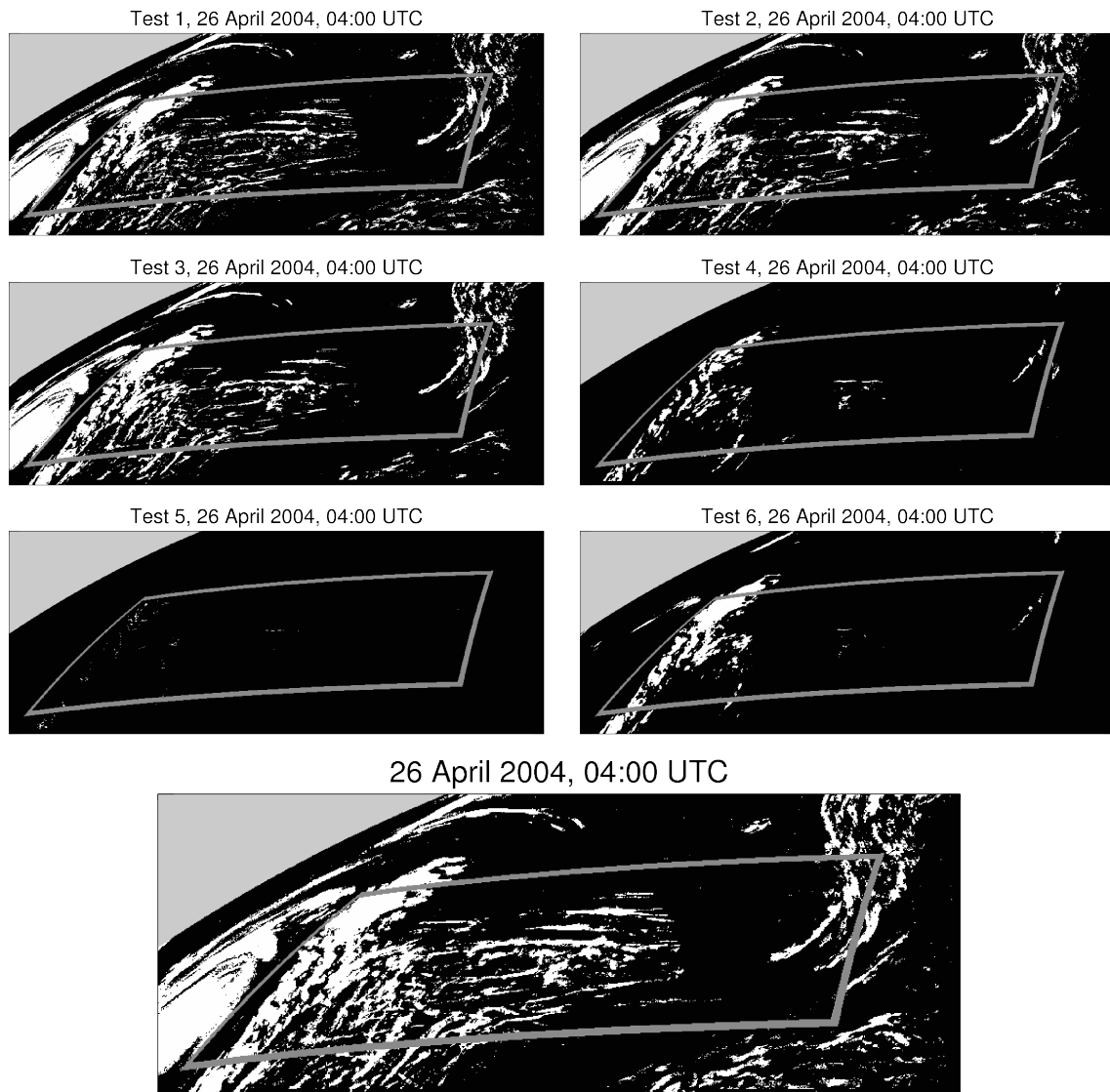


Abbildung 2.8: Ableitung der Zirrenerkennung: MeCiDA2 besteht aus sechs einzelnen Zirrentests (obere sechs Abbildungen), die für jedes Satellitenpixel eine diskrete Zirrusentscheidung (0/1) treffen. Die Einzelergebnisse werden mit einem logischen OR zum Gesamtergebnis (unten) kombiniert.

## 2.7 Ableitung des langwelligen Strahlungsflusses am Oberrand der Atmosphäre aus Meteosat-8/9 Daten

SEVIRI ist ein schmalbandiges Radiometer, das die thermische Strahlung nur in engen Wellenlängenbereichen um die jeweilige zentrale Wellenlänge (vgl. Tab. 2.1) mit unterschiedlicher spektraler Gewichtung (vgl. Abbildung 2.6) erfasst, die zudem zwar teilweise überlappen, aber nicht das gesamte Spektrum abdecken. Es existieren jedoch etablierte Verfahren, die eine Berechnung der breitbandig abgegebenen langwelligen Strahlung auf Basis der sieben<sup>9</sup> thermischen Kanäle erlaubt („narrowband to broadband conversion“, vgl. EUMETSAT (2010)). In dieser Arbeit wird hierfür der Algorithmus RRUMS (Rapid Retrieval of upwelling fluxes from MSG/SEVIRI; Krebs 2006; Vazquez-Navarro et al. 2012) genutzt. OLR wird dabei durch eine Linearkombination der Helligkeitstemperaturen abgeleitet,

$$OLR = \sigma \left( a_0(\theta_{\text{sat}}, c_{\text{MEC}}) + \sum_{k=1}^7 a_k(\theta_{\text{sat}}, c_{\text{MEC}}) T_k \right)^4 \quad (2.5)$$

wobei  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$  die Stefan-Boltzmann Konstante,  $a(\theta_{\text{sat}}, c_{\text{MEC}})$  die vom Satellitenzenitwinkel  $\theta_{\text{sat}}$  und der Zirrenbedeckung  $c_{\text{MEC}}$  abhängigen linearen Gewichtungskoeffizienten und  $T_k$  die Helligkeitstemperatur des jeweiligen Kanals beschreiben. Zur Klassifizierung des betrachteten Pixels in zirrenfrei oder zirrenbedeckt ( $c_{\text{MEC}} = 0$  oder  $1$ ) wird das Resultat des Zirrenerkennungsalgorithmus MeCiDA2 (vgl. Abschnitt 2.6) herangezogen. Durch diese Einbindung des MeCiDA2 Resultats könnten sich Artefakte ergeben. So könnte ein Tagesgang in der Zirrenbedeckung zu einem Tagesgang in den mittleren benutzten Koeffizienten  $a(\theta_{\text{sat}}, c_{\text{MEC}})$  führen und allein dadurch einen entsprechenden Tagesgang in der langwelligen Strahlungsflussdichte verursachen. In Abschnitt 4.5 wird dieser Punkt mit einer Sensitivitätsanalyse adressiert.

Auf MSG befindet sich zwar, wie in Abschnitt 2.4 dargestellt, auch das Breitbandradiometer GERB (Harries et al. 2005). Es misst die gesamte solare und terrestrische Strahlung sowie separat die kurzwellige Strahlung; die terrestrische Strahlungsflussdichte lässt sich durch Differenzbildung dieser beiden Messgrößen ermitteln. Auf den ersten

---

<sup>9</sup>Der oben angesprochene achte Kanal IR\_039 enthält untertags solare Anteile. Diese können zwar teilweise eliminiert werden, der Einsatz zur Ableitung eines Tagesgangs könnte hierdurch aber beeinflusst werden.

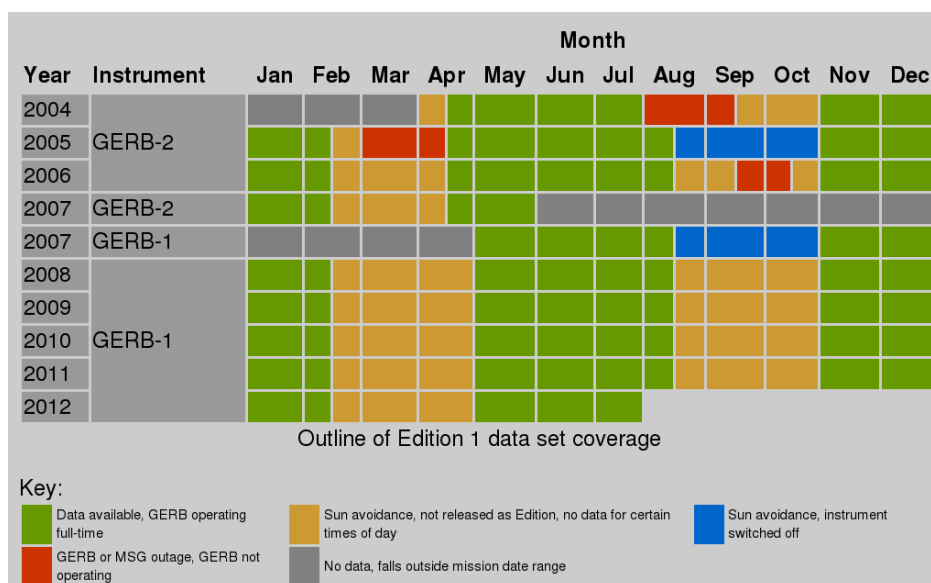


Abbildung 2.9: Datenverfügbarkeit von GERB. Quelle: <http://ggsps.rl.ac.uk/Released.html>, abgerufen am 08.04.2013.

Blick mag es eigenartig erscheinen, mit RRUMS aus schmalbandigen Spektralkanälen die langwellige Strahlung abzuleiten, wenn diese ja direkt als Differenz zweier Messgrößen verfügbar ist. Da die kurzwellige Strahlungsmessung jedoch bei bestimmten Sonne-Erde-Satelliten-Konstellationen, bei denen die Sonne im Scanhintergrundsbereich der GERB-Messung positioniert ist, nicht einsatzfähig ist (vgl. Abb. 2.9), ergeben sich erhebliche Lücken in den GERB Zeitreihen, wodurch die Nutzung der abgeleiteten Tagesgänge schwierig ist. Ferner sind bei GERB Probleme bei der Ableitung langwelliger Strahlungsflüsse für dünne (hier definiert als optische Dicke zwischen 0,5 und 3) hohe Wolken bekannt (Russell 2011)<sup>10</sup>.

In OLR wird methodisch bedingt die gesamte flugverkehrsinduzierte langwellige Strahlungsänderung erfasst. Detektionsschwellen, wie sie bei einem diskreten Zirrenerkennungsschema auftreten, spielen hier keine Rolle; auch inkrementelle flugverkehrsinduzierte Änderungen in den mit SEVIRI bestimmten Helligkeitstemperaturen gehen nach Gleichung 2.5 direkt in OLR ein, ohne dass sie Schwellwerte erreichen müssten, die die Auslösung der Zirrendetektion in MeCiDA2 zur Folge haben. Auch flugverkehrsinduzierte Zirren, die sich in, über oder unter bereits existierender Zirrenbewölkung befinden, führen zu einer Änderung der langwelligen Strahlungsflussdichte und ihre Wirkung fließt in OLR ein, während ihre Wirkung auf die Zirrenbedeckung infolge der bereits bestehender Zirrenbedeckung definitionsgemäß nicht zu einer Erhöhung des

<sup>10</sup>In Russell (2011) findet sich hierzu der Satz „Extreme caution is recommended before using the GERB Edition1 flux data to study cirrus cloud radiative effect in the LW“.

Zirrenbedeckungsgrades führen kann.

## 2.8 Ableitung von Tagesgängen von linearer Kondensstreifenbedeckung, Zirrusbedeckung und des langwelligen Strahlungsflusses

Durch Anwendung der oben eingeführten Algorithmen CDA, MeCiDA2 und RRUMS auf den zur Verfügung stehenden MSG-Datensatz von 02/2004 – 01/2012 lässt sich eine achtjährige Zeitreihe von LiCC, CC und OLR ableiten.

Die gesamten Zeitreihen bestehen jeweils aus 220032 Zeitpunkten, entsprechend den 2922 Tagen mit jeweils 96 Messwerten pro Tag. Die Zeitreihen dieser Daten seien allgemein als  $c(t_i, d, y)$  beschrieben, wobei  $y$  das Jahr (definiert als der Zeitraum 1. Februar – 31. Januar des Folgejahres<sup>11</sup>),  $y = 1, \dots, Y = 8$ ,  $d$  den Tag im Jahr,  $d = 1, \dots, D = 365/366$ , und  $t_i$  den Tageszeitindex darstellt, der sich aus der 15-minütigen Zeitaufösung des Satelliten ergibt,  $t_i = (i - 1) \cdot \Delta t$ ,  $\Delta t = 15 \text{ min}$ ,  $i = 1, 2, \dots, I = 96$ . Der mittlere Tagesgang einer Beobachtungsgröße  $C$  für ein bestimmtes Jahr  $\check{C}(t_i, y)$  ergibt sich dann allgemein als

$$\check{C}(t_i, y) = \langle c(t_i, d, y) \rangle_d := \frac{1}{D} \sum_{d=1}^D c(t_i, d, y). \quad (2.6)$$

Die benutzen eckigen Klammern kennzeichnen hier und im Folgenden die Mittelung über den tiefgestellten Index. Der auf diese Weise abgeleitete Tagesgang beinhaltet die volle interannuale Variabilität, insbesondere gilt im Allgemeinen, dass die Tagesmittelwerte für zwei unterschiedliche Jahre  $y_1, y_2$  unterschiedliche Werte aufweisen,

$$\langle \check{C}(t_i, y_1) \rangle_{t_i} \neq \langle \check{C}(t_i, y_2) \rangle_{t_i}. \quad (2.7)$$

Zur besseren graphischen Darstellung und Vergleichbarkeit der abgeleiteten Tagesgänge wird daher an vielen Stellen der Tagesgang dargestellt, der sich nach Abzug des

---

<sup>11</sup>Diese ungewöhnliche Definition ergibt sich aus der Aufnahme des operationellen Betriebs von Meteosat-8 zum 1. Februar 2004.

Jahresmittelwertes und nach Addition des Acht-Jahre-Mittelwerts ergibt,

$$\begin{aligned}
 C(t_i, y) &= \langle c(t_i, d, y) \rangle_d - \langle c(t_i, d, y) \rangle_{t_i, d} + \langle c(t_i, d, y) \rangle_{t_i, d, y} \\
 &= \frac{1}{D} \sum_{d=1}^D C(t_i, d, y) - \frac{1}{D \times I} \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^I C(t_i, d, y) \\
 &\quad + \frac{1}{Y \times D \times I} \sum_{y=1}^Y \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^I C(t_i, d, y). \tag{2.8}
 \end{aligned}$$

Wie bei den meisten Messgeräten treten jedoch auch bei Meteosat-8/9 vereinzelt Ausfälle oder Störungen auf, die verschiedene Ursachen haben. Zum einen wird SEVIRI planmäßig in regelmäßigen Abständen in den sogenannten „save mode“ geschaltet, um Wartungsarbeiten und Funktionstests durchführen zu können. Aber auch ungeplante Störungen können zu Datenlücken oder fehlerhaften Daten führen. Auch auf der Empfangsseite kann es zu Störungen kommen, die Lücken im Datenarchiv verursachen. Trotz eines gründlichen manuellen Abgleichs des Meteosat-Datenarchivs im Institut für Physik der Atmosphäre (IPA) mit Datenbanken des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums (DFD) sowie mit dem Satellitenarchiv UMARF (Unified Meteorological Archive and Retrieval Facility) von EUMETSAT kann nicht ausgeschlossen werden, dass im Einzelfall Lücken blieben. In dieser Arbeit werden solche Fehlstellen vor der Ableitung des Tagesgangs zeitlich linear interpoliert, wozu der letzte verfügbare Wert vor der Lücke und der erste verfügbare Wert nach der Lücke herangezogen werden.

## 2.9 Konzept eines linearen Responsemodells und Definition der Transformationsfunktionen

Die aus den Satellitendaten abgeleiteten Tagesgänge von LiCC, CC und OLR enthalten sowohl natürliche Beiträge als auch die vom Flugverkehr verursachte Wirkung. Die Separation dieser beiden Bestandteile soll hier nicht auf Basis einer Analyse der jeweiligen individuellen Satellitenszene, sondern auf statistischem Weg erfolgen. Damit unterscheidet sich dieser Ansatz von Verfahren, die darauf ausgerichtet sind, vom Flugverkehr verursachte (linienförmige) Zirren morphologisch zu detektieren und die so abgeleitete Bedeckung entweder direkt aufzusummieren (vgl. Abschnitt 2.5) oder über begrenzte Zeit anhand abgeschwächter Linienkriterien zu verfolgen und aufzusummieren (Vazquez-Navarro et al. 2010). Um den in den Tagesgängen enthaltenen Flugverkehrseffekt isolieren zu können, wird ein einfaches lineares Responsemodell entwickelt.

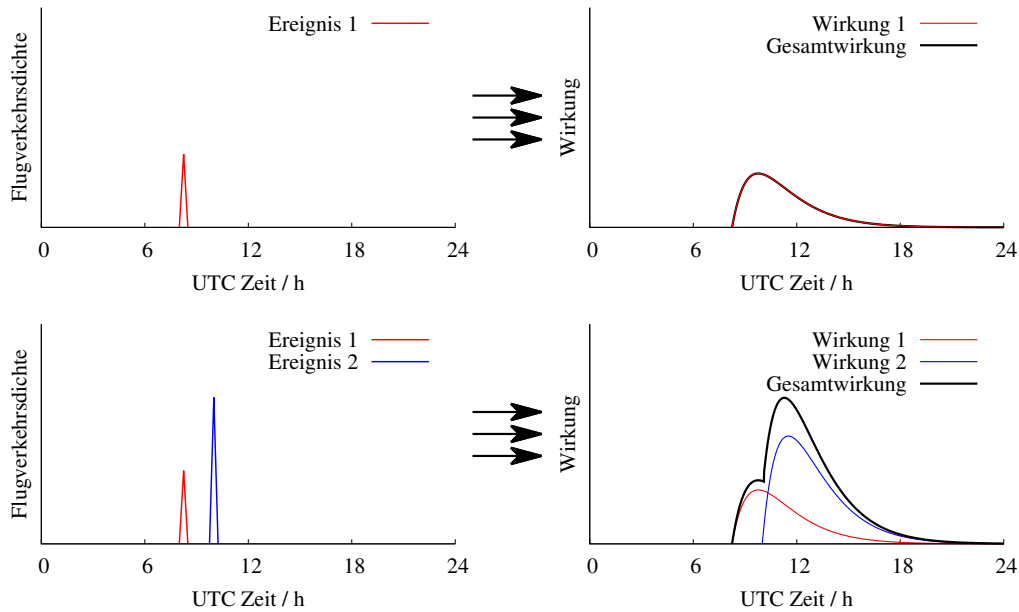


Abbildung 2.10: Symbolische Darstellung des linearen Responsemodells. Oben: Eine periodisch auftretende Flugverkehrsichte (z. B. täglich um 8:00 UTC, links oben) führt im statistischen Mittel betrachtet zu einer periodisch auftretenden Wirkung (rechts oben). Die Wirkung kann verschiedene Variablen widerspiegeln, etwa den flugverkehrsinduzierten Zirrenbedeckungsgrad oder eine Veränderung der ausgehenden langwelligen Strahlungsflussdichte. Die Zeitskala und Amplitude der Wirkung ist hier symbolisch zu verstehen. Die Zeiteinteilung auf der x-Achse soll lediglich die Periodizität der Ursache und der Wirkung auf der Tagesskala betonen. Unten: Mehrere periodisch auftretende Flugverkehrereignisse überlagern sich in dem hier verfolgten Ansatz linear in ihrer Wirkung (Superpositionsprinzip); Sättigungseffekte werden hierbei nicht aufgelöst.

Im Folgenden wird das Modell zur besseren Lesbarkeit nur für die Zirrenbedeckung erläutert. In völliger Analogie wird die Methode jedoch in dieser Arbeit auch auf den diagnostizierten Bedeckungsgrad linearer Kondensstreifen sowie die langwellige Strahlungsflussdichte angewandt.

Ein Flugverkehrereignis, das zum Zeitpunkt  $\hat{t}$  in einem Beobachtungsgebiet stattfindet, kann im Einzelfall je nach den aktuell herrschenden atmosphärischen Bedingungen eine höchst variable Wirkung auf die Zirrenbedeckung im Beobachtungsgebiet haben. So kann sich in einem wolkenfreien, eisübersättigten Gebiet mit erfülltem Schmidt-Appleman-Kriterium ein persistenter Kondensstreifen bilden, sich ausbreiten und so längere Zeit die Zirrenbedeckung im Gebiet erhöhen. Die Wirkung kann jedoch auch verschwindend gering sein, falls sich infolge der atmosphärischen Umgebungsbedingungen kein Kondensstreifen bildet, oder sich nur lokal hinter dem Flugzeug ein nicht-persistenter Kondensstreifen bildet, der sich nach wenigen Sekunden oder Minuten auf-

gelöst hat. Die Auswirkung auf die Zirrenbedeckung ist auch dann gering, wenn sich ein persistenter Kondensstreifen in, über oder unter einer bereits existierenden Zirrenwolke bildet<sup>12</sup>. Es ist auch denkbar, dass die Wirkung anfangs maskiert wird und erst zu einem späteren Zeitpunkt, lange nach der Entstehung des Kondensstreifens eintritt, wenn sich beispielsweise ein anfangs darüberliegender Zirkus, der den betrachteten Kondensstreifen für die Satellitenbeobachtung maskiert hat, auflöst. Auch der gegenteilige Effekt, eine spätere Maskierung eines Kondensstreifens z. B. durch einen sich über oder unter dem Kondensstreifen bildenden Zirkus oder einen durch Advektion verlagerten Zirkus ist denkbar. Daneben ist auch ein in der Literatur als „soot-cirrus“ postulierter Effekt (Lee et al. 2010), nach dem die vom Flugzeug emittierten Partikel, die entweder nicht zur Kondensstreifenbildung beigetragen haben oder die nach Auflösung eines initial gebildeten Kondensstreifens nach Sedimentation und/oder Verdunstung wieder in die Atmosphäre freigesetzt wurden, zur Zirrenbildung beitragen, anzuführen. Neben diesen physikalischen Prozessen kann aber auch der Austritt der flugverkehrsinduzierten Zirrenbedeckung durch Advektion aus dem Beobachtungsgebiet den Wirkungszeitraum beenden.

Diese nicht vollständige Liste von möglichen zeitlichen Verläufen der Wirkung eines Flugverkehrsereignisses auf die Zirrenbedeckung, die zudem, beispielsweise infolge verschieden starker Eisübersättigung, verschiedener Umgebungstemperaturen oder variierender Windscherung, in ihrer Geschwindigkeit und Amplitude variieren können, sollen im Folgenden in ihrem statistischen Verhalten, das im Mittel über viele Flüge verschiedener Flugzeuge der typischen Flugzeugflotte unter den verschiedensten atmosphärischen Rahmenbedingungen zu beobachten ist, subsumiert werden (vgl. Abbildung 2.10). Dazu wird die im Folgenden als „Transformationsfunktion“ bezeichnete Funktion  $r(t_i - \hat{t})$  eingeführt. Sie beschreibt den zeitlichen Verlauf der Wirkung eines Flugverkehrsereignisses als Funktion der Zeit, die seit der Emission verstrichen ist. Diese Zeit ergibt sich aus der Differenz zwischen Beobachtungszeit  $t_i$  und der Emissionszeit  $\hat{t}$ . Die Schreibweise  $r(t_i - \hat{t})$  verdeutlicht, dass die Transformationsfunktion nur von der Zeitdifferenz, nicht aber von der absoluten Zeit abhängt. Schwankungen während eines Tages oder auch eines Jahres werden insoweit nicht explizit aufgelöst, sondern fließen mit ihrem Mittelwert in die Funktion  $r(t_i - \hat{t})$  ein. Aus Kausalitätsgründen gilt zwingend

$$r(t_i - \hat{t}) \equiv 0 \text{ für } t_i < \hat{t}. \quad (2.9)$$

---

<sup>12</sup>Dieser Effekt trifft nur für die Zirrenbedeckung aufgrund ihrer Definition zu. Bei OLR kann sich in der beschriebenen Situation durchaus eine Veränderung ergeben.



Aus Stetigkeitsgründen gilt dann auch

$$\lim_{(t_i - \hat{t}) \rightarrow 0} r(t_i - \hat{t}) = 0. \quad (2.10)$$

Aus der endlichen Lebensdauer von AIC folgt ferner

$$\lim_{t_i - \hat{t} \rightarrow \infty} r(t_i - \hat{t}) = 0. \quad (2.11)$$

Aus diesen Randbedingungen lässt sich für den Fall, dass die Funktion nur ein Maximum besitzt, folgern, dass  $r(t_i - \hat{t})$  zunächst, beginnend mit dem Wert 0 für  $t_i - \hat{t} = 0$ , ansteigt, zu einem Zeitpunkt  $t_{\max}$  ihren Maximalwert annimmt und danach entsprechend Gl. 2.11 wieder abnimmt. Hierzu werden folgende Transformationsfunktionen  $r_i(t_i - \hat{t})$  (vgl. Abb. 2.11) mit jeweils unterschiedlichen freien Parametern untersucht:

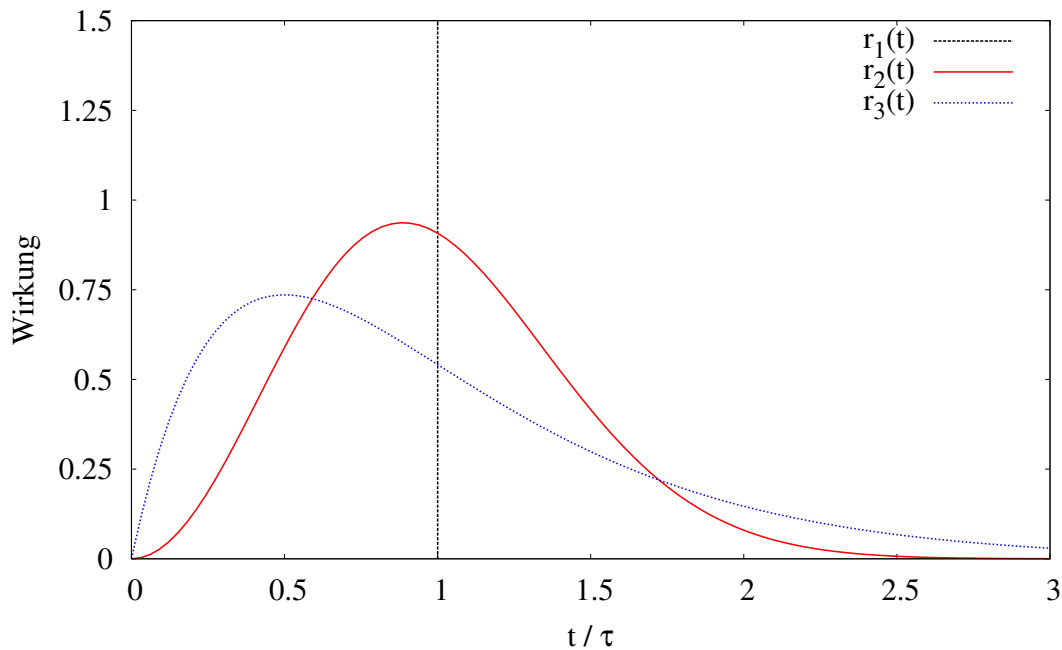


Abbildung 2.11: Die drei betrachteten Transformationsfunktionen  $r_1$ ,  $r_2$  und  $r_3$ , dargestellt als Funktion von  $\frac{t}{\tau}$ .

- Transformationsfunktion  $r_1$

$$r_1(t) = s \cdot \delta(t - \tau), \text{ wobei } \delta(t) = 0 \text{ für } t \neq 0, \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (2.12)$$

Die einfachste, wengleich auch wenig realistische Annahme für eine Transforma-

tionsfunktion ist eine Deltafunktion<sup>13</sup>. Physikalisch bildet sie die Wirkung eines Flugverkehrsereignisses zum Zeitpunkt  $\hat{t}$  auf einen einzigen Zeitpunkt  $t_i$  ab, der durch  $t_i - \hat{t} = \tau$  definiert ist.

Deltafunktionen werden häufig in idealisierten Zusammenhängen benutzt, beispielsweise für die Ladungsverteilung einer Punktladung in der Elektrostatik. Sie erweist sich in dem hier betrachteten Kontext als nützlich, da sie eine Untergrenze der minimalen flugverkehrsinduzierten Wirkung abschätzen lässt. Hierauf wird in Abschnitt 3.7 näher eingegangen.

- Transformationsfunktion  $r_2$

$$r_2(t) = \begin{cases} (32/(\pi^2 \tau))(t/\tau)^2 \exp(-(4/\pi)(t/\tau)^2), & \text{falls } t \geq 0 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.13)$$

Die Funktion beschreibt, bezogen auf den Parameter  $\tau$ , einen raschen Anstieg der Wirkung. Das Maximum wird bei  $t = 0,5 \tau$  erreicht.

- Transformationsfunktion  $r_3$

$$r_3(t) = \begin{cases} (4 t/\tau^2) \exp(-2t/\tau), & \text{falls } t \geq 0 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.14)$$

Die Funktion steigt zunächst, in Zeitskalen von  $\tau$  betrachtet, langsamer an als  $r_2$ . Das Maximum wird erst für  $t = 0,9 \tau$  erreicht. Die Wirkung klingt hier etwas schneller ab, für Zeiten  $t = 2 \tau$  wird im Vergleich zu  $r_2$  etwa nur noch die halbe Wirkung erreicht.

Die Vorfaktoren sind in allen Fällen so gewählt, dass das Integral  $\int_{-\infty}^{\infty} r(t) dt$  auf den Wert 1 normiert ist.

Der Parameter  $\tau$  erfüllt in den Gleichungen unterschiedliche Funktionen. Bei der Transformationsfunktion  $r_1$  spiegelt er die Verzögerungszeit zwischen Ursache und Wirkung wieder. Bei den Transformationsfunktionen  $r_2$  und  $r_3$  wird die maximale Wirkung bei  $t = 0,9 \cdot \tau$  für  $r_2$  und  $t = 0,5 \cdot \tau$  für  $r_3$  erreicht. Trotz dieser unterschiedlichen Bedeutung, die im Zusammenhang mit der Diskussion der Wirkungsentfaltungsdauer im Abschnitt 4.7 diskutiert wird, wird der Parameter  $\tau$  in der Arbeit einheitlich als Verzögerungszeit bezeichnet, da er die Skala der Zeitverzögerung zwischen Ursache und

---

<sup>13</sup>Mathematisch ist die Deltafunktion keine Funktion, sondern eine Distribution. Diese Unterscheidung wird hier aber nicht näher diskutiert, zumal beim folgenden Übergang von der Integraldarstellung zur Summendarstellung die Deltafunktion zu einer echten mathematischen Funktion wird.

Wirkung definiert, auch wenn je nach betrachteter Transformationsfunktion seine Bedeutung variiert.

Mithilfe des Responsemodells lässt sich die zu einem bestimmten Beobachtungszeitpunkt  $t_i$  vorhandene, vom Flugverkehr induzierte Wirkung  $C_A(t_i)$  beschreiben als die über die Vergangenheit integrierte, mit der jeweils vorliegenden Flugverkehrsdichte gewichtete Transformationsfunktion,

$$C_A(t_i) = A \int_{-\infty}^{t_i} a(\hat{t}) r(t_i - \hat{t}) d\hat{t}. \quad (2.15)$$

Der Parameter A erfüllt die Funktion eines Sensitivitätsparameters, er verknüpft das rechts stehende Integral, das die Einheit einer Flugverkehrsdichte trägt, mit der Einheit der Wirkung, die je nach untersuchtem Parameter entweder dimensionslos ist (bei Betrachtung von LiCC oder CC) oder die Einheit W/m<sup>2</sup> trägt (bei Betrachtung von OLR); A besitzt also allgemein die Einheit [Wirkung] / [Flugverkehrsdichte].

Die flugverkehrsinduzierte Wirkung wird in dieser Arbeit auf Basis von Tagesgangvariationen untersucht. Wirkungsanteile, die über einen Tag hinaus wirken, können systematisch bedingt in diesem Ansatz nicht vom natürlichen Hintergrund getrennt werden. Die Beschränkung auf ein Alter von 24 Stunden erscheint jedoch im Hinblick auf Kondensstreifen-Zirren legitim. In der Regel existieren sie kürzer als 24 Stunden, von Extremfällen abgesehen. Aber auch wenn flugverkehrsinduzierte Zirrenbedeckung, die im Beobachtungsgebiet gebildet wurde, länger als 24 Stunden existieren würde, so hätte diese Zirrenbedeckung mit großer Wahrscheinlichkeit das Beobachtungsgebiet in dieser Zeitspanne verlassen. Gleichung 2.15 liest sich dann unter der entsprechenden Annahme  $r(t) \ll 1$  für  $t > 24$  h als

$$C_A(t_i) \approx A \int_{t_i-24h}^{t_i} a(\hat{t}) r(t_i - \hat{t}) d\hat{t}. \quad (2.16)$$

In Gleichung 2.16 tritt  $\hat{t}$  als Argument in die Flugverkehrsdichte  $a(\hat{t})$  sowie in der Transformationsfunktion  $r(t_i - \hat{t})$  als kontinuierliche Größe auf, über die aufintegriert wird. Jedoch sind sowohl Daten der Flugverkehrsdichte als auch die Satellitenbeobachtungen, die später mit  $C_A(t_i)$  verknüpft werden, nicht als kontinuierliche Messgrößen, sondern nur in diskreter zeitlicher Auflösung von 15 Minuten verfügbar. Daher wird die Gleichung 2.16 von der Integraldarstellung in die entsprechende Summendarstellung

zurückgeführt,

$$C_A(t_i) \approx A \sum_{k=1}^{96} a(t_i - 24 \text{ h} + k \cdot \Delta t) r(24 \text{ h} - k \cdot \Delta t). \quad (2.17)$$

Der Modell-Tagesgang der gesamten Zirrenbedeckung  $C_m(t_i)$  kann als Summe eines nicht vom Flugverkehr verursachten Tagesgang  $B(t_i)$  und des oben dargestellten, vom Flugverkehr verursachten Beitrag  $C_A(t_i)$  beschrieben werden.  $B(t_i)$  kann wiederum aufgespalten werden in einen tageszeitunabhängigen Mittelwert  $B_0$  und die tageszeitabhängige Variation um diesen Mittelwert  $b(t_i)$ ,

$$C_m(t_i) = B(t_i) + C_A(t_i) = B_0 + b(t_i) + C_A(t_i) \quad (2.18)$$

Da  $B_0$  den Mittelwert des Tagesgangs der natürlichen Zirrenbedeckung darstellt, gilt

$$\sum_{t_i=1}^{24} b(t_i) = 0. \quad (2.19)$$

In den Transformationsfunktionen ist jeweils der freie Parameter der Verzögerungszeit  $\tau$  enthalten. Dieser wird, zusammen mit den freien Parametern  $B_0$  und  $A$  durch einen nichtlinearen least-square-fit des Modelltagesgangs  $C_m(t_i)$  an den beobachteten Tagesgang abgeleitet. Dafür wird die IDL Routine CURVEFIT benutzt (vgl. Handbuch IDL 7.0), die zugrundeliegende Methode ist in Marquardt (1963) beschrieben.

In diesem Ansatz sind einige Annahmen enthalten:

- Die Transformationsfunktion ist nach obigem Ausdruck keine Funktion der Gebietsgröße. Je kleiner das Beobachtungsgebiet, in dem die Auswirkung erfasst wird, dimensioniert ist, desto wahrscheinlicher ist jedoch, dass infolge von Advektion die Wirkung aus dem Gebiet transportiert wird. Die Sensitivität der Transformationsfunktion bezüglich der Gebietsgröße nimmt dann ab, wenn das Gebiet groß genug gewählt ist, so dass die typischen physikalischen Prozesse innerhalb des Gebietes ablaufen, insbesondere die typischen Zeitskalen der Auflösung von Kondensstreifen unter der typischen Zeitskala der Advektion aus dem Gebiet liegt. Das Untersuchungsgebiet sollte also entsprechend großzügig gewählt sein.
- Die Transformationsfunktion hängt nur von der Zeitdifferenz zwischen Emission und Beobachtung ab, nicht jedoch von der Tageszeit. Eventuell vorhandene tageszeitabhängige Variationen, z. B. infolge eines Tagesgangs im Auftreten eis-

übersättigter Gebiete, werden nicht aufgelöst und gehen in ihrem Mittel in die Transformationsfunktion ein. Diese Annahme erscheint vertretbar; eine Analyse der optischen Dicke und der Effektivradien detektierter linearer Kondensstreifen zeigte keinen Tagesgang dieser Größen (Bedka et al. 2013). Ein solcher Tagesgang wäre aber zu erwarten, wenn beispielsweise die Grade der Eisübersättigung in eisübersättigten Regionen einen Tagesgang aufweisen würde.

- Die Transformationsfunktion ist keine Funktion des Ortes. Regionale Unterschiede z. B. im Auftreten von eisübersättigten Regionen im Beobachtungsgebiet werden nicht aufgelöst, sondern in ihrem Mittel über das Beobachtungsgebiet betrachtet.
- Der Faktor  $A$  wird als Konstante betrachtet, welcher nicht vom Betrag des Integrals  $\int_{-\infty}^{t_i} a(\hat{t}) r(t_i - \hat{t}) d\hat{t}$  abhängt. Insofern ist die vom Modell beschriebene Wirkung proportional zum Flugverkehrsaufkommen  $a(\hat{t})$ ; eine Verdopplung des Flugverkehrsaufkommens fließt daher linear in die Wirkung ein. Bei größerem Flugverkehrsaufkommen könnten jedoch Sättigungseffekte auftreten. Sättigungseffekte fließen zwar durch den Fit in den Parameter  $A$  ein, es wird jedoch eine Tageszeitunabhängigkeit der Sättigung angenommen.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass das in Gleichung 2.8 eingeführte Verfahren, bei dem sich der Tagesgang nach Abzug des Jahresmittelwertes und nach Addition des Acht-Jahre-Mittelwertes ergibt, bei der Anwendung der oben definierten Transformationsfunktion keine Auswirkungen auf die abgeleiteten Mittelwerte der flugverkehrsinduzierten Wirkung sowie der abgeleiteten Verzögerungszeit  $\tau$  besitzt, nur der in die weitere Analyse nicht einfließende Hintergrundparameter  $B_0$  sowie die Standardabweichungen der flugverkehrsinduzierten Wirkung sowie der abgeleiteten Wirkungsdauer werden dadurch beeinflusst. Insbesondere bleiben die aus der jeweiligen Transformationsfunktion ermittelten Mittelwerte für die vom Flugverkehr verursachten Beiträge zu LiCC, CC und OLR sowie die durch den Fit bestimmten Werte von  $\tau$  bei Anwendung von Gl. 2.8 anstelle von Gl. 2.6 unverändert.

## 2.10 Annahme des natürlichen Tagesgang von linearer Kondensstreifenbedeckung, Zirrusbedeckung und des langwelligen Strahlungsflusses

Um die in Abschnitt 2.9 dargestellte Methode anwenden und den zugehörigen Fit durchführen zu können, muss die dort definierte tageszeitabhängige Variation  $b(t_i)$  des natürlichen Tagesgangs der jeweils betrachteten Größe (LiCC, CC, OLR) im betrachteten Gebiet bekannt sein. Die Tagesgänge dieser Größen lassen sich jedoch nicht direkt aus Beobachtungen ableiten. Hierzu wären langfristige Messungen z. B. der Zirrenbedeckung im Nordatlantik bei abgeschaltetem Flugverkehr nötig. Zwar gab es in der Vergangenheit kurze Phasen, in denen der Flugverkehr im Nordatlantik gering war, z. B. infolge von Luftraumsperrungen bei Vulkanausbrüchen. Jedoch sind diese Zeitspannen zu kurz, um einen statistisch repräsentativen Tagesgang ableiten zu können<sup>14</sup>. Mangels Beobachtungsdaten müssen also andere Informationsquellen oder Annahmen für die Variation des natürlichen Hintergrundes  $b(t_i)$  genutzt werden. Hierfür werden je nach betrachtetem Parameter verschiedene Annahmen oder Datenquellen herangezogen, die in den folgenden Abschnitten diskutiert werden.

### 2.10.1 Natürlicher Tagesgang des Bedeckungsgrades linienförmiger Kondensstreifen

Linienförmige Kondensstreifen entstehen infolge von Flugverkehr bei geeigneten atmosphärischen Randbedingungen. Insofern ist in einem Gebiet, in dem kein Flugverkehr stattfindet und keine Kondensstreifen durch Advektion eingetragen werden, der Bedeckungsgrad linienförmiger Kondensstreifen per Definition identisch zu null. Es müsste also im flugverkehrsfreien Fall  $b(t_i) \equiv 0$  sowie  $B_0 \equiv 0$  gelten. Allerdings werden vom linearen Kondensstreifenerkennungsalgorithmus nicht nur flugverkehrsinduzierte linienförmige Kondensstreifen erfasst, sondern fälschlicherweise auch ohne Flugverkehrseinfluss auf natürlichem Weg gebildete linienförmige Zirrenstrukturen als Kondensstreifen klassifiziert (vgl. Abschnitt 2.5 und Abbildung 2.7). Aus diesem Grund kann nicht davon ausgegangen werden, dass alle identifizierten Objekte vom Flugverkehr verursacht wurden. Daher gilt selbst im Falle eines flugverkehrsfreien Untersuchungsgebietes  $B_0 > 0$ . Bei der Anwendung der oben dargestellten Methode wird bei der Analyse  $B_0$

---

<sup>14</sup>Im Falle eines Vulkanausbruchs wäre zudem zu prüfen, ob nicht die Präsenz von Vulkanasche ihrerseits die Tagesgänge der betrachteten Größen modifiziert.

als freier Fitparameter behandelt, während angenommen wird, dass  $b(t_i) = 0$  gilt. Es ist also ein zeitlich konstanter Beitrag natürlicher linienförmiger Zirren zum CDA Resultat zugelassen, allerdings wird angenommen, dass das Aufkommen natürlicher linienförmiger Zirren in NAR keine tageszeitliche Variation zeigt. Die im Folgenden dargestellten alternativen Annahmen des natürlichen Tagesgangs der Zirrenbedeckung bzw. der ausgehenden langwelligen Strahlung werden hier nicht verfolgt. Eine Nutzung von Daten eines numerischen Wettervorhersagemodells scheidet in diesem Fall ohnehin aus.

### 2.10.2 Natürlicher Tagesgang der Zirrenbedeckung

Auch bei der Zirrenbedeckung gilt selbstverständlich  $B_0 > 0$ . Die natürliche Zirrenbedeckung dominiert die gesamte Zirrenbedeckung im Untersuchungsgebiet,

$$B_0 + \langle b(t_i) \rangle_{t_i} \gg \langle C_A(t_i) \rangle_{t_i}. \quad (2.20)$$

Für die natürliche Variation  $b(t_i)$  werden alternativ zueinander drei verschiedene Annahmen untersucht.

1. vernachlässigbar kleiner Tagesgang:  $b(t_i) = 0$

Diese erste Annahme unterstellt, dass es im Beobachtungsgebiet keinen nennenswerten (im Sinne von  $\langle |b(t_i)| \rangle_{t_i} \ll \langle C_A(t_i) \rangle_{t_i}$ ) Tagesgang der Zirrenbedeckung gibt. Auf Landoberflächen wird durch Sonneneinstrahlung die Erdoberfläche und mit ihr die Grenzschicht im Tagesverlauf erwärmt. Infolge dieser Erwärmung wird Konvektion ausgelöst und angetrieben. Je nach den aktuellen atmosphärischen Rahmenbedingungen, insbesondere der vertikalen Schichtung, führt Konvektion zu Wolkenbildung, die sich auch in größere Höhen erstrecken kann und dort zu Zirrenbildung führt. Daher gibt es über Land eine Zunahme der Zirrenbedeckung im Tagesverlauf (z. B. Mannstein et al. 2010).

Das Untersuchungsgebiet NAR liegt jedoch über Wasser. Wasser hat eine hohe spezifische Wärmekapazität, und die Erwärmung erstreckt sich auf ein größeres Volumen als an Land. Daher ändert sich die Meeresoberflächentemperatur im Tagesverlauf kaum, es kommt nicht zum Antrieb der Konvektion. Daher wird als erste Annahme des natürlichen Tagesgangs der Zirrenbedeckung im Untersuchungsgebiet eine konstanter Wert angenommen, womit sich  $b(t_i) = 0$  ergibt.

2. Tagesgang äquivalent zu Referenzregion im Südatlantik:  $b(t_i) = b_{\text{SAR}}(t_i)$

Ein Tagesgang ist (definitionsgemäß) angetrieben durch die variable solare Einstrahlung im Tagesverlauf. Diese ist im Jahresmittel weitgehend symmetrisch zum Äquator. Es bietet sich daher an, das am Äquator gespiegelte Gebiet SAR (vgl. 2.2) im Südatlantik, das durch die entsprechenden Breitengradbereiche eingegrenzt ist, ebenfalls komplett über Wasser liegt und zudem keinen nennenswerten Flugverkehr aufweist, als Referenzgebiet zu betrachten. Trotz der ähnlichen mittleren solaren Einstrahlung ist die Annahme der Symmetrie jedoch begrenzt. Die verschiedene Landmassenverteilung auf der Nord- und Südhemisphäre, Temperaturunterschiede in der UTLS Region, verschiedene Meeresströmungen und damit Meeresoberflächentemperaturen und die unterschiedliche Lage der Jetstreams beschränken die Vergleichbarkeit der beiden Gebiete.

3. Tagesgang aus Wettervorhersagemodell:  $b(t_i) = b_{\text{HCC}}(t_i)$

Numerische Wettervorhersagemodelle wie das ECMWF-IFS (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – Integrated Forecast System) berechnen neben vielen anderen Größen auch den Bedeckungsgrad hoher Wolken. Beim ECMWF-IFS wird diese dimensionslose Größe unter dem Variablennamen HCC (high cloud cover, Codenummer 188) geführt. Eine Darstellung der benutzten ECMWF-Daten sowie die zur Ableitung eines Tagesgangs genutzte Methode findet sich im Abschnitt 2.11.

Diese drei Annahmen werden jeweils in Kombination mit den drei verschiedenen Transformationsfunktionen analysiert, es ergeben sich somit neun verschiedene Kombinationen aus Transformationsfunktion und angenommenem natürlichen Tagesgang.

### 2.10.3 Natürlicher Tagesgang der langwelligen Strahlungsflussdichte

Erste Analysen zeigten, dass die oben für die Zirrenbedeckung betrachtete Annahme  $b(t_i) = 0$  als Annahme für den natürlichen Tagesgang von OLR nicht in Betracht kommt. Der Tagesgang der ausgehenden langwelligen Strahlung lässt sich also nicht sinnvoll – anders als bei der Zirrenbedeckung – als Summe eines konstanten Sockelwertes und einer flugverkehrsinduzierten Modifikation erklären. Die solare Einstrahlung führt hier zu einer leichten Erwärmung der Erdoberfläche und der Atmosphäre, die



ihrerseits zu einem natürlichen Tagesgang in der Emission im terrestrischen Spektralbereich führt. Es werden hier folgende zwei Annahmen untersucht:

1. Tagesgang äquivalent zu Referenzregion im Südatlantik:  $b(t_i) = b_{\text{SAR}}(t_i)$

Analog zu Abschnitt 2.10.2 kann auch hier die aus der SAR-Region abgeleitete Variation der ausgehenden langwelligen Strahlungsflussdichte herangezogen werden.

2. Tagesgang aus Wettervorhersagemodell:  $b(t_i) = b_{\text{TTR}}(t_i)$

Wiederum analog zum Fall der Zirrenbedeckung lassen sich auch die ausgehende langwellige Strahlung und ihre tageszeitliche Variation aus einem numerischen Wettervorhersagemodell extrahieren. Im oben angesprochenen ECMWF-IFS wird dafür die Variable TTR (Top Thermal Radiation, Codenummer 179) gerechnet und archiviert.

Diese beiden Annahmen ergeben in Kombination mit den drei verschiedenen Transformationsfunktionen (vgl. Abschnitt 2.9) sechs verschiedene Kombinationsmöglichkeiten, deren Ergebnisse im Abschnitt 3.7 vorgestellt werden.

## 2.11 Bedeckungsgrad hoher Wolken und ausgehende langwellige Strahlung im ECMWF-Modell

Im Abschnitt 2.10 wurden verschiedene Annahmen eines natürlichen, vom Flugverkehr unbeeinflussten Tagesgangs der Beobachtungsgrößen LiCC, CC und OLR in NAR getroffen. Für CC und OLR bezog sich eine Annahme dabei auf die Verwendung von Daten eines numerischen Wettervorhersagemodells. Zur klareren Unterscheidung werden in dieser Arbeit die aus dem Modell entnommenen Felder des Bedeckungsgrades hoher Wolken mit der ECMWF-konsistenten Bezeichnung „HCC“ und die Felder der langwelligen Strahlung mit „TTR“ bezeichnet. Die unterschiedliche Nomenklatur im Vergleich zu den aus Satellitendaten abgeleiteten Messgrößen (CC, OLR) soll auf die systematischen Unterschiede der beiden Größen hinweisen. Während CC aus dem Zirrendetektionsalgorithmus MeCiDA2 abgeleitet wird, ist HCC im ECMWF definiert als der Bedeckungsgrad durch Wolken, die oberhalb der 450 hPa Schicht des Modells liegen<sup>15</sup>; es muss sich nach der Definition nicht zwangsläufig um Eiswolken handeln.

---

<sup>15</sup>Quelle: [http://www.ecmwf.int/products/data/archive/data\\_faq.html#clouddefinitions](http://www.ecmwf.int/products/data/archive/data_faq.html#clouddefinitions)

Bei der ausgehenden langwelligen Strahlung ergeben sich Unterschiede durch die unten näher erläuterte Akkumulation der Felder über einen Vorhersagezeitschritt von 3 Stunden.

Für die vorliegende Arbeit werden Vorhersagedaten des ECMWF-IFS benutzt. Die-

Datum	ECMWF-IFS Modellversion
19. Jun 12	IFS Cycle 38r1
15. Nov 11	IFS Cycle 37r3
18. Mai 11	IFS Cycle 37r2
09. Nov 10	IFS Cycle 36r4
22. Jun 10	IFS Cycle 36r2
26. Jan 10	IFS Cycle 36r1
13. Okt 09	IFS Cycle 35r3
08. Sep 09	IFS Cycle 35r3
10. Mär 09	IFS Cycle 35r2
30. Sep 08	IFS Cycle 35r1/33r2
03. Jun 08	IFS Cycle 33r1
11. Mär 08	IFS Cycle 32r3
06. Nov 07	IFS Cycle 32r3
05. Jun 07	IFS Cycle 32r2
12. Sep 06	IFS Cycle 31r1
01. Feb 06	IFS Cycle 30r1
28. Jun 05	IFS Cycle 29r2
05. Apr 05	IFS Cycle 29r1
28. Sep 04	IFS Cycle 28r3

Tabelle 2.2: Liste der am ECMWF operationell betriebenen Modellversion des IFS. Die erste Spalte gibt das Datum an, ab dem die in der zweiten Spalte genannte IFS-Version betrieben wurde. Auszug aus [http://www.ecmwf.int/products/data/technical/model\\_id/index.html](http://www.ecmwf.int/products/data/technical/model_id/index.html).

ses Modell gilt als eines der weltweit besten globalen Wettervorhersagemodelle. Für die Vergangenheit sind die Vorhersagedaten in einer Vielzahl von Modellversionen und Modellvarianten archiviert und konnten für diese Arbeit benutzt werden. Das ECMWF-IFS wird beständig weiterentwickelt, und in der Regel mehrmals jährlich auf eine verbesserte Modellversion umgestellt (vgl. Tabelle 2.2; Modellbeschreibungen für einige Modellversionen sind unter <http://www.ecmwf.int/research/ifsdocs/> verfügbar). Betrachtet man also Daten längerer Zeiträume aus dem Archiv der operationellen Vorhersageläufe, so ändert sich in der Zeitreihe regelmäßig die zugrundeliegende Modellphysik, oder auch die spektrale Auflösung des Modells. Um größere Zeiträume mit einem homogenen zugrundeliegenden Modell und einer identischen Modellauflösung

analysieren zu können, wurden neben dem operationellen Archiv auch Reanalyseläufe durchgeführt und archiviert (ERA-40, Uppala et al. (2005), ERA-INTERIM, Dee et al. (2011)).

Die aus den Modellen extrahierten Tagesgänge sollen in dieser Arbeit den natürlichen, nicht vom Flugverkehr beeinflussten Tagesgang repräsentieren. Wettervorhersagemodelle wie das ECMWF beinhalten keinerlei Information über den Flugverkehr, insbesondere berechnen sie keine Kondensstreifenbildung. Allerdings werden – im Gegensatz zu frei laufenden Klimamodellen – regelmäßig aktuelle Beobachtungen in Wettermodelle assimiliert, um das fortschreitende Auseinanderdriften von Modellzustand und wirklichem Wettergeschehen zu vermeiden. Diese Assimilationen bilden jeweils den Startpunkt eines neuen Wettervorhersagelaufs. In den Assimilationsprozess fließen eine Vielzahl von verschiedenen Beobachtungsdaten ein, unter anderem Messwerte von Bodenstationen, Radiosondendaten, Messwerte von Schiffen und Flugzeugen und insbesondere auch Satellitendaten. In diesen Beobachtungsdaten sind zwangsläufig auch Flugverkehrseinflüsse enthalten. Zwar werden aktuell nur Strahldichten in wolkenfreien Regionen in das Modell assimiliert; jedoch sind Flugverkehrseffekte häufig kleinskalig und erstrecken sich ggf. nur auf kleine Teile eines Satellitenpixels. Wird dieses fälschlicherweise als wolkenfrei eingestufte Pixel in die Assimilationsprozess berücksichtigt, fließt Flugverkehrsinformation in das Modell ein.

Das Modell nutzt also den aktuellen Zustand der Atmosphäre, der auch Flugverkehrseinflüsse beinhalten kann, und berechnet auf dieser Basis die Wetterentwicklung in einem flugverkehrsfreien Szenario.

Die Assimilation des Modells zur Initialisierung des Vorhersagelaufes führt jedoch nicht nur zu einer unerwünschten Beeinflussung des Modells mit Flugverkehrseffekten, sondern stört stets auch die Modellphysik. Eine Untersuchung auf Basis von Modelldaten eines Jahres (Oktober 2006 bis September 2007, Modellversionen 31r1 bzw. 32r2, vgl. Tabelle 2.2) zeigt, dass die im Hinblick auf die Zirrenbildung zentrale Größe der Eisübersättigung im eingesetzten Assimilationsschemata zumindest in den genannten Modellversionen nicht korrekt berücksichtigt wird, was zu einer deutlichen initialen Unterschätzung der Anzahl eisübersättigter Gebiete und der dort auftretenden Werte der Eisübersättigung führt. Erst in späteren Schritten des Vorhersagelaufes erreicht das Modell wieder einen zur Modellphysik konsistenten Atmosphärenzustand und baut eine höhere Eisübersättigung auf (Lamquin et al. 2009, vgl. Abbildung 2.12). Zudem verliert sich im Vorhersagelauf die anfangs enthaltene Flugverkehrsinformation mit fortschreitendem Vorhersagezeitpunkt.

Um repräsentative Tagesgänge der Zirrenbedeckung bzw. der ausgehenden langwelli-

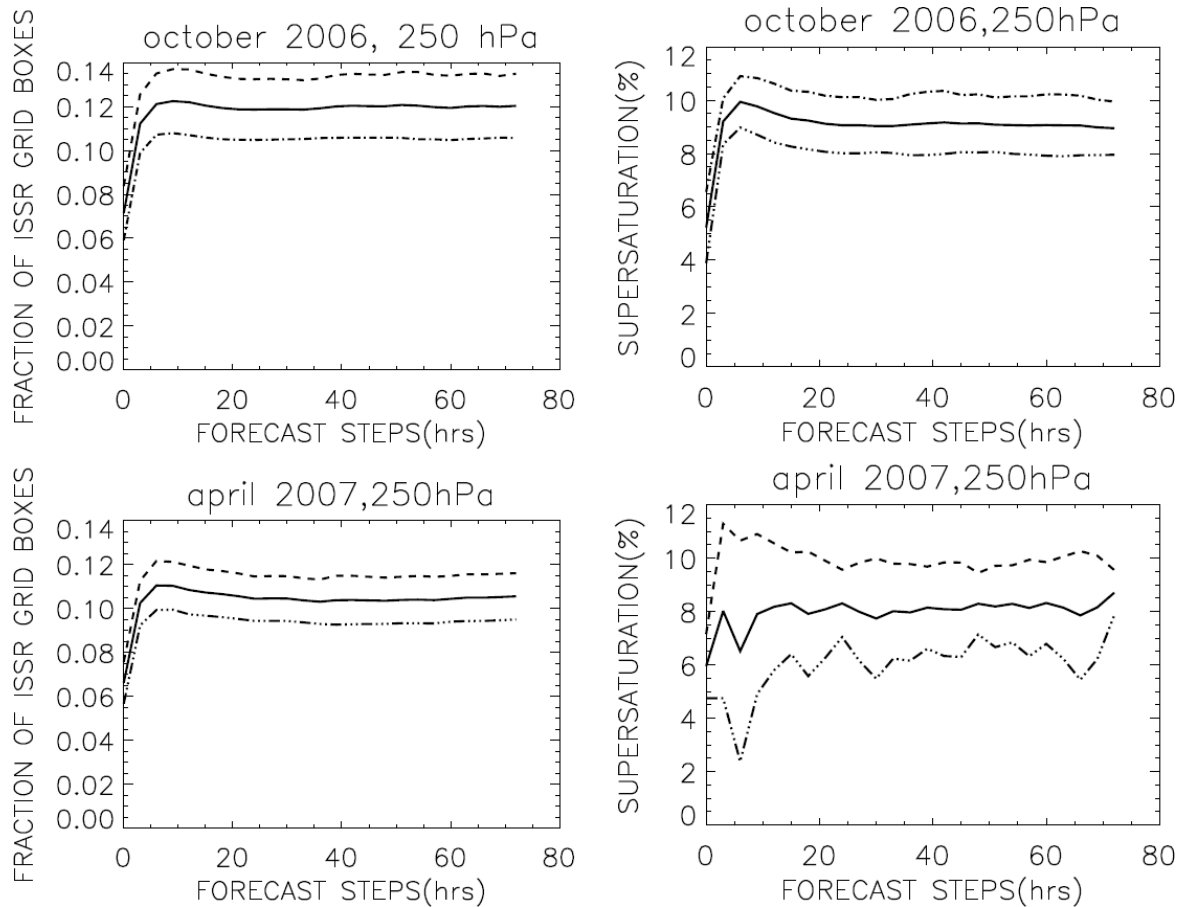


Abbildung 2.12: Abhängigkeit der Anzahl eisübersättigter Modellboxen (rechts) und in diesen Boxen auftretende Werte der Eisübersättigung in Abhängigkeit vom Vorhersagezeitraum des ECMWF-IFS Vorhersagelaufes. Quelle: Lamquin et al. (2009), unter CC-BY 3.0 Lizenz.

gen Strahlungsflussdichte abzuleiten, die weder durch Flugverkehrseffekte noch durch die initiale Störung infolge der Assimilation beeinflusst sind, werden in dieser Arbeit nur Vorhersageschritte herangezogen, in denen das Modell bereits ca. 4 Tage frei laufen konnte. Da im Reanalyselauf ERA-INTERIM die im ECMWF Archiv abgespeicherte zeitliche Auflösung der 2-dimensionalen HCC Felder nur sechs Stunden beträgt, werden hierfür Vorhersagedaten aus dem operationellen Vorhersagen unter Inkaufnahme von Modellveränderungen während des betrachteten Zeitraums (vgl. Tabelle 2.2) herangezogen. Diese liegen für Vorhersageschritte von bis zu 144 h (= 6 Tage) in einer dreistündigen Auflösung vor, was eine bessere Auflösung eines Tagesganges ermöglicht<sup>16</sup>. Die zeitliche Auflösung von drei Stunden ist jedoch erst seit Oktober 2006 verfügbar. Da

<sup>16</sup>Seit Mitte 2012 beträgt die zeitliche Auflösung teilweise eine Stunde. Dieser Zeitraum wurde in dieser Arbeit jedoch nicht mehr betrachtet.

aber ohnehin auch im Oktober 2006 eine verbesserte Behandlung der Eisübersättigung und der Zirrenphysik ins ECMWF-IFS implementiert wurde (Tompkins et al. 2007), werden in dieser Arbeit zur Ableitung eines repräsentativen natürlichen Tagesgangs von CC und OLR nur Daten vom Januar 2007 bis Dezember 2011 genutzt.

Das Verfahren, mit dem aus den oben dargestellten Datensätzen für diese Arbeit ein

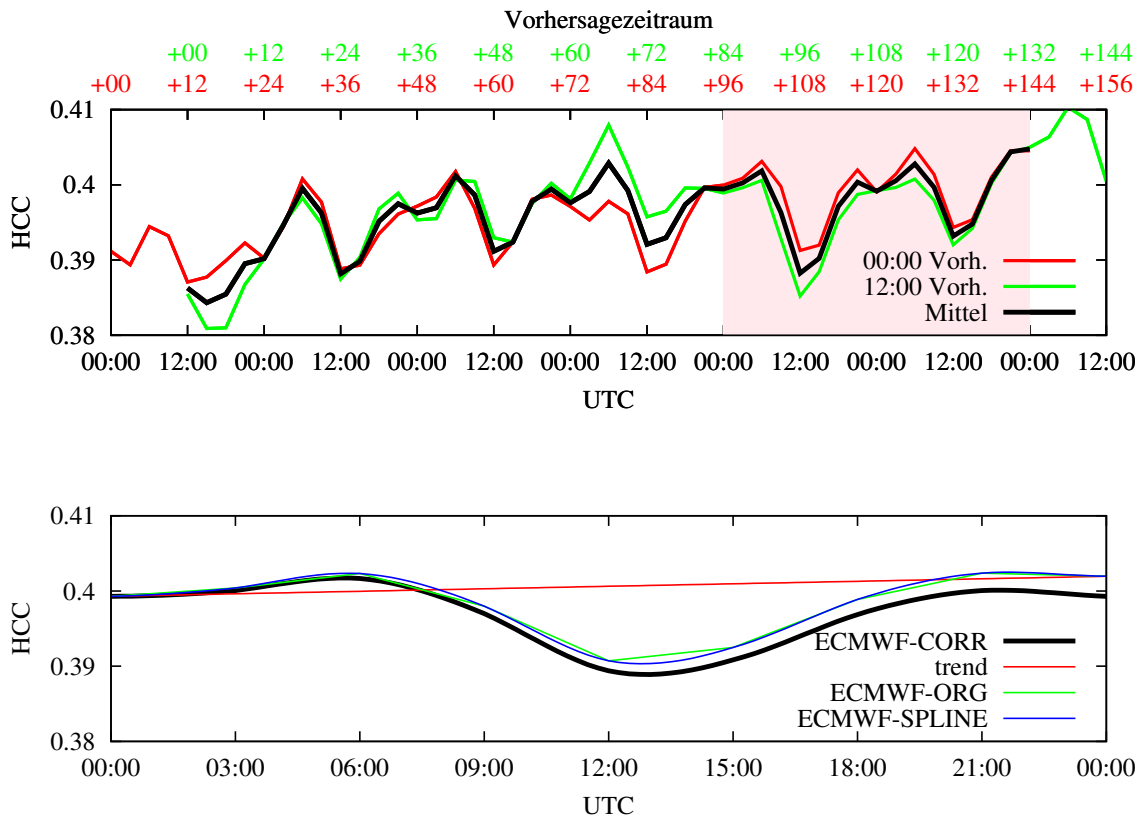


Abbildung 2.13: Oben: Zeitliche Entwicklung der Zirrenbedeckung im ECMWF-IFS in NAR, gemittelt über alle um 00:00 UTC (rot) bzw. 12:00 UTC (grün) gestarteten Vorhersageläufe für das Jahr 2011. Die schwarze Kurve repräsentiert den Mittelwert der beiden Vorhersagedatensätze. Der hinterlegte Bereich repräsentiert den Auswertebereich, aus dem ein repräsentativer Tagesgang der Zirrenbedeckung in NAR abgeleitet wird. Der Bereich beinhaltet die +96 bis +144 h Vorhersagen der 00:00 UTC Vorhersageläufe, sowie die +84 bis +132 h Vorhersagen der 12:00 UTC Vorhersageläufe (obere x-Achsenbeschriftung). Unten: Aus dem oben hinterlegten Bereich abgeleiteter Tagesgang der Zirrenbedeckung in originaler dreistündiger ECMWF-Auflösung (grün) sowie ein daran spline-interpolierter Tagesgang in 15 min Auflösung (blau). Nach Abzug des noch enthaltenen ansteigenden Trends der Zirrenbedeckung (rot) ergibt sich der so korrigierte und interpolierte Tagesgang der Zirrenbedeckung.

Tagesgang abgeleitet wird, ist in Abbildung 2.13 exemplarisch für das Jahr 2011 und die Größe HCC illustriert. ECMWF-IFS Vorhersagen werden zweimal täglich gestartet, mit Startzeitpunkt um 00:00 UTC bzw. 12:00 UTC. Es existieren also pro betrachte-

tem Jahr 365/366 Vorhersagen mit Startzeit 00:00 UTC und ebenso viele mit Startzeit 12:00 UTC,  $HCC_{00}(d, t_{fc})$  und  $HCC_{12}(d, t_{fc})$ , mit  $t_{fc} = +00, +03, +06, \dots, +144$  h. Durch Mittelung von  $HCC_{00}(d, t_{fc})$  und  $HCC_{12}(d, t_{fc})$  über alle Tage des Jahres ergibt sich eine mittlere Vorhersagezeitreihe  $HCC_{00}(t_{fc})$  (Abbildung 2.13 oben, rot) und  $HCC_{12}(t_{fc})$  (Abbildung 2.13 oben, grün). Um die oben diskutierten initialen Assimilationsartefakte sowie eine Flugverkehrsbeeinflussung zu vermeiden, werden von den gemittelten Vorhersagezeiträumen  $HCC_{00}(t_{fc})$  und  $HCC_{12}(t_{fc})$  nur die Zeitschritte  $t_{fc} = +96$  bis  $+144$  h (für 00:00 UTC Vorhersagen) bzw.  $t_{fc} = +84$  bis  $+132$  h (für 12:00 UTC Vorhersagen) betrachtet (rosa hinterlegte Fläche). Diese beiden 48 h-Ausschnitte repräsentieren je zwei Tagesgänge. Eine Mittelung der vier so gewonnenen Tagesgänge liefert einen mittleren Tagesgang der Zirrenbedeckung mit dreistündiger Auflösung (Abb. 2.13 unten, grün). Um einen glatteren und zeitlich höher aufgelösten Tagesgang zu erreichen, wird an diese Kurve eine spline-Funktion gefittet. Man erkennt in diesem jahresgemittelten Tagesgang aber immer noch einen ansteigenden Trend, der darauf hindeutet, dass das Modell auch nach 4-6 Tagen noch keinen stationären Modellzustand erreicht hat und die Zirrenbedeckung im Mittel noch schwach anwächst (rote Linie). Dieses Modellartefakt, das die weitere Analyse stören würde, wird subtrahiert, um einen periodischen Tagesgang zu erhalten (schwarze Linie).

Die Ableitung eines natürlichen Tagesgangs von OLR gestaltet sich weitgehend parallel zu dem eben beschriebenen Verfahren. Während jedoch HCC Felder als instantane Werte ausgegeben werden und die aktuelle Zirrensituation zum Ausgabezeitpunkt repräsentieren, handelt es sich bei den ausgegebenen TTR Feldern um akkumulierte Werte. Sie repräsentieren die seit dem letzten Ausgabezeitschritt über 3 Stunden aufintegrierte Strahlung. So repräsentiert beispielsweise ein TTR-Feld von 06:00 UTC das Modellintervall von 03:00 – 06:00 UTC. Aus diesem Grund wurden die nach obigem Muster abgeleiteten Tagesgänge von TTR für die weitere Analyse um 1,5 h verschoben.

# Kapitel 3

## Ergebnisse

### 3.1 Tagesgang der Flugverkehrsdichte im Untersuchungsgebiet

Die Zeitreihe der Flugverkehrsdichte in NAR ist in Abb. 3.1 (oben) dargestellt. Es ist festzustellen, dass die Flugverkehrsdichte in dem Gebiet eine hohe Autokorrelation von Tag zu Tag besitzt, es aber darüber hinaus Variabilität von Tag zu Tag bzw. Woche zu Woche gibt.

Abb. 3.1 (unten) zeigt den mittleren Tagesgang der Flugverkehrsdichte in NAR. Es treten zwei Maxima um 03:45 UTC und 13:00 UTC auf. Das erste Maximum korrespondiert mit Flügen von Amerika nach Europa, das zweite wird durch die Flüge von Europa mit Ziel in Amerika hervorgerufen. Die Bündelung der meisten Flüge auf ein relativ enges Zeitfenster hat logistische Gründe. In der Abbildung sind auch die Standardabweichungen eingezeichnet. Man erkennt, dass die Standardabweichungen beim zweiten Maximum größer sind. Ursache hierfür ist die stärkere Meteorologie-Abhängigkeit beim Flug von Europa nach Amerika: Während bei Flügen von Amerika nach Europa im Jetstream der Rückenwind genutzt wird, werden für Flüge nach Amerika neben anderen Randbedingungen (vgl. Abbildung 2.4) Routen mit möglichst geringem Gegenwind gewählt. Diese Routen sind daher stärker von der meteorologischen Situation abhängig und führen so in einigen Fällen nördlich vom NAR Gebiet vorbei. In Graf et al. (2012) ist eine Animation des mittleren Tagesgangs des Flugverkehrs des EUROCONTROL Datensatzes als ergänzendes Material verlinkt<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup>abrufbar unter <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2012GL052590/supinfo> .

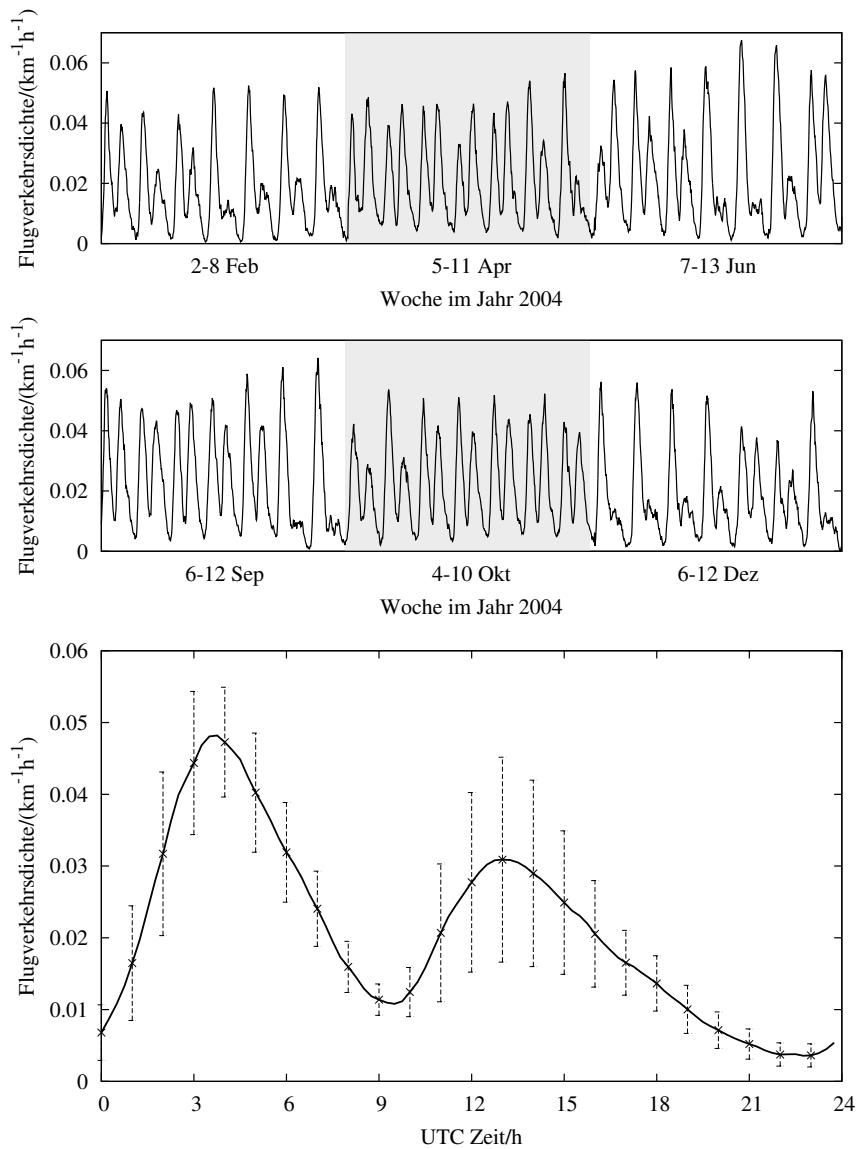


Abbildung 3.1: Oben: Zeitreihe der sechs Wochen Flugverkehrsichte in NAR, abgeleitet aus dem EUROCONTROL Datensatz. Die zeitliche Auflösung beträgt 15 min. Unten: Mittlerer Tagesgang der Flugverkehrsichte in NAR mit Standardabweichung, basierend auf den oben gezeigten sechs Wochen EUROCONTROL Daten.

Da Flüge nach Osten zuerst den Westteil und erst später den Ostteil des Untersuchungsgebietes erreichen, gleichzeitig aber Flüge nach Westen erst den Ostteil und danach den Westteil passieren, verändert sich der Tagesgang des Flugverkehrs, wenn man die Teilgebiete NAR-W und NAR-E getrennt betrachtet. Auf diesen Effekt wird später noch näher eingegangen. Wie in Abschnitt 2.3 angeführt, spiegelt der Flugverkehrsdatensatz den zivilen Luftverkehr wieder; militärische Flugbewegungen sind darin nicht enthalten. Für die USA wird der Beitrag militärischer Flugbewegungen zum gesamten Flugverkehrsaufkommen mit etwa 10 % angenommen (Waitz et al. 2005).



Inwieweit sich dieses Verhältnis auch auf den Nordatlantik übertragen lässt, und wie sich der Tagesgang solcher Flüge darstellt, kann nicht näher untersucht werden. Auch in anderen Flugverkehrsdatensätzen sind militärische Flugbewegungen nicht enthalten (Wilkerson et al. 2010) oder nur auf Basis von Routenannahmen konstruiert (Eyers et al. 2004). Soweit sich jedoch der Tagesgang des militärischen Flugverkehrs im Wesentlichen mit dem des zivilen Flugverkehrsaufkommens deckt, stört ein Fehlen des militärischen Flugverkehrsaufkommens im EUROCONTROL Datensatz die Quantifizierung des Flugverkehrseffekts nicht. Die beobachtete flugverkehrsinduzierte Wirkung wird dann zwar einer unterschätzten Flugverkehrsdichte zugeordnet. Dies führt aber zu einem entsprechend höheren Wert des Parameters A (vgl. Gleichung 2.17), so dass die Gesamtwirkung dennoch korrekt abgeleitet werden kann.

Der in NAR beobachtete Tagesgang des Flugverkehrsaufkommens weicht stark vom Tagesgang des Flugverkehrsaufkommens über den Kontinenten ab. Dort wird das Flugverkehrsaufkommen hauptsächlich vom Kurz- und Mittelstreckenverkehr generiert, der wesentlich stärker an die kontinentale Lokalzeit gekoppelt ist, mit hohem Flugverkehrsaufkommen untertags und geringerem Flugverkehrsaufkommen nachts (Krebs 2006).

## **3.2 Einzelszenenanalyse der linearen Kondensstreifenbedeckung, der Zirrenbedeckung und des ausgehenden langwelligen Strahlungsflusses**

### **3.2.1 Einzelszenenanalyse der linearen Kondensstreifenbedeckung**

Abbildung 3.2 zeigt für einige Zeitpunkte des 26. April 2004 die Ergebnisse des linearen Kondensstreifendetektionsalgorithmus. In der ersten Szene (00:00 UTC) werden lineare Zirrenstrukturen erkannt. Diese sind meist in Frontensysteme integriert, was besonders an den in der unteren östlichen Ecke des NAR-Gebietes liegenden Strukturen zu erkennen ist. Aber auch die im südwestlichen (und teilweise außerhalb des NAR Gebietes liegenden) Strukturen sind in Wolkenformationen eingebettet und aufgrund ihrer zur herrschenden synoptischen Situation konformen Orientierung höchstwahrscheinlich natürlichen Ursprungs. Dieser Befund wird durch die Orientierung der Strukturen in Nord-Süd-Richtung untermauert. Im Nordatlantik wird der Flugverkehr in Ost-West-Richtung abgewickelt (vgl. Abb. 2.3). Zwar kann sich die Orientierung der

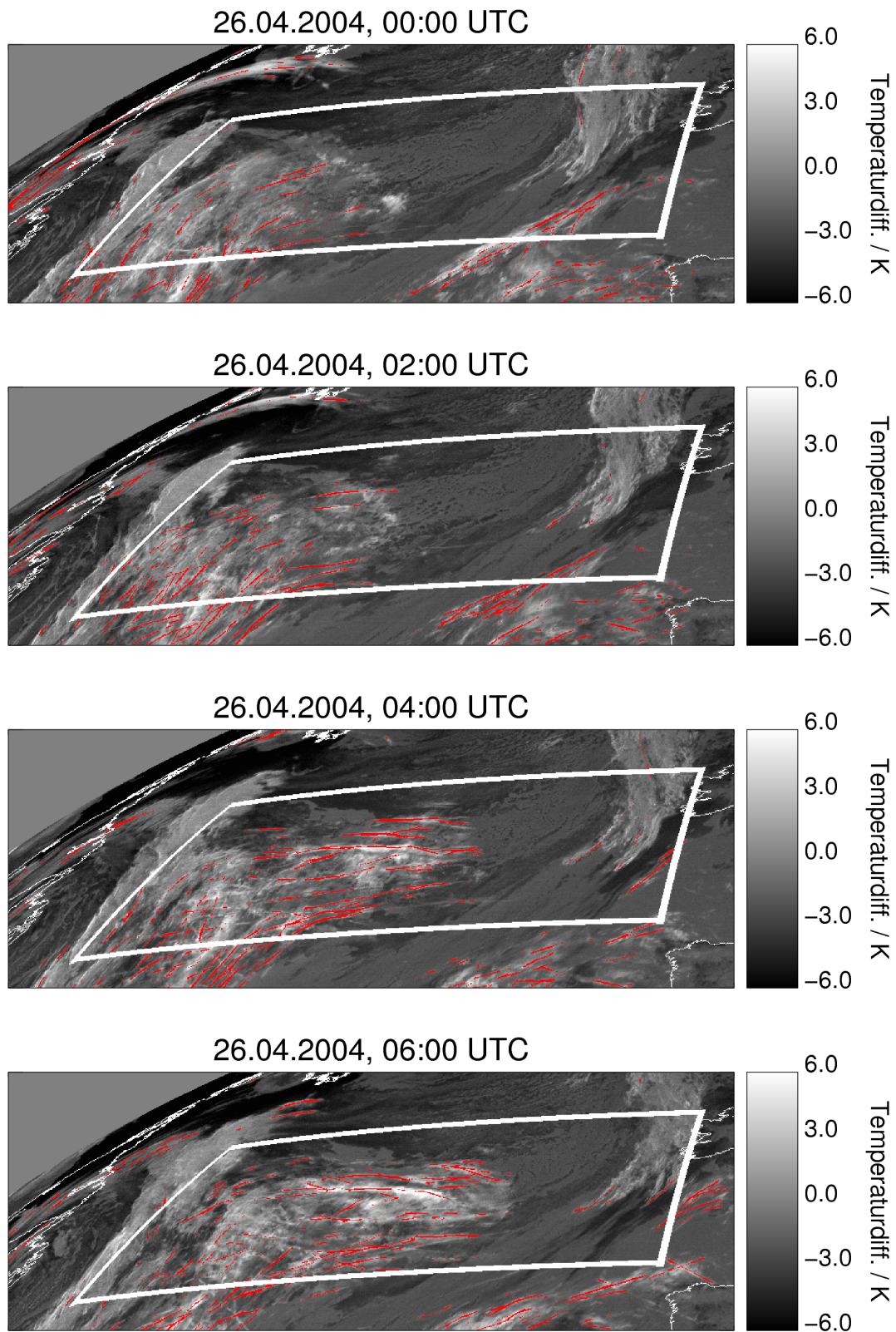


Abbildung 3.2: Resultate des linearen Kondensstreifenerkennungsalgorithmus (rote Linien) für den 26.04.2004, um 00:00, 02:00, 04:00 und 06:00 UTC (von oben nach unten). Im Hintergrund ist jeweils die Temperaturdifferenz der Kanäle IR\_087 und IR\_120 dargestellt.

Kondensstreifen durch Advektion in entsprechenden Windfeldern drehen; die meteorologische Situation deutet aber nicht darauf hin.

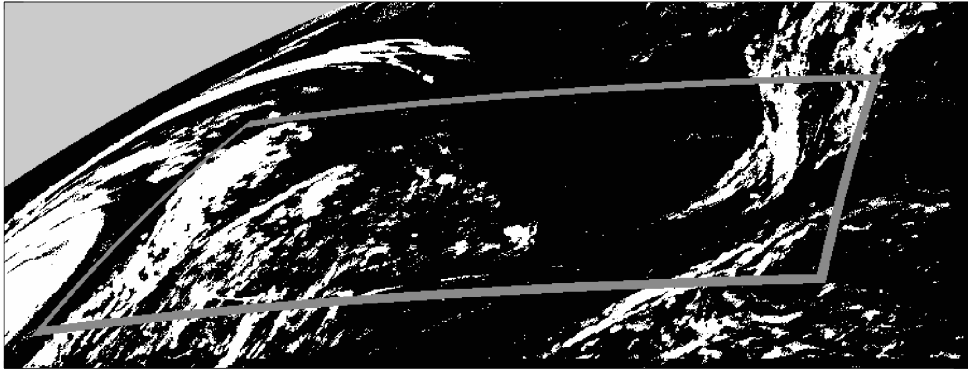
Im folgenden Bild (02:00 UTC) ist die Situation noch ähnlich. Lediglich in der Bildmitte sind wenige in Ost-West-Richtung orientierte Strukturen hinzugekommen. Diese dürften durch den nun verstärkt einsetzenden transatlantischen Flugverkehr (vgl. Abb. 3.1) verursacht sein. Wesentlich besser sichtbar ist dieser Effekt jedoch im folgenden Bild, das die Situation um 04:00 UTC wiedergibt. Hier sind in der Bildmitte viele in Ost-West-Richtung orientierte Objekte hinzugetreten. Der Flugverkehr hat um diese Zeit sein erstes Maximum bereits erreicht. Das plötzliche großräumige Auftreten, die Orientierung der Strukturen sowie der nicht bestehende Zusammenhang mit meteorologischen Frontensystemen erlauben den Schluss, dass es sich bei diesen Objekten um lineare Kondensstreifen handelt.

In der Situation um 06:00 UTC ist zu erkennen, dass sich die der Kondensstreifenerkennung zugrundeliegenden Objekte verbreitert haben. Sie werden vom CDA teilweise nicht mehr komplett erkannt, so wie es um 04:00 UTC noch weitgehend der Fall war. Die Abb. 3.2 illustriert somit, dass der CDA bei weitem nicht die komplette Fläche der vom Flugverkehr induzierten Zirrusbedeckung erfasst. Zum einen sind lineare Strukturen per Auge erkennbar, die vom CDA nicht detektiert werden, zum anderen werden erkannte Objekte nicht in ihrer vollen Breite als Kondensstreifenfläche beurteilt. Letzterer Effekt ist vor allem in der Szene von 06:00 UTC offensichtlich. Daneben ist festzuhalten, dass auch natürliche Zirrenbedeckung, soweit sie linienförmige Struktur besitzt, als Kondensstreifen erfasst wird. Beide Effekte sind zu berücksichtigen, wenn im Folgenden von linearer Kondensstreifenbedeckung gesprochen wird.

### 3.2.2 Einzelszenenanalyse der Zirrenbedeckung

Der Tagesgang der Zirrenbedeckung einzelner Tage wird in erster Linie von der meteorologischen Situation bestimmt. Verlässt beispielsweise ein Zirrenband das Beobachtungsgebiet, nimmt die Zirrenbedeckung im Tagesverlauf ab. Dennoch kann auch die Analyse von Einzelszenen die Hypothese des zeitlich veränderlichen AIC-Beitrags in NAR stützen. Für die in Abschnitt 3.2.1 betrachtete meteorologische Situation zeigt Abb. 3.3 die Resultate der mit MeCiDA2 abgeleiteten Zirrenbedeckung. Um 00:00 UTC erscheint die Szene weitgehend frei von (linienförmigen) Zirrenstrukturen. Um 2:00 UTC und noch mehr um 4:00 UTC haben sich viele linienförmige, in Ost-West-Richtung orientierte Zirren gebildet. Das NAR Gebiet besitzt eine räumliche Ausdehnung von etwa 2500 km x 1200 km, die beobachteten Zirrenstrukturen haben eine Länge

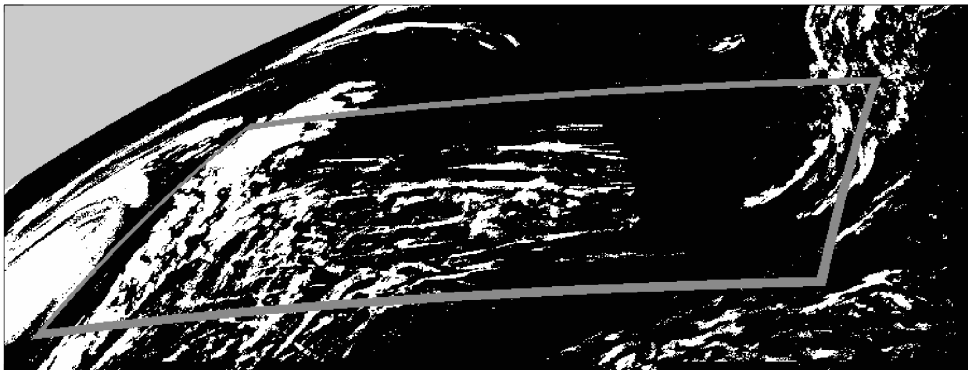
26 April 2004, 00:00 UTC



26 April 2004, 02:00 UTC



26 April 2004, 04:00 UTC



26 April 2004, 06:00 UTC

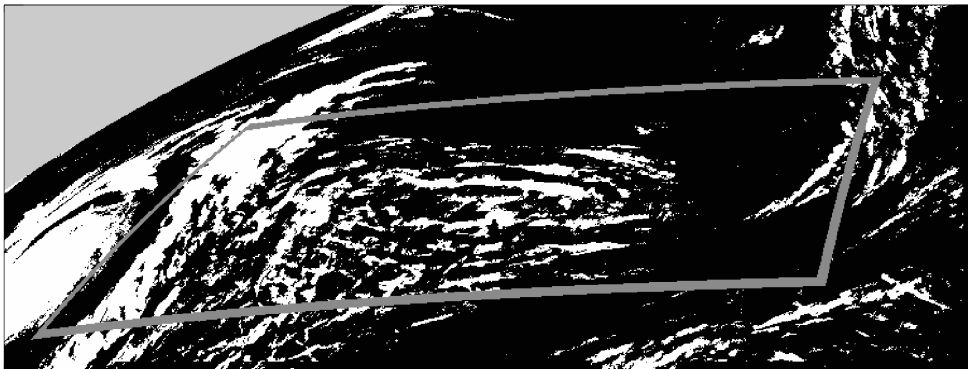


Abbildung 3.3: MeCiDA2 Resultate für den 26.04.2004, um 00:00, 02:00, 04:00 und 06:00 UTC (von oben nach unten).

von mehreren hundert Kilometern und eine Breite bis in den zweistelligen km-Bereich. Vom Boden aus würden solche Strukturen ohne weitere Information über die Historie kaum als flugverkehrsinduzierte Zirren oder gar als lineare Kondensstreifen identifiziert werden. Ruft man sich den in Abbildung 3.1 gezeigten Tagesgang der Flugverkehrsdichte in Erinnerung, so ist festzuhalten, dass in diesem Zeitfenster viele Flugzeuge das Beobachtungsgebiet passiert haben. Um 6:00 UTC sind keine frischen kontrastreichen linienförmigen Strukturen mehr erkennbar; die vorher entstandenen linienförmigen Zirren wurden durch Diffusions- und Scherungsprozesse verschwommen und haben sich teilweise aufgelöst. Soweit die Zirrenbedeckung noch existiert, wird sie jedoch – im Gegensatz zur linearen Kondensstreifenbedeckung – von MeCiDA2 erfasst und die Wirkung fließt in die für das Gebiet ermittelte Zirrenbedeckung vollständig ein. Eine Animation dieser Szene mit voller zeitlicher Auflösung von 15 min ist in Graf et al. (2012) als ergänzendes Material verlinkt<sup>2</sup>.

Wenngleich diese Szene als Einzelfall nur illustrativen Charakter besitzt, so belegt sie dennoch, dass der Flugverkehr imstande ist, die Zirrenbedeckung im Gebiet sichtbar zu beeinflussen; aufgrund der oben diskutierten Regelmäßigkeit des Flugverkehrstagesgangs in NAR wird diese Art der Zirrenauslösung periodisch generiert.

### 3.2.3 Einzelszenen der ausgehenden langwelligen Strahlungsflusses

Abb. 3.4 zeigt für die bereits eingeführte Situation die mit RRUMS (vgl. Abschnitt 2.7) abgeleiteten ausgehenden langwelligen Strahlungsflussdichten am Oberrand der Atmosphäre. Zunächst sei auf den großen Wertebereich der Strahlungsflussdichte hingewiesen. Er wird durch die unterschiedlichen Temperaturen der relevanten emittierenden Objekte verursacht. Während in wolkenfreien Gebieten die Strahlungsflussdichte von der Oberflächentemperatur der Erde (bzw. in den Wellenlängenbereichen der Wasserdampfabsorption von der Temperatur der emittierenden atmosphärischen Wasserdampfs) bestimmt wird, sind in bewölkten Regionen die Temperaturen des oberen Wolkenrandes vorherrschende Temperatur für die Abstrahlung relevant. So ergeben sich für die dargestellte Situation Werte zwischen  $125 \text{ W/m}^2$  und  $275 \text{ W/m}^2$ .

Die Einordnung der einzelnen Szenen deckt sich weitgehend mit den in den Abschnitten 3.2.1 und 3.2.2 getroffenen Aussagen. Ergänzend ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die oben diskutierten linienförmigen Strukturen auch in der ausgehenden lang-

---

<sup>2</sup>abrufbar unter <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2012GL052590/supinfo> .

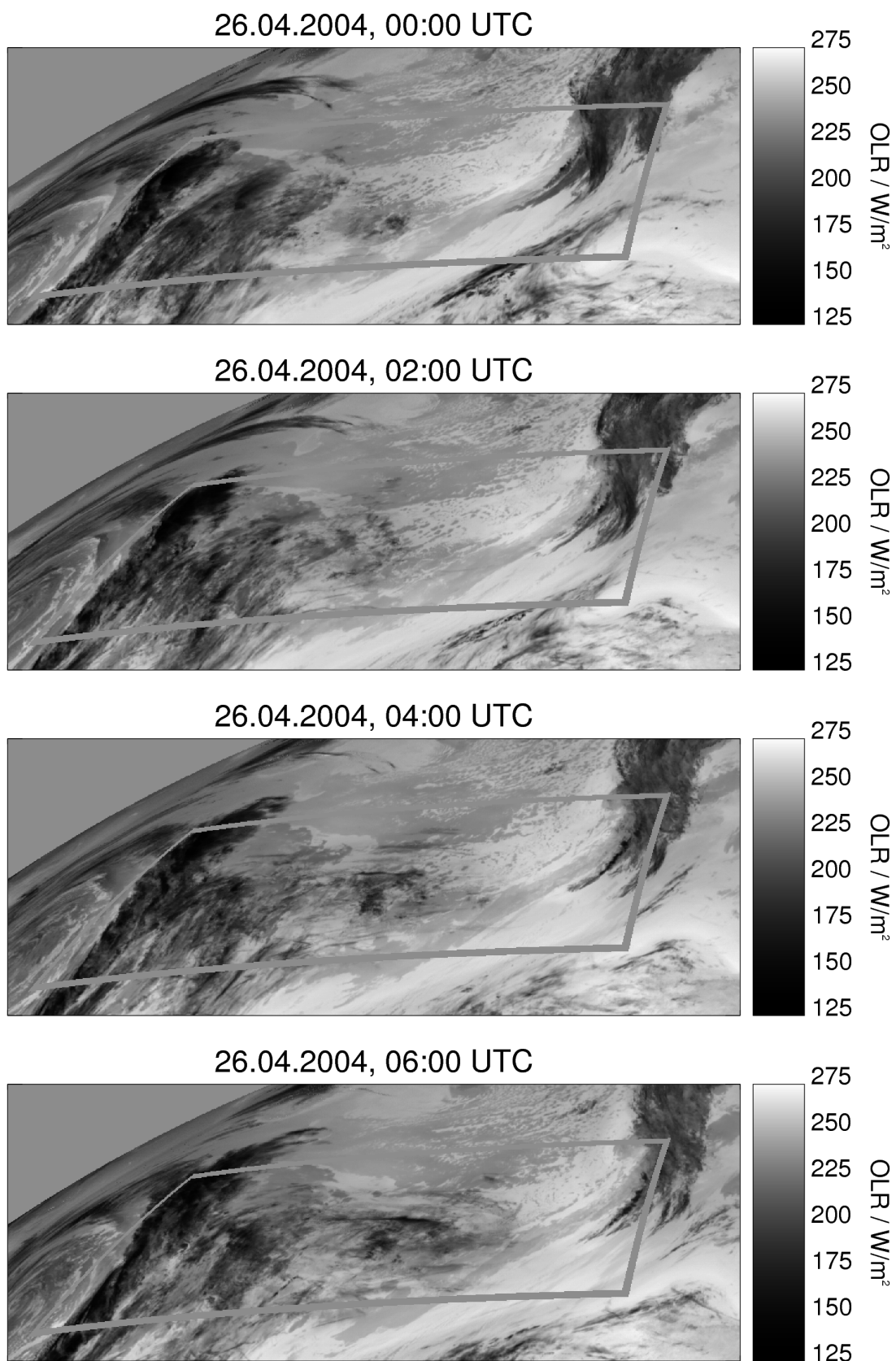


Abbildung 3.4: Abgeleitete langwellige Abstrahlung am Oberrand der Atmosphäre für den 26.04.2004, um 00:00, 02:00, 04:00 und 06:00 UTC (von oben nach unten).

### 3.2. Einzelszenenanalyse der linearen Kondensstreifenbedeckung, der Zirrenbedeckung und des ausgehenden langwelligen Strahlungsflusses

welligen Strahlung sichtbar sind (vgl. Abbildung 3.4, z. B. 04:00 UTC), was in Anbetracht des der Abbildung zugrunde gelegten Wertebereiches eine Veränderung der Strahlungsflussdichte im zweistelligen  $\text{W}/\text{m}^2$ -Bereich impliziert. Die instantane lokale flugverkehrsinduzierte Änderung der Strahlungsflussdichte kann also mehrere Größenordnungen über dem global gemittelten typischen Strahlungsantrieb von Kondensstreifen liegen.

#### 3.2.4 Einordnung der Einzelszenenanalyse

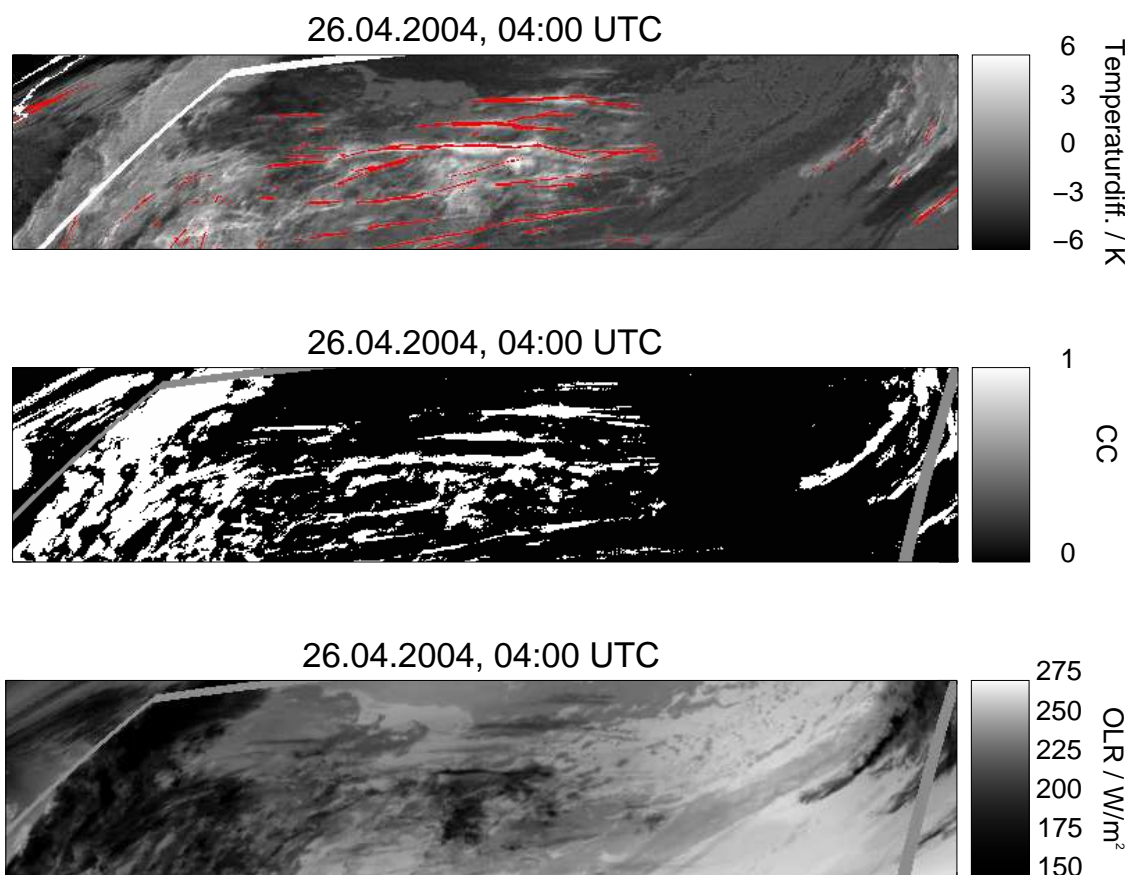


Abbildung 3.5: Abgeleiteter LiCC (oben), CC (Mitte) und OLR (unten) für den Termin 26.04.2004, 04:00 UTC. Der abgebildete Bereich ist im Vergleich zu den Abbildungen 3.2 – 3.4 vergrößert. Bei OLR wurde zudem der Wertebereich der Situation angepasst.

In den Abschnitten 3.2.1 bis 3.2.3 wurde eine meteorologische Situation diskutiert, zu der in NAR die Voraussetzungen zur Bildung und Persistenz von Kondensstreifen erfüllt waren. Die Betrachtung der Szenen um 00:00, 02:00, 04:00 und 06:00 UTC

zeigte, dass es ab 02:00 UTC zu vermehrter Bildung von Kondensstreifen kam, die sich bis 04:00 UTC verbreiterten und sich gegen 06:00 UTC stark verbreitert und teilweise aufgelöst haben. Der in Abb. 3.1 gezeigte Tagesgang der Flugverkehrsdichte im Beobachtungsgebiet lies eine Erklärung für das beobachtete Verhalten finden. Gegen 00:00 UTC waren vermutlich in weiten Bereichen des späteren Kondensstreifengebiets die Bedingungen zur Bildung von Kondensstreifen bereits erfüllt. Mangels Flugverkehr konnte es jedoch zu keiner Kondensstreifenbildung kommen. Wenige Stunden später war das Flugverkehrsaufkommen in NAR sehr hoch; ein Großteil des Flugverkehrs von Amerika nach Europa passiert in diesem Zeitfenster das Beobachtungsgebiet. Dadurch kommt es zur großflächigen Bildung von Kondensstreifen, die sich verbreitern, ihre lineare Struktur verlieren und sich im weiteren Verlauf auflösen. Die in der Arbeit Graf et al. (2012) verlinkte Animation dieser Szene<sup>3</sup> zeigt den weiteren Verlauf der Zirrenentwicklung an diesem Tag. In Abbildung 3.5 sind für die Uhrzeit 04:00 UTC die drei betrachteten Produkte nochmals zur besseren Vergleichbarkeit vergrößert dargestellt. Diese Beispielsszene belegt für den konkreten Einzelfall die Hypothese, dass es durch den in NAR zeitlich gebündelt auftretenden Flugverkehr zur zeitlich gebündelten Auslösung von Kondensstreifen kommt. Für den Tagesgang der gesamten Zirrenbedeckung ist die aktuelle meteorologische Situation der bestimmende Faktor. Verlässt ein großflächiges Zirrenband das Beobachtungsgebiet, nimmt die Zirrenbedeckung trotz ggf. auftretender flugverkehrsinduzierter Zirrenbedeckung in einem anderen Teil von NAR ab. Die flugverkehrsinduzierten Anteile an der gesamten Zirrenbedeckung modifizieren also den Tagesgang der Zirrenbedeckung eines bestimmten Tages, dominieren ihn in der Regel aber nicht.

### 3.3 Zeitreihen der linearen Kondensstreifenbedeckung, der Zirrenbedeckung und des ausgehenden langwelligeren Strahlungsflusses in NAR und SAR

Abbildung 3.6 zeigt die auf der Basis von acht Jahren Meteosat-8/9 Daten für NAR abgeleiteten Zeitreihen der Zirrenbedeckung und der ausgehenden langwelligeren Strahlung am Oberrand der Atmosphäre. Diese und weitere Zeitreihen bilden die Basis für die Ableitung mittlerer Tagesgänge, die in den folgenden Abschnitten erläutert werden.

---

<sup>3</sup>abrufbar unter <http://www.agu.org/journals/g1/g11216/2012GL052590/2012GL052590-ms02.gif>



3.3. Zeitreihen der linearen Kondensstreifenbedeckung, der Zirrenbedeckung und des ausgehenden langwelligen Strahlungsflusses in NAR und SAR

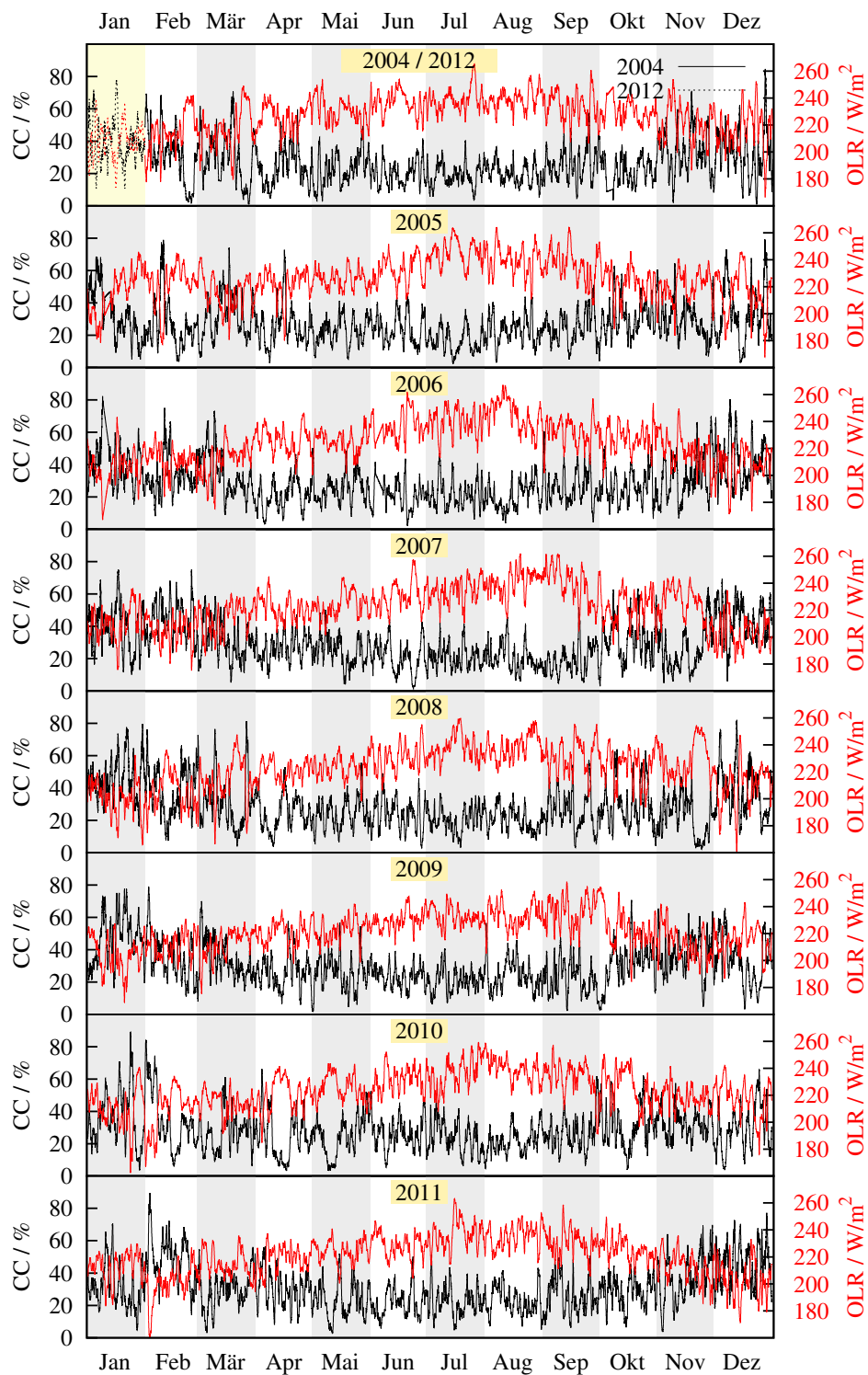


Abbildung 3.6: Zeitreihe der Zirrenbedeckung (CC, schwarz) und der ausgehenden langwelligen Strahlungsflussdichte (OLR, rot) in NAR für den Zeitraum Februar 2004 – Januar 2012 in 15-minütiger Zeitaufösung. Der Monat Januar 2012 ist in der ersten Zeile dargestellt.

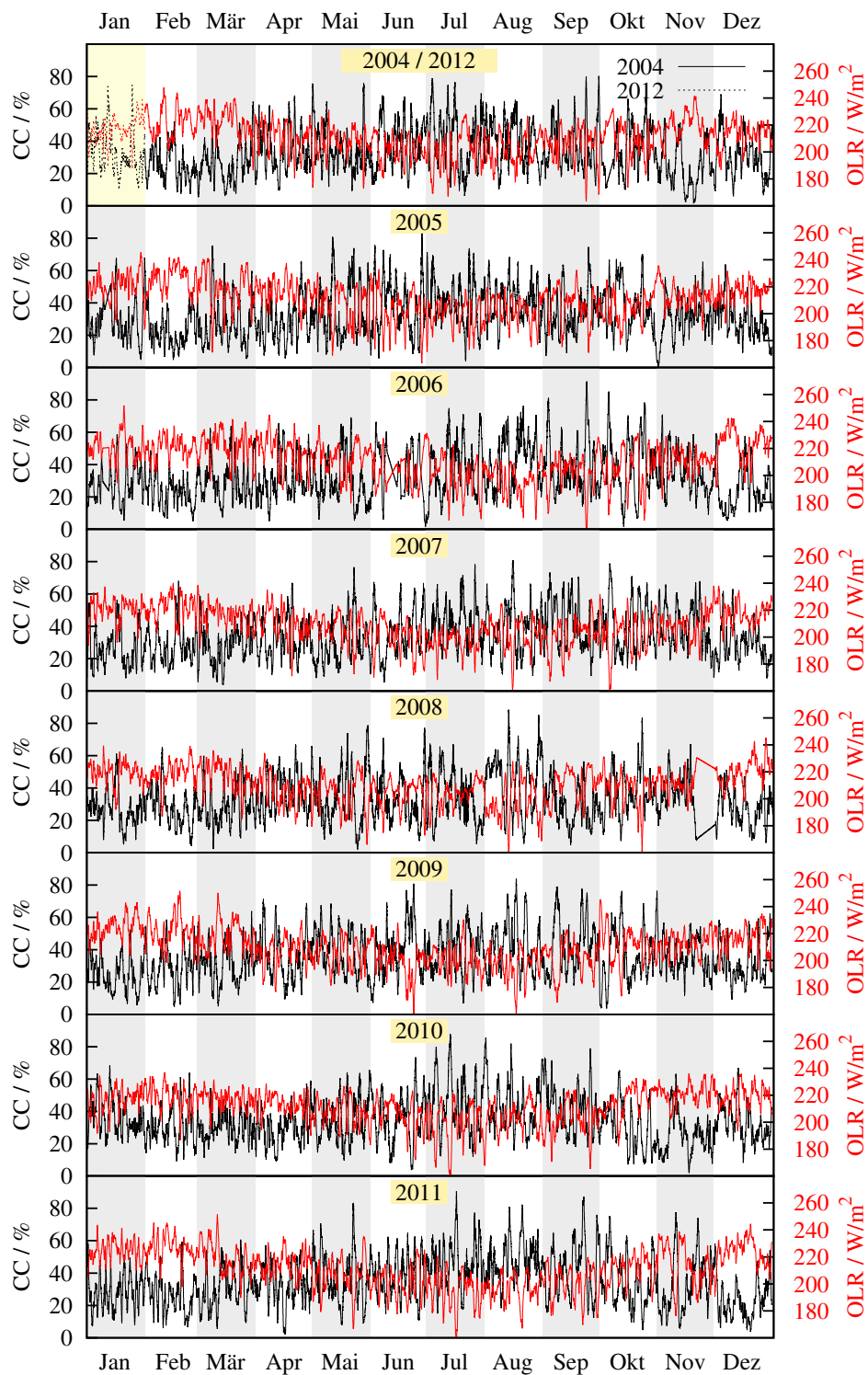


Abbildung 3.7: Zeitreihe der Zirrenbedeckung (CC, schwarz) und der ausgehenden langwelligeren Strahlungsflussdichte (OLR, rot) in SAR für den Zeitraum Februar 2004 – Januar 2012 in 15-minütiger Zeitaufösung. Der Monat Januar 2012 ist in der ersten Zeile dargestellt.

Die zeitliche Auflösung dieser Zeitreihen beträgt 15 Minuten, jedes Jahr ist also mit über 35000 Zeitpunkten repräsentiert. Zunächst ist die große Variabilität der Zirrenbedeckung anzusprechen. Der beobachtete Zirrenbedeckungsgrad liegt üblicherweise im Bereich zwischen 10 und 80 %, und kann sich innerhalb eines oder mehrerer Tage stark verändern. Neben dieser Variabilität ist ein Jahresgang in der Zirrenbedeckung zu erkennen, mit höheren Werten im Winter und leicht niedrigeren Werten im Sommer.

Vergleicht man die Zeitreihe der Zirrenbedeckung mit der ausgehenden langwelligen Strahlung, so fällt die starke Antikorrelation auf: Zeitpunkte mit einem hohen Zirrenbedeckungsgrad zeigen niedrige Werte der ausgehenden langwelligen Strahlung und umgekehrt. Zirren absorbieren die thermische Strahlung der in der Regel wärmeren Erd- oder Wasseroberfläche sowie der niedriger liegenden Wolken und Spurengase, und emittieren infolge ihrer niedrigeren Temperatur weniger Strahlung.

Die Zeitreihen von CC und OLR in SAR sind in der Abbildung 3.7 dargestellt. Im Mittel werden in SAR leicht höhere Werte der Zirrenbedeckung und leicht geringere Werte der ausgehenden langwelligen Strahlungsflussdichte beobachtet. Aufgrund der in der Südhemisphäre verschobenen Jahreszeiten treten die oben genannten Jahresgänge mit entsprechender Verschiebung um ein halbes Jahr auf.

## **3.4 Tagesgang der linearen Kondensstreifenbedeckung und der Zirrenbedeckung**

Aus den in Abbildung 3.6 beispielhaft für CC und OLR gezeigten Zeitreihen kann nach Abschnitt 2.8 ein mittlerer Tagesgang der entsprechenden Größe abgeleitet werden. Im Folgenden werden die so abgeleiteten Tagesgänge für das Gesamtgebiet NAR sowie für Teilgebiete NAR-W und NAR-E gezeigt.

### **3.4.1 Tagesgang von LiCC und CC in NAR**

In diesem Abschnitt werden die Tagesgänge der linearen Kondensstreifenbedeckung und der Zirrenbedeckung gemeinsam diskutiert; diese Darstellung bietet eine geeignete Basis zur Prüfung der Plausibilität der aufgestellten Hypothese und liefert ein Fundament für die folgende Diskussion.

Im oberen Teil der Abbildung 3.8 ist der mittlere Tagesgang der Flugverkehrsdichte sowie die über acht Jahre gemittelten Tagesgänge des Bedeckungsgrades linearer Kondensstreifen sowie der totalen Zirrenbedeckung gezeigt. Die Flugverkehrsdichte zeigt

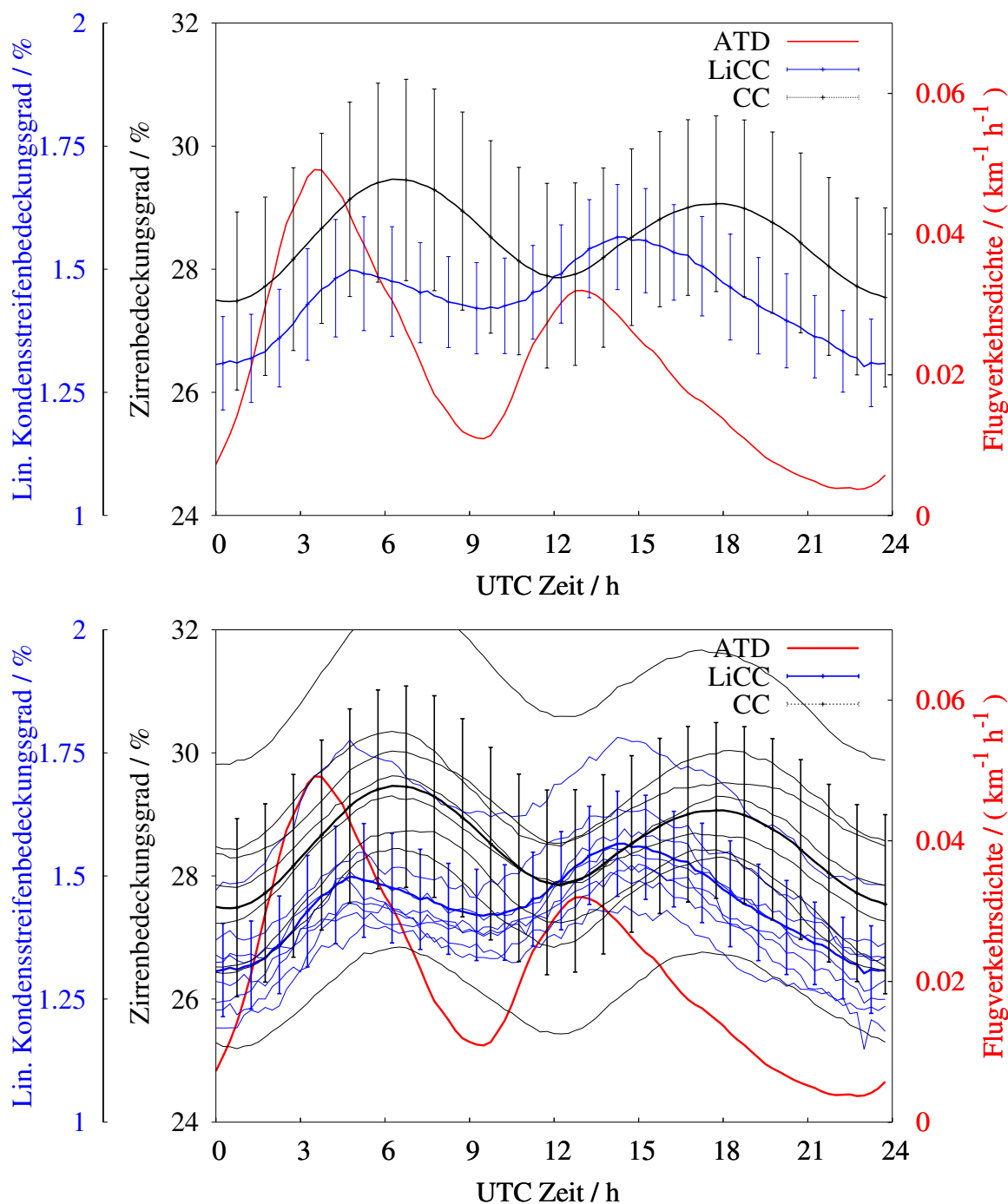


Abbildung 3.8: Oben: Mittlerer Tagesgang der Flugverkehrsichte (ATD, rot), der linearen Kondensstreifenbedeckung (LiCC, blau) sowie der Zirrenbedeckung (CC, schwarz) für NAR. Für den linearen Kondensstreifenbedeckungsgrad und den Zirrenbedeckungsgrad sind die Standardabweichungen eingezeichnet, die sich aus der interannualen Variabilität der Tagesgänge der acht einzelnen Jahre, berechnet nach Gl. 2.6, ergeben. Zur besseren Sichtbarkeit sind die Standardabweichungen nur stündlich eingezeichnet, wobei das Raster zur Vermeidung von Überlapp zwischen LiCC und CC um 30 min versetzt ist. Unten: Wie oben, jedoch sind die jeweils acht nach Gl. 2.6 abgeleiteten Tagesgänge der einzelnen Jahre mit eingezeichnet (dünne Linien).

### 3.4. Tagesgang der linearen Kondensstreifenbedeckung und der Zirrenbedeckung

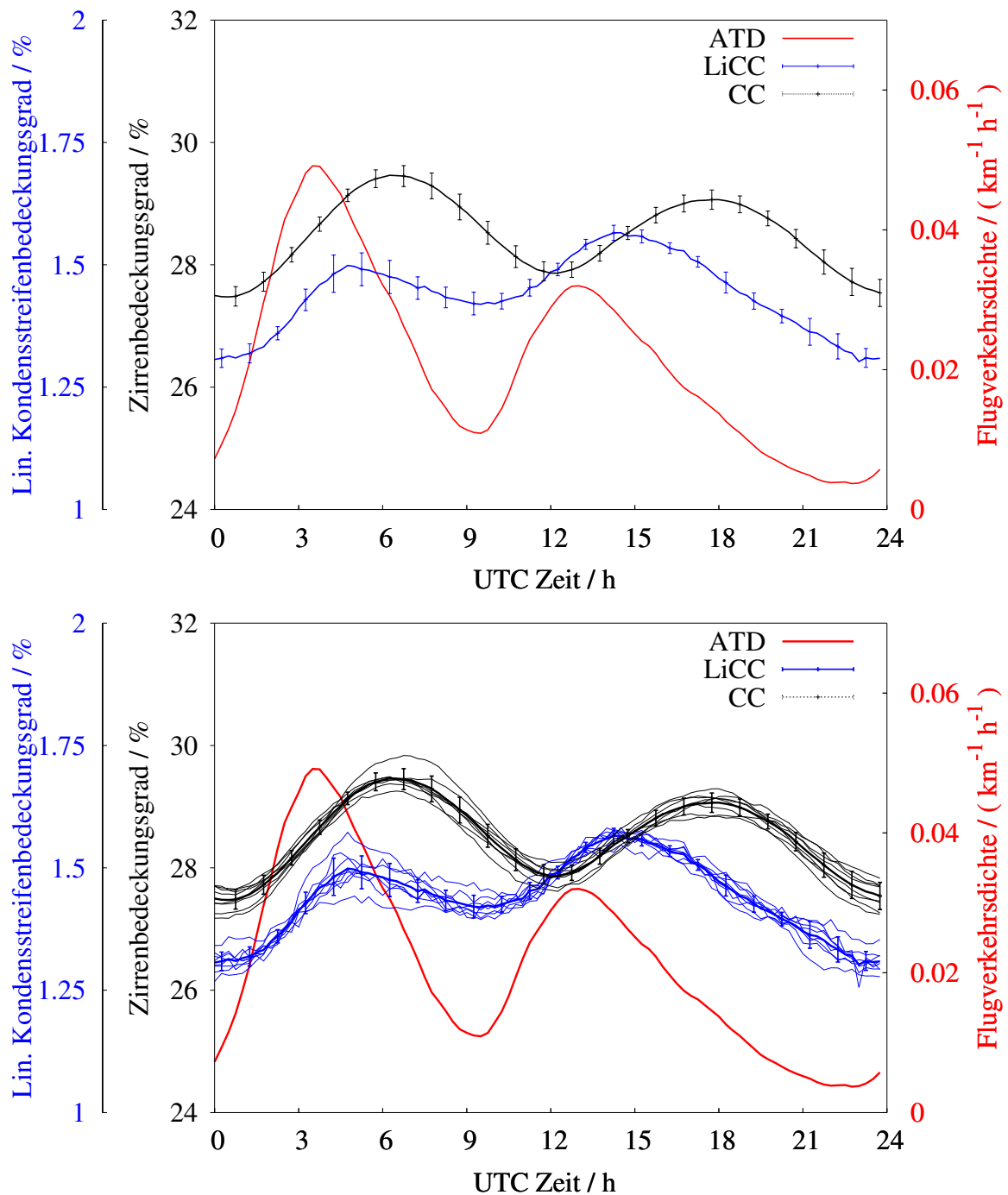


Abbildung 3.9: Wie Abb. 3.8, jedoch sind die eingetragenen Standardabweichungen aus den nach Gl. 2.8 berechneten Tagesgänge der einzelnen Jahre ermittelt worden. Von den Tagesgängen der einzelnen Jahre wurde jeweils der individuelle Mittelwert subtrahiert und der 8-Jahresmittelwert addiert.

Tabelle 3.1: Lage der Minimal- und Maximalwerte der Tagesgänge der Flugverkehrsichte(ATD) in NAR, der Zirrenbedeckung (CC) in NAR (N), SAR (S) und ihrer Differenz (N-S), sowie der linearen Kondensstreifenbedeckung in NAR, auf Basis des Gesamtgebietes bzw. des West- oder Ostteils. Die Standardabweichungen beschreiben die Abweichung der acht betrachteten individuellen Jahre untereinander. ATD ist in  $km/km^2h$ , die Tageszeit ist in UTC und LiCC und CC sind in Bedeckungsgrad-Prozentpunkten angegeben.

	Gesamtgebiet			Westteil			Ostteil						
	Zeit	Stdabw.	Wert	Stdabw.	Zeit	Stdabw.	Wert	Stdabw.	Zeit	Stdabw.	Wert	Stdabw.	
1. Max	ATD	3.75	0.0489	0.0009	6.19	0.74	0.3239	0.0016	6.69	0.35	0.2662	0.0019	
1. Min	ATD	9.50	0.0108	0.0015	12.72	0.32	0.3007	0.0029	11.53	0.29	0.2540	0.0020	
2. Max	ATD	13.00	0.0322	0.0011	18.38	0.59	0.3177	0.0016	16.38	0.28	0.2664	0.0011	
2. Min	ATD	22.75	0.0037	0.0022	23.84	0.37	0.3053	0.0036	0.13	0.38	0.2415	0.0030	
	CC-N	6.47	0.26	0.2948	0.0009	6.19	0.74	0.3239	0.0016	6.69	0.35	0.2662	0.0019
	CC-N	12.19	0.24	0.2782	0.0015	12.72	0.32	0.3007	0.0029	11.53	0.29	0.2540	0.0020
	CC-N	17.75	0.40	0.2909	0.0011	18.38	0.59	0.3177	0.0016	16.38	0.28	0.2664	0.0011
	CC-N	0.13	0.33	0.2741	0.0022	23.84	0.37	0.3053	0.0036	0.13	0.38	0.2415	0.0030
	CC-S	6.63	0.28	0.3463	0.0009	6.97	0.59	0.3362	0.0017	5.72	1.13	0.3576	0.0013
	CC-S	13.44	0.56	0.3301	0.0019	13.94	0.35	0.3202	0.0027	13.09	0.84	0.3388	0.0029
	CC-S	19.00	0.00	0.3430	0.0011	18.94	0.17	0.3301	0.0013	18.94	0.17	0.3559	0.0015
	CC-S	0.41	0.88	0.3375	0.0020	0.47	0.96	0.3245	0.0029	0.19	0.75	0.3481	0.0031
	CC-N-S	6.19	0.78	0.1893	0.0009	4.44	0.54	0.2316	0.0016	7.25	0.86	0.1510	0.0034
	CC-N-S	10.72	0.61	0.1857	0.0023	12.06	0.66	0.2181	0.0025	10.16	0.41	0.1513	0.0028
	CC-N-S	15.88	0.57	0.1941	0.0020	17.72	0.68	0.2300	0.0020	15.28	0.29	0.1614	0.0032
	CC-N-S	23.88	0.33	0.1730	0.0033	23.84	0.78	0.2178	0.0034	23.69	0.58	0.1250	0.0043
	LiCC-N	4.88	0.25	0.01511	0.00026	3.72	0.46	0.0157	0.0002	5.59	0.57	0.0149	0.0003
	LiCC-N	10.28	0.34	0.01420	0.00011	10.47	0.61	0.0145	0.0002	10.31	0.35	0.0139	0.0002
	LiCC-N	15.19	0.32	0.01566	0.00011	16.09	0.53	0.0163	0.0002	15.03	0.08	0.0152	0.0001
	LiCC-N	23.78	0.51	0.01287	0.00019	23.44	0.62	0.0139	0.0003	0.09	1.00	0.0115	0.0002

das bereits in Abschnitt 3.1 diskutierte Muster. Der Tagesgang der linearen Kondensstreifenbedeckung zeigt ein dem Flugverkehrsaufkommen nachlaufendes Verhalten. Die Maxima der Kurve treten 1–2 Stunden nach dem Maximum der Flugverkehrsdichte auf. Die genauen Koordinaten der Extremwerte, die durch Mittelung der Maximakordinaten der acht einzelnen Jahre ermittelt wurden, sind in Tabelle 3.1 aufgeführt. Die zeitliche Verzögerung zwischen Flugverkehrsdichte und linearer Kondensstreifenbedeckung ist plausibel, da Kondensstreifen zum einen aufgrund ihrer anfangs geringen Breite nur verzögert von MSG-SEVIRI aufgelöst werden können, zum anderen durch Verbreiterung der Bedeckungsgrad eines Kondensstreifen stetig wächst, bis er schließlich infolge mangelnder Linienförmigkeit, seiner zu großen Breite oder aber infolge seiner Auflösung nicht mehr als linienförmiger Kondensstreifen detektiert wird.

Während in Abbildung 3.8 die Flugverkehrsdichte vom Wert 0 ab wiedergegeben ist (rote Skala), ist die lineare Kondensstreifenbedeckung für den Wertebereich 1–2 % dargestellt (blaue Skala). Hier wird ersichtlich, dass der Bedeckungsgrad linearer Kondensstreifen einen wesentlichen Sockelwert aufweist. Wie in Abschnitt 2.5 dargestellt, ist der lineare Kondensstreifenerkennungsalgorithmus ein Detektionsalgorithmus, der lineare Zirrenstrukturen erfasst und quantifiziert. Für den Algorithmus werden keine Sekundärquellen (z. B. Flugverkehrsdaten) herangezogen, die eine Beschränkung der detektierten Objekte auf echte Kondensstreifen erlauben würde. Stattdessen werden durch den Algorithmus in beträchtlichem Umfang auch auf natürlichem Weg gebildete linienförmige Zirrenstrukturen fälschlicherweise als Kondensstreifen erfasst. Dieses Verhalten wurde bereits im Abschnitt 3.2.1 angesprochen und exemplarisch für eine Einzelszene in Abb. 3.2 illustriert. Der Betrag dieses Sockels wird in Abschnitt 3.7 unter Zuhilfenahme verschiedener Transformationsfunktionen (vgl. Abschnitt 2.9) quantifiziert. Allerdings ist –im Gegensatz zum Flugverkehrsaufkommen, das zweite Maximum des Tagesgangs stärker ausgeprägt als das erste Maximum, es liegt um etwa 0,1 Prozentpunkte über dem Wert des ersten Maximums. Ursächlich hierfür könnte einerseits ein nicht konstanter Sockelbetrag sein, d. h. es könnte einen Tagesgang im Aufkommen linearer natürlicher Zirrenstrukturen in NAR geben. Wahrscheinlicher erscheint aber ein Tagesgang in der Detektionseffizienz, vgl. Abschnitt 4.2.

Der Tagesgang der Zirrenbedeckung ähnelt in seiner Form ebenfalls dem Tagesgang der Flugverkehrsdichte, wobei die zeitliche Verzögerung im Auftreten der Maxima größer ist als im Fall der linearen Kondensstreifenbedeckung. Die zeitliche Verschiebung beträgt in diesem Fall zwischen 3 und 5 Stunden (vgl. Tabelle 3.1). Dieses Verhalten unterstützt die aufgestellte Hypothese. In der Zirrenbedeckung sind neben den linearen Kondens-

streifen auch gealterte Kondensstreifen-Zirren (sowie ggf. „soot-cirrus“) enthalten. Das mittlere Alter sowie das flächengewichtete mittlere Alter der enthaltenen flugverkehrsinduzierten Zirrenbedeckung liegt daher sicherlich über dem linearer Kondensstreifen, was einen größeren zeitlichen Versatz verursacht. Wie beim Bedeckungsgrad linearer Kondensstreifen tritt auch bei der Zirrenbedeckung ein Sockelwert auf, auf dem die Variation aufsetzt; dieser Sockel ist natürlich deutlich höher. Dies ist zu erwarten, denn Zirren sind zum größten Teil nicht vom Flugverkehr verursacht. Der Sockelwert ist hier mehr als eine Größenordnung größer als die beobachtete Variation.

Während im oberen Teil der Abb. 3.8 der über acht Jahre gemittelte Tagesgang der linearen Kondensstreifenbedeckung bzw. der Zirrenbedeckung dargestellt ist, sind im unteren Teil der Abbildung auch die acht auf je einem Jahr basierenden Tagesgänge gezeigt. Hier wird ersichtlich, dass in den Tagesgängen insbesondere der Zirrenbedeckung eine große interannuale Variabilität auftritt. Die Jahresmittelwerte der Zirrenbedeckung variieren je nach Jahr zwischen 26 % und 32 %. Leitet man auf der Basis dieser Jahressgänge die Standardabweichung ab, erhält man so eine Überschätzung der Variation des Tagesgangs. Zudem erschwert die Variation der Mittelwerte den Vergleich der Kurven. Aus diesen Gründen wurde in Gl. 2.8 ein Verfahren vorgestellt, das die interannuale Variation der Mittelwerte der betrachteten Größen eliminiert. Die auf diese Weise erhaltenen Tagesgänge sind in Abb. 3.9 dargestellt. Ein Vergleich von Abb. 3.8 und 3.9 zeigt, dass der wesentliche Teil der hohen Standardabweichungen, die in Abb. 3.8 auftraten, durch die interannuale Variabilität des Mittelwerts hervorgerufen werden. Die Variation in der Form des Tagesgangs ist deutlich kleiner. Insbesondere ist die gefundene, dem Flugverkehrstagesgang ähnliche Struktur in allen acht Jahren festzustellen.

### 3.4.2 Tagesgang von LiCC und CC in NAR–W / NAR–E

In Abschnitt 3.1 wurde der Tagesgang der Flugverkehrsdichte in NAR vorgestellt. Die Variation des Flugverkehrsaufkommens im Tagesverlauf ist geprägt durch zwei Maxima, von welchen das erste aus der Hauptflugzeit von Flügen von Amerika nach Europa und das zweite Maximum aus der Hauptflugzeit der Flüge von Europa nach Amerika resultiert. (Koordinaten sind in Tabelle 3.1 aufgeführt). Das Untersuchungsgebiet wird im ersten Fall von West nach Ost durchquert, während im zweiten Fall die Flugzeuge erst den Ostteil und danach den Westteil passieren. Das Untersuchungsgebiet, das eine West-Ost-Ausdehnung von etwa 2500 km aufweist (vgl. Abschnitt 2.2), zeigt dadurch signifikante Unterschiede im Tagesgang der Flugverkehrsdichte, wenn der Ost- und



Westteil separat betrachtet werden. Der Zeitpunkt der Maxima verschiebt sich in der Größenordnung von einer Stunde (vgl. Tabelle 3.1 und Abb. 3.10). Dieses Charakteristikum des Untersuchungsgebietes kann zur Prüfung der Kausalität genutzt werden, denn sowohl der Bedeckungsgrad linearer Kondensstreifen als auch die vom Flugverkehr induzierte Zirrenbedeckung muss dieses Verhalten widerspiegeln. Abb. 3.10 zeigt, dass die in der Flugverkehrsdichte diagnostizierte Verlagerung der Maxima ebenso bei der linearen Kondensstreifenbedeckung (blaue Linien) und bei der Zirrenbedeckung (schwarze Linien) auftritt. Der Effekt ist beim Bedeckungsgrad linearer Kondensstreifen stärker ausgeprägt als bei der Zirrenbedeckung.

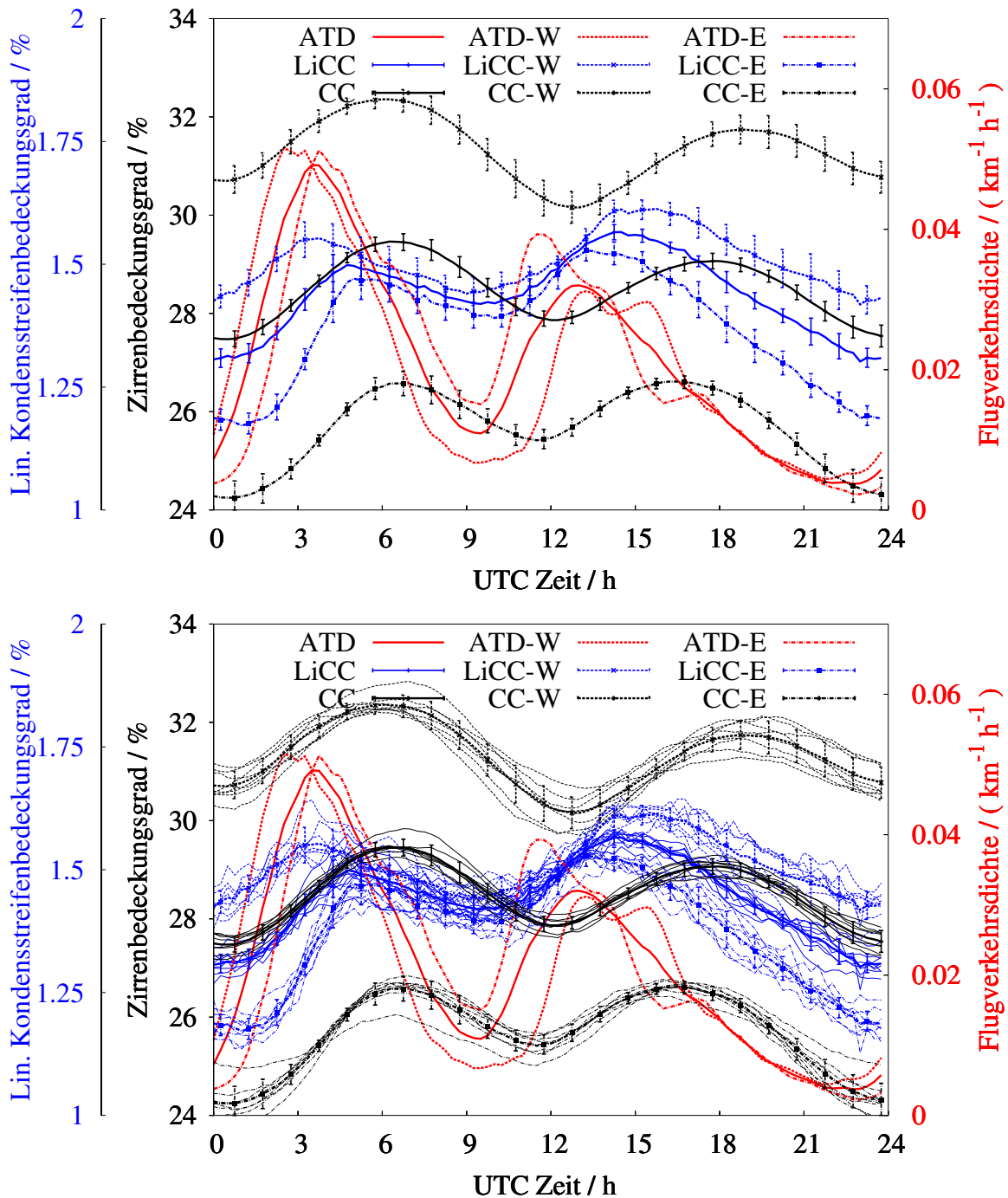


Abbildung 3.10: Oben: Mittlerer Tagesgang der Flugverkehrsichte (ATD, rot), der linearen Kondensstreifenbedeckung (LiCC, blau) sowie der Zirrenbedeckung (CC, schwarz) für das Gesamtgebiet NAR (durchgezogene Linie), sowie für die Westhälfte (-W, gepunktete Linie) und die Osthälfte (-E, Strichpunktlinie). Standardabweichungen wurden wie in Abb. 3.9 unter Elimination der interannualen Variabilität der Tagesgänge nach Gl. 2.8 berechnet. Unten: Wie oben, jedoch sind die jeweils acht nach Gl. 2.8 abgeleiteten Tagesgänge der einzelnen Jahre mit eingezeichnet (dünne Linien).

## 3.5 Tagesgang der Zirrenbedeckung und des langwelligen Strahlungsflusses

Zirren haben einen bedeutenden Einfluss auf den Strahlungstransport und die Strahlungsbilanz der Atmosphäre. Bei der an dieser Stelle betrachteten langwelligen Abstrahlung der Erde am Oberrand der Atmosphäre reduzieren Zirren aufgrund ihrer geringen Temperatur im Allgemeinen die in den Weltraum abgestrahlte Strahlungsflussdichte. Neben einem Tagesgang in der Zirrenbedeckung tragen jedoch weitere Atmosphärenveränderungen zu einem Tagesgang bei OLR bei. Zum einen wird infolge der solaren Einstrahlung im Tagesverlauf die Atmosphäre infolge von Absorption solarer Strahlung an Spurengasen, Aerosolen und Wolken erwärmt (vgl. Abbildung 2.2). Der dadurch verursachte Temperaturanstieg erhöht die thermische Abstrahlung der Erde. Zum anderen führt die solare Einstrahlung zu einer Erwärmung der Erdoberfläche. Diese Erwärmung ist über Landflächen sehr stark, über Wasser ist die Temperaturänderung deutlich kleiner, da sich durch Vermischung die Erwärmung auf ein großes Wasservolumen verteilt. Ein flugverkehrsinduzierter Beitrag zum Tagesgang der Strahlungsflussdichte tritt mit negativem Vorzeichen (verglichen zur Flugverkehrsdichte) auf. Aus diesem Grund werden zur besseren Vergleichbarkeit in den entsprechenden Abbildungen die Flugverkehrsdichte und die flugverkehrsinduzierte Zirrenbedeckung mit gespiegelter Achse dargestellt. Die Reihenfolge der Darstellung entspricht dem Schema aus Abschnitt 3.4.

### 3.5.1 Tagesgang von CC und OLR in NAR

Abbildung 3.11 zeigt, zusammen mit den bereits eingeführten Tagesgängen der Zirrenbedeckung in NAR, den mittleren Tagesgang der ausgehenden langwelligen Strahlungsflussdichte für die gesamten acht betrachteten Jahre (oben) sowie für die einzelnen acht Jahre (unten). Die Tagesgänge von OLR zeigen ein ausgeprägtes Minimum gegen 06:00 UTC, während sich OLR im Zeitraum von 12:00 bis 24:00 UTC weitgehend auf einem Plateau bewegt und kaum Variation zeigt. Die Standardabweichung liegt in der Größenordnung von  $2 \text{ W/m}^2$ . Wendet man jedoch die in Abschnitt 2.8 eingeführte Subtraktion der interannualen Variabilität an, so ergeben sich auch, wie bereits bei LiCC und CC, wesentlich geringere Standardabweichungen (vgl. Abbildung 3.12). Auch bei OLR wird also die interannuale Variabilität hauptsächlich durch die variierenden Jahresmittelwerte verursacht, während die Form des Tagesgangs in den einzelnen Jahren wenig variiert.

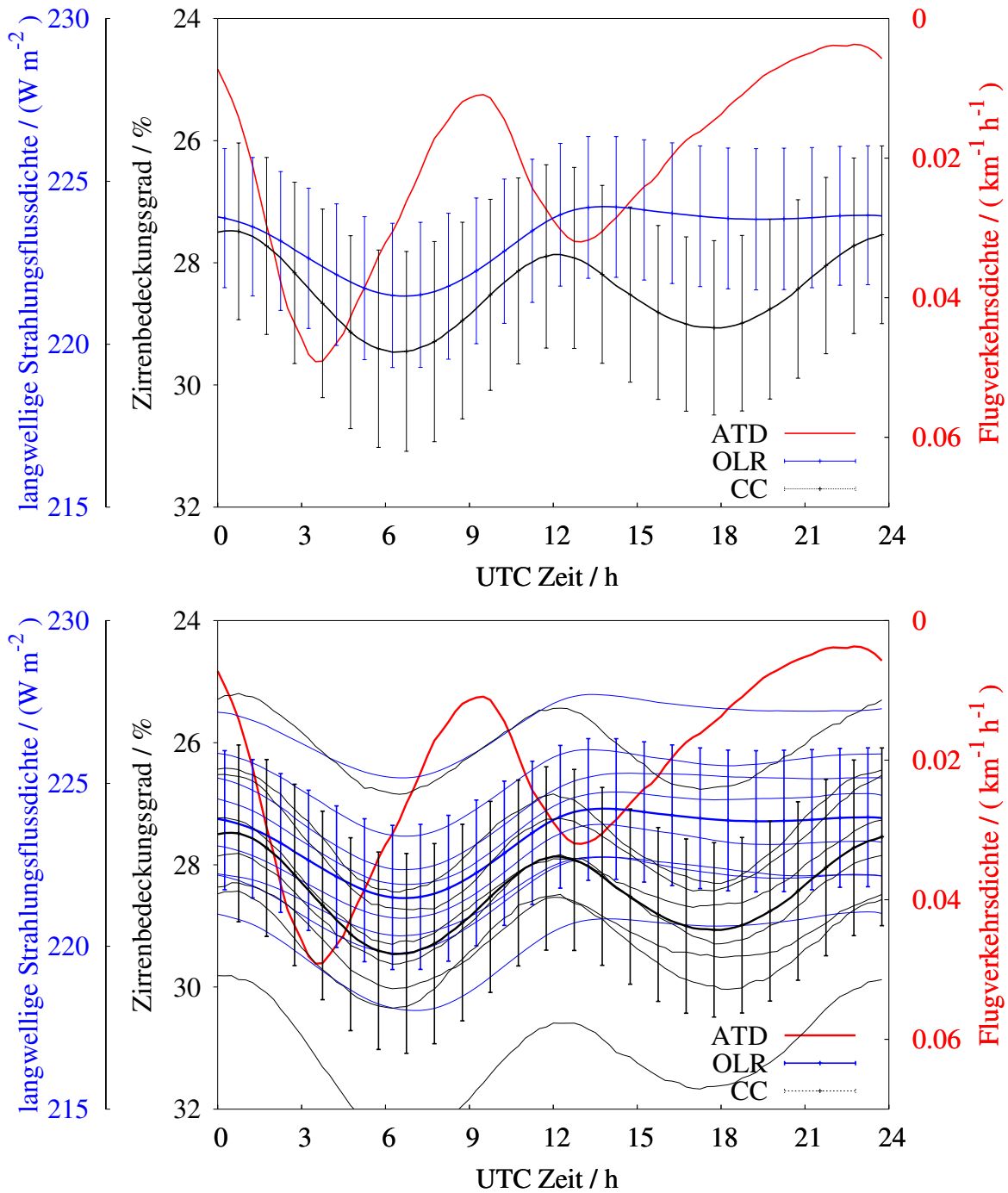


Abbildung 3.11: Oben: Mittlerer Tagesgang der Flugverkehrsdichte (ATD, rot), der Zirrenbedeckung (CC, schwarz) und der am Oberrand der Atmosphäre ausgehenden langwelliger Strahlungsflussdichte (OLR, blau) für NAR. Für CC und OLR sind die Standardabweichungen eingezeichnet, die sich aus der interannualen Variabilität der Tagesgänge der acht einzelnen Jahre, berechnet nach Gl. 2.6, ergeben. Unten: Wie oben, jedoch sind die jeweils acht nach Gl. 2.6 abgeleiteten Tagesgänge der einzelnen Jahre mit eingezeichnet (dünne Linien).

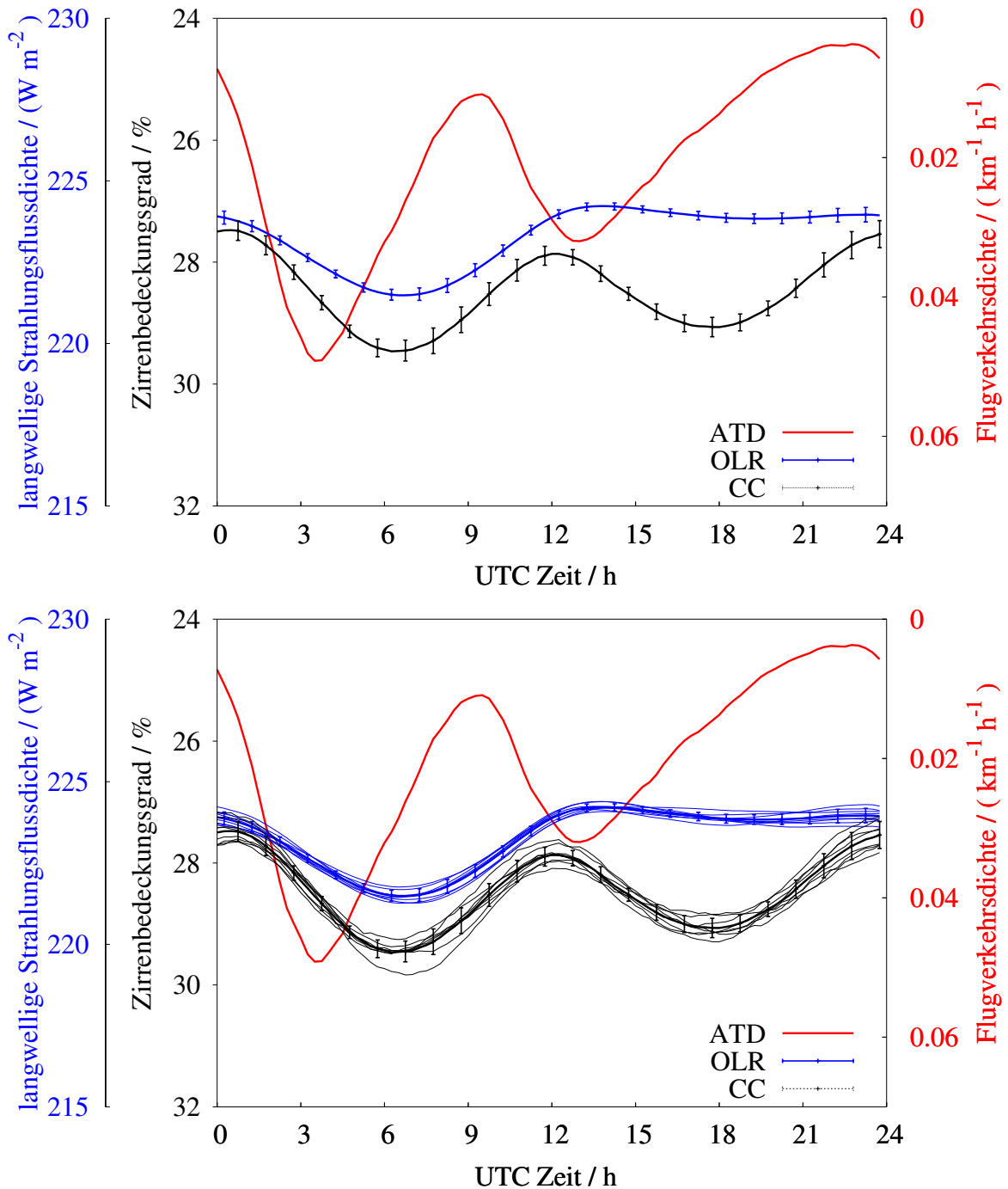


Abbildung 3.12: Wie Abb. 3.11, jedoch sind die eingetragenen Standardabweichungen aus den nach Gl. 2.8 berechneten Tagesgänge der einzelnen Jahre ermittelt worden. Von den Tagesgängen der einzelnen Jahre wurde jeweils der individuelle Mittelwert subtrahiert und der 8-Jahresmittelwert addiert.

### 3.5.2 Tagesgang von CC und OLR in SAR

Wie in Abschnitt 2.10 erläutert, muss zur Quantifizierung der flugverkehrsinduzierten Beiträge zu CC und OLR der natürliche Beitrag zum Gesamttagesgang von CC und OLR angenommen werden. Als eine von drei betrachteten Annahmen im Fall von CC bzw. als eine von zwei betrachteten Annahmen im Fall von OLR wird dafür der jeweils beobachtete Tagesgang von CC bzw. OLR in SAR herangezogen.

Die Abbildungen 3.13 und 3.14 zeigen die in SAR beobachteten Tagesgänge von CC und OLR. In SAR wird bei CC ein Tagesgang beobachtet. Der Befund, dass in der Region SAR, in der Flugverkehrsaufkommen vernachlässigbar gering ist, ein Tagesgang in der Zirrenbedeckung beobachtet werden kann, zeigt, dass auch in der natürlichen Zirrenbedeckung über Ozeanen in den mittleren Breiten ein natürlicher Tagesgang auftreten kann. Im Umkehrschluss lässt sich daraus folgern, dass ein in NAR beobachteter Tagesgang von CC nicht zwangsläufig alleine dem Flugverkehr zuzuschreiben sein wird. In NAR werden daher, wie in Abschnitt 2.10 dargestellt, verschiedene Annahmen über die Form des natürlicherweise zu erwartenden, vom Flugverkehr nicht beeinflussten Tagesgangs der Zirrenbedeckung in NAR untersucht. Der hier gezeigte beobachtete Tagesgang der Zirrenbedeckung in SAR wird dabei als eine von drei Annahmen der Form des natürlichen Tagesgangs in NAR herangezogen. Für die Untersuchung der ausgehenden langwelligen Strahlung gilt diese Argumentation entsprechend.

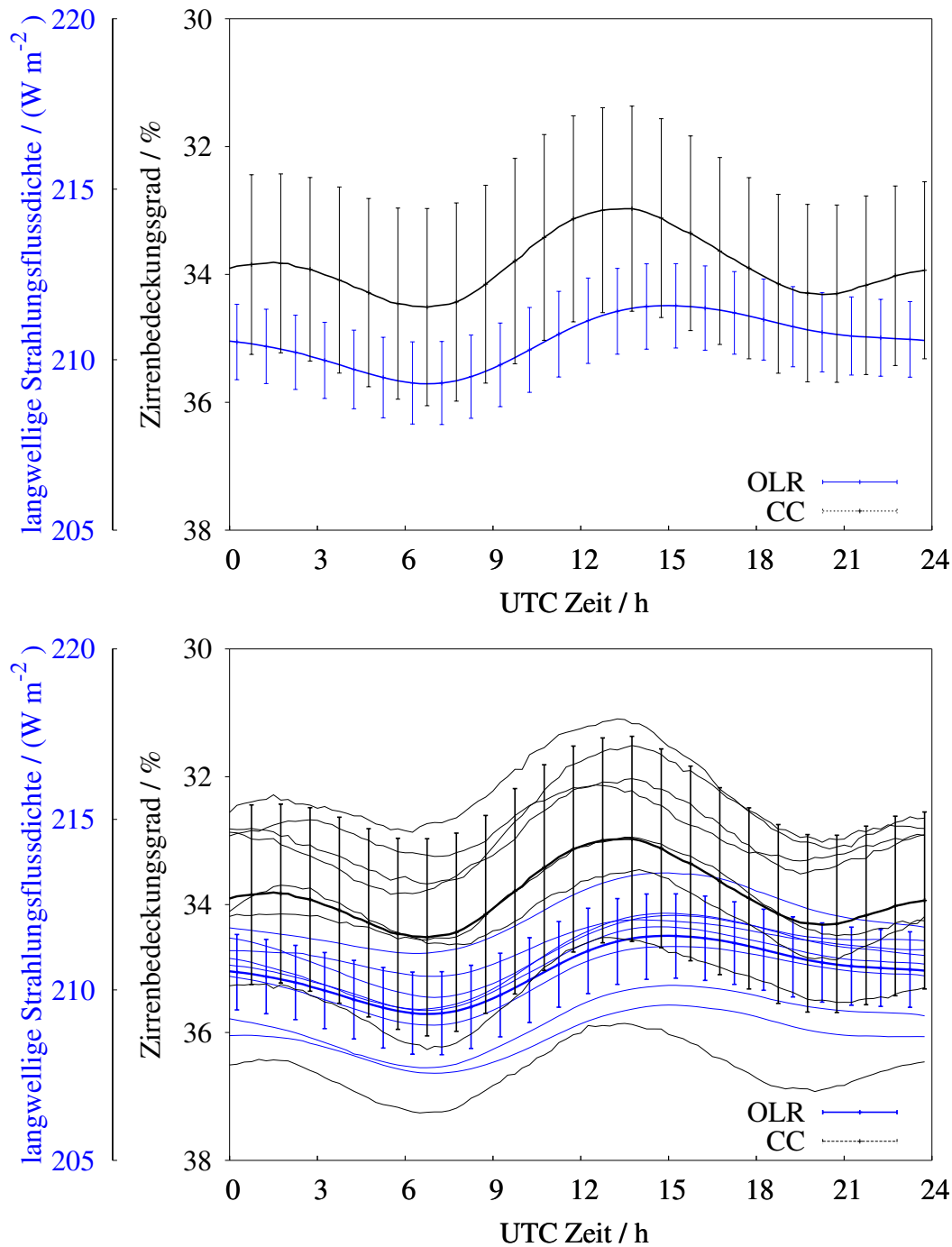


Abbildung 3.13: Oben: Mittlerer Tagesgang der Zirrenbedeckung (CC, schwarz) und der am Oberrand der Atmosphäre ausgehenden langwelligen Strahlungsflussdichte (OLR, blau) in SAR. Für CC und OLR sind die Standardabweichungen eingezeichnet, die sich aus der interannualen Variabilität der Tagesgänge der acht einzelnen Jahre, berechnet nach Gl. 2.6, ergeben. Unten: Wie oben, jedoch sind die jeweils acht nach Gl. 2.6 abgeleiteten Tagesgänge der einzelnen Jahre mit eingezeichnet (dünne Linien).

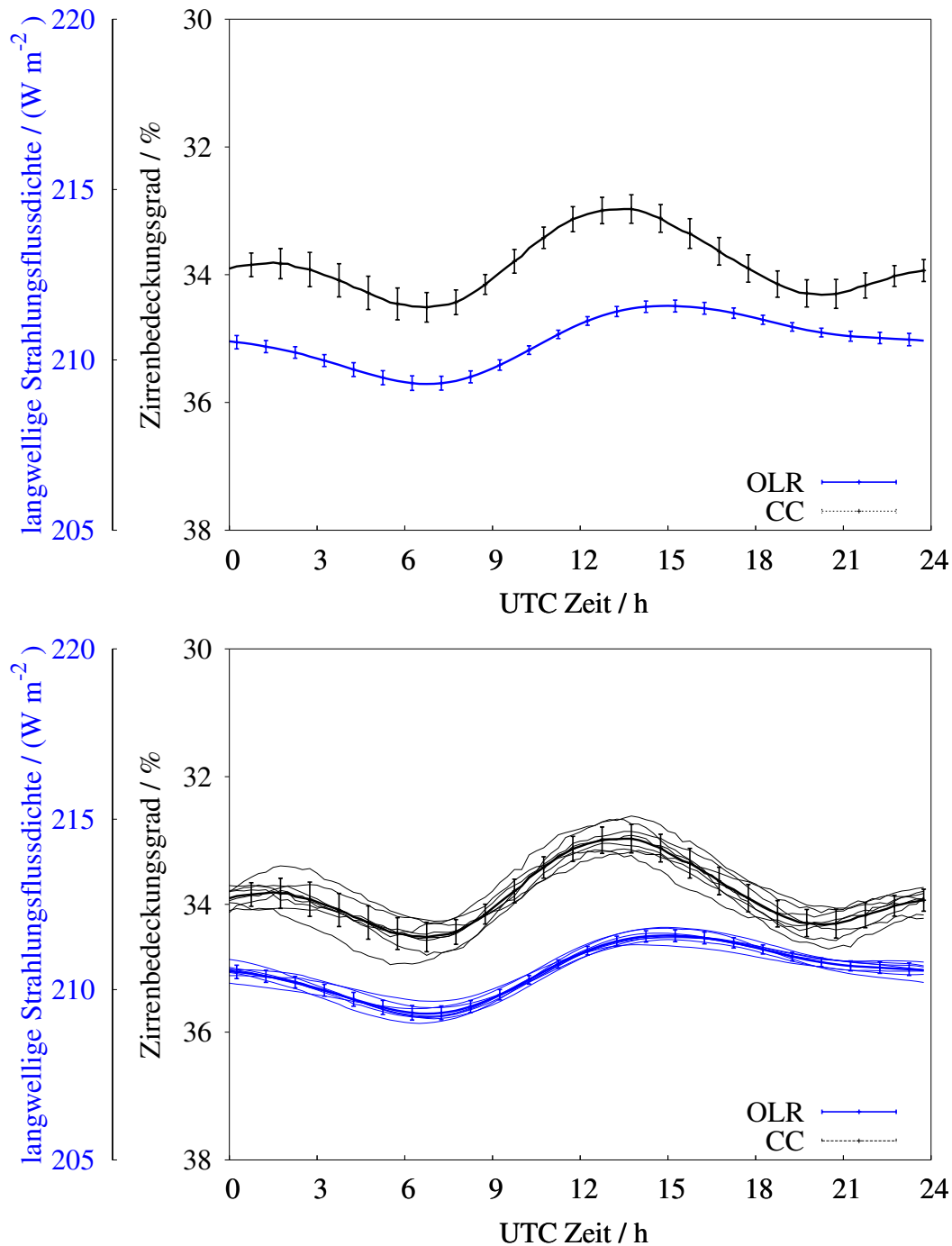


Abbildung 3.14: Wie Abb. 3.13, jedoch sind die eingetragenen Standardabweichungen aus den nach Gl. 2.8 berechneten Tagesgänge der einzelnen Jahre ermittelt worden. Von den Tagesgängen der einzelnen Jahre wurde jeweils der individuelle Mittelwert subtrahiert und der 8-Jahresmittelwert addiert.



## 3.6 Tagesgang der Zirrenbedeckung und der ausgehenden langwelligen Strahlungsflussdichte im ECMWF-Modell

In Abschnitt 2.11 wurde erläutert, auf welchem Weg aus dem ECMWF-Modell ein Tagesgang der Zirrenbedeckung (HCC-ECMWF) und der ausgehenden langwelligen Strahlung abgeleitet werden kann. Abbildung 3.15 zeigt die auf Basis von fünf Modelljahren abgeleiteten Tagesgänge des Modellbedeckungsgrades hoher Wolken im ECMWF (HCC-ECMWF) und der ausgehenden langwelligen Strahlung (TTR-ECMWF). Zum Vergleich sind auch die entsprechenden Tagesgänge der mit MeCiDA2 beobachteten Zirrenbedeckung (CC) und der aus RRUMS abgeleiteten ausgehenden langwelligen Strahlung (OLR) eingezeichnet, wobei diese Tagesgänge zum besseren Vergleich vertikal verschoben wurden. Generell ist festzuhalten, dass die Tagesgänge aus ECMWF geringere Amplituden aufweisen. Dies kann teilweise durch die niedrigere zeitliche Auflösung des Modells (dreistündliche Ausgaben) bedingt sein.

Für die Zirrenbedeckung in NAR ergibt sich keine Korrelation der Tagesgänge ( $\rho=0.09$ ). In SAR sind hingegen Zirrenbedeckung im Modell und die Zirrenbedeckung aus MeCiDA2 – ungeachtet der oben angesprochenen Unterschiede in der Amplitude – stark korreliert ( $\rho = 0.97$ ). Schlussfolgerungen daraus werden in Abschnitt 4.6 betrachtet.

Für OLR wird dagegen auch für NAR eine gute Korrelation zwischen dem flugverkehrsfreien Tagesgang aus TTR-ECMWF und OLR beobachtet. Grund hierfür dürfte die in der langwelligen Strahlung enthaltene natürliche Tagesgangkomponente sein. Diese ist sowohl in OLR als auch in TTR-ECMWF repräsentiert und begründet die beobachtete Korrelation. Dennoch sind auch hier die modellierten Amplituden von TTR-ECMWF kleiner als die beobachteten Amplituden von OLR aus RRUMS.

## 3.7 Quantifizierung der flugverkehrsinduzierten linearen Kondensstreifenbedeckung, Zirrenbedeckung und langwelligen Strahlungsflussänderung in NAR

In Abschnitt 2.9 wurde ein lineares Responsemodell vorgestellt, das auf Basis einer jeweils getroffenen Annahme des natürlichen Hintergrundtagesgangs die Quantifizierung der flugverkehrsinduzierten Beiträge zu den beobachteten Tagesgängen der linea-

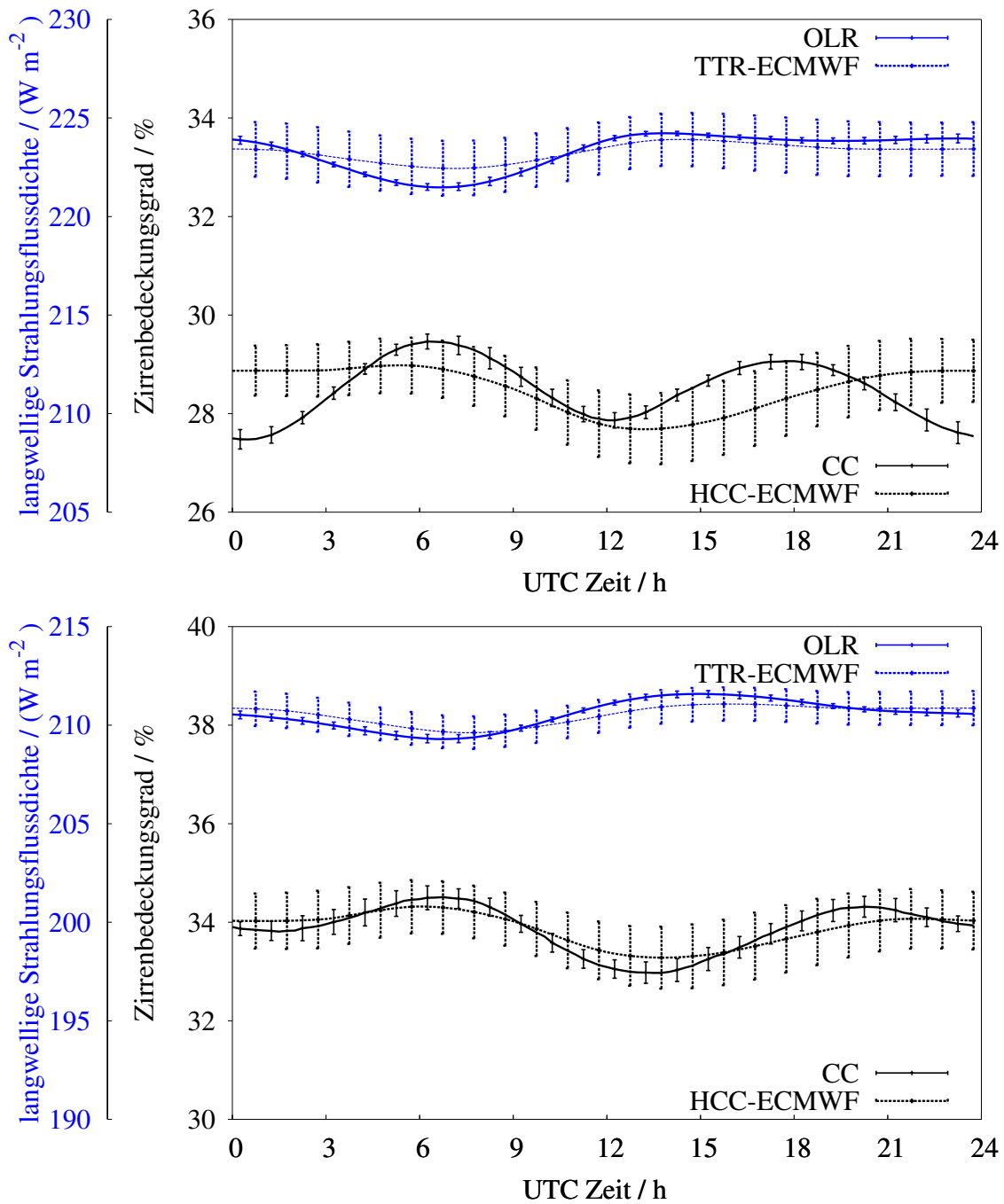


Abbildung 3.15: Mittlerer Tagesgang der aus MeCiDA2 abgeleiteten Zirrenbedeckung (CC, schwarze Linie) und des aus ECMWF abgeleiteten Bedeckungsgrads hoher Wolken (HCC-ECMWF, schwarze gestrichelte Linie) sowie der aus RRUMS abgeleitete Tagesgang der ausgehenden langwelligen Strahlungsflussdichte (OLR, blau, durchgezogene Linie) und der aus ECMWF abgeleitete Tagesgang der langwelligen Strahlungsflussdichte (TTR-ECMWF, blaue gestrichelte Linie), für NAR (oben) und SAR (unten). Die Beobachtungsdaten (CC und OLR) wurden zum besseren Vergleich vertikal verschoben, so dass die Mittelwerte mit den aus ECMWF abgeleiteten Größen übereinstimmen. Die stündlich eingetragenen Standardabweichungen der ECMWF Daten ergeben sich aus der in Abbildung 2.13 dargestellten Interpolation.

### 3.7. Quantifizierung der flugverkehrsinduzierten linearen Kondensstreifenbedeckung, Zirrenbedeckung und langwelligen Strahlungsflussänderung in NAR

---

Wirkung	$b(t_i)$	i	$\tau \pm \sigma(\tau)$	$AIC \pm \sigma(AIC)$	$\rho$	$\chi$
LiCC	0	1	$1,40 \pm 0,45$	$0,096 \pm 0,046$	0,760	0,055
LiCC	0	2	$1,49 \pm 0,56$	$0,104 \pm 0,055$	0,777	0,053
LiCC	0	3	$2,59 \pm 1,82$	$0,140 \pm 0,085$	0,835	0,050

Tabelle 3.2: Ergebnisse des Fits zur Quantifizierung der flugverkehrsinduzierten Beiträge zu LiCC.  $\tau$  ist in h, AIC hier in Bedeckungsgrad-Prozentpunkten angegeben.

ren Kondensstreifenbedeckung, der Zirrenbedeckung und der ausgehenden langwelligen Strahlung erlaubt. Die im Folgenden dargestellten Werte unterscheiden sich geringfügig von den in Graf et al. (2012) dokumentierten Resultaten, da zum einem eine anders implementierte Fitroutine (vgl. Abschnitt 2.8) herangezogen wurde und zum anderen die stellenweise als Hintergrund verwendeten ECMWF-Tagesgänge von HCC und TTR (vgl. Abschnitt 2.11) hier auf Basis der ECMWF-Vorhersagedaten der Jahre 2007 – 2011 (in Graf et al. (2012) wurden nur ECMWF-Daten des Jahres 2011 zugrunde gelegt) abgeleitet wurden. Die Aussagen in Graf et al. (2012) sind davon unberührt.

#### 3.7.1 Quantifizierung der flugverkehrsinduzierten Beiträge zu LiCC in NAR

Im Falle der linearen Kondensstreifenbedeckung wurde die hier verfolgte Methode auf Basis eines angenommenen konstanten Hintergrundes durchgeführt. Tabelle 3.2 listet die Mittelwerte der durch Fit bestimmten Größen auf. Die ermittelte Verzögerungszeit  $\tau$  liegt in einem Bereich von 1,5 – 2,5 Stunden und damit in einem Größenbereich, der für das mittlere Alter linearer Kondensstreifenstrukturen zu erwarten ist. Die aus den Fitparametern abgeleitete lineare Kondensstreifenbedeckung liegt bei 0,1 – 0,15 %. Der im Fit abgeleitete Wert der linearen Kondensstreifenbedeckung ist im Vergleich zu den absolut gemessenen Werten sehr gering, vgl. Abbildung 3.16. Offenbar handelt es sich bei den detektierten Strukturen größtenteils um detektierte lineare Zirrenstrukturen natürlichen Ursprungs. Betrachtet man die in Abb. 2.7 dargestellte Einzelszene und berücksichtigt man, dass für diese Szene ein Fall mit besonders hohem Aufkommen an (flugverkehrsinduzierten) Kondensstreifen diskutiert wurde, erscheint ein solches Verhältnis realistisch. Dieser Befund wird auch durch die Analyse der linearen Kondensstreifenbedeckung in SAR (hier nicht gezeigt) gestützt, die vergleichbare Werte der linearen Kondensstreifenbedeckung liefert, die in SAR jedoch mangels Flugverkehrs zwangsläufig natürlichen Ursprungs sind.

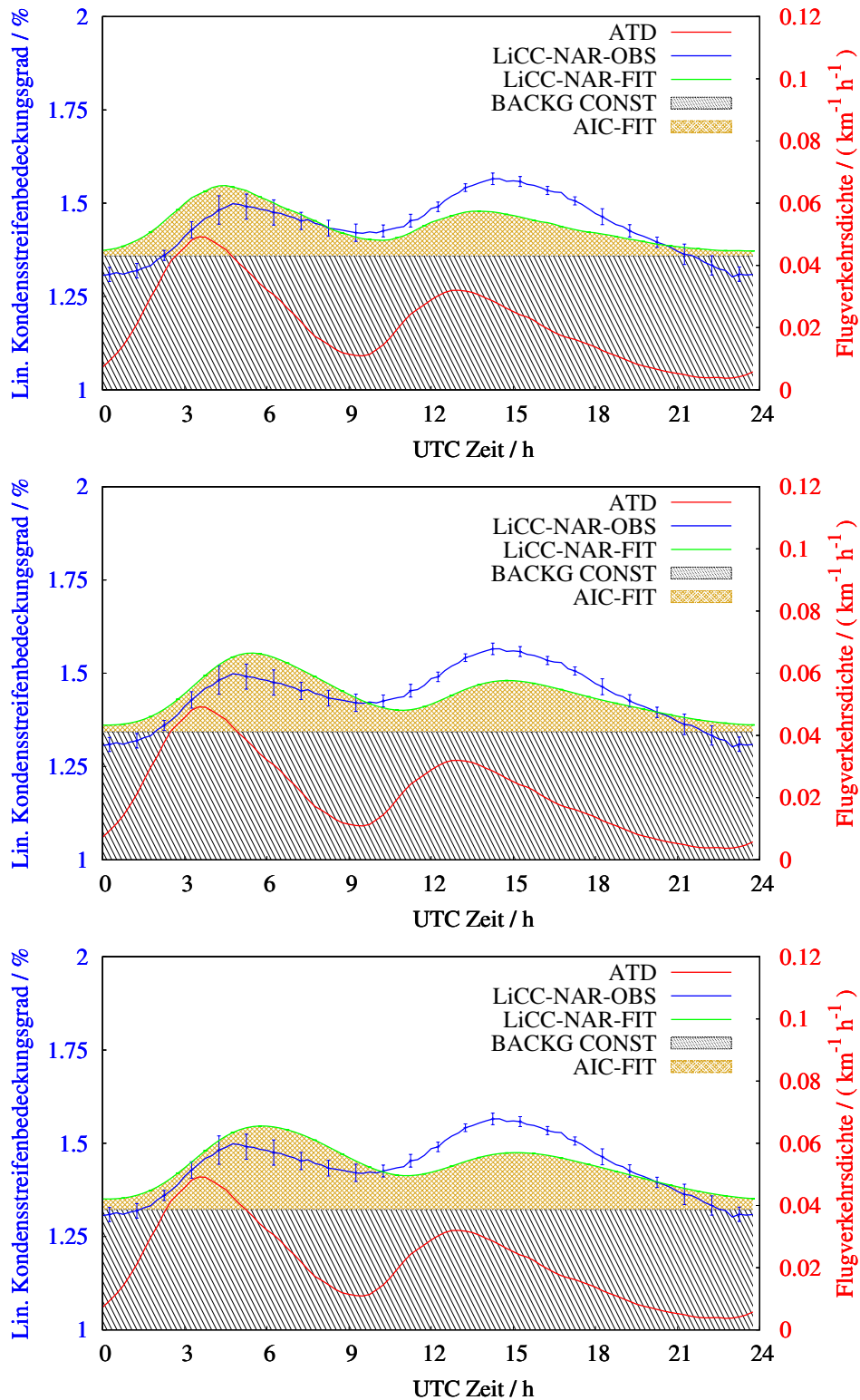


Abbildung 3.16: Mittlerer Tagesgang der Flugverkehrsichte (ATD, rot) und des in NAR beobachteten Tagesgangs der linearen Kondensstreifenbedeckung (blau). Bei Annahme eines konstanten natürlichen Tagesgangs (schwarz) und der Transformationsfunktion  $r_1$  (oben),  $r_2$  (Mitte) bzw.  $r_3$  (unten) ergibt sich jeweils der modellierte Tagesgang der Zirrenbedeckung (grün) als Superposition eines konstanten Sockels (schwarz schraffiert) und des durch die Transformationsfunktion definierten flugverkehrsinduzierten Anteils (braun schraffiert).

Abb. 3.16 zeigt die Resultate des Fits für die drei betrachteten Transformationsfunktionen für den Fall eines angenommenen konstanten Hintergrunds von fälschlicherweise als Kondensstreifen detektierten linearen Zirrenstrukturen. Die durch den Fit ermittelten Tagesgänge von LiCC können hier bei allen drei betrachteten Transformationsfunktionen den beobachteten Tagesgang nur beschränkt erklären. Auch die ermittelten Korrelationskoeffizienten liegen im Bereich von 0,7–0,8 (vgl. Tabelle 3.2). Insbesondere wird stets ein höheres erstes Maximum modelliert, das durch das höhere erste Maximum der Flugverkehrsdichte verursacht wird. In den Beobachtungen ist hingegen das zweite Maximum stärker ausgeprägt. Ein möglicher Grund für diese Diskrepanz wäre zunächst ein tatsächlich vorhandener Tagesgang im Auftreten linienförmiger natürlicher Zirrenstrukturen. Wahrscheinlicher ist aber ein Tagesgang in der Detektionseffizienz des linearen Kondensstreifenerkennungsalgorithmus (vgl. Diskussion in Abschnitt 4.2). Zudem ist bekannt, dass der Kondensstreifenerkennungsalgorithmus bei zunehmendem Überlapp vieler Kondensstreifen Detektionsschwierigkeiten zeigt, da dann lineare Strukturen nicht mehr so gut isoliert zu erkennen sind (Mannstein et al. 1999; Duda et al. 2013).

Auf eine tiefere Analyse der linearen Kondensstreifenbedeckung wird an dieser Stelle verzichtet. Lineare Kondensstreifen sind eine schlecht definierte Größe (vgl. Abschnitt 1.1). Es ist gerade ein Vorteil der in dieser Arbeit verfolgten Methode, eine Quantifizierung der flugverkehrsinduzierten Zirrenbedeckung ohne Zuhilfenahme eines Linearitätskriteriums durchführen zu können. Linienförmige Kondensstreifen werden in dieser Arbeit daher in erster Linie als Kausalitätsstütze und zur Konsistenzprüfung genutzt.

### 3.7.2 Quantifizierung der flugverkehrsinduzierten Beiträge zu CC in NAR

Anders als im Fall der linearen Kondensstreifenbedeckung wurden zur Quantifizierung der flugverkehrsinduzierten Zirrenbedeckung in NAR drei verschiedene Annahmen über die Form des natürlichen Tagesgangs der Zirrenbedeckung untersucht (vgl. Abschnitt 2.10). Zusammen mit den drei betrachteten Transformationsfunktionen ergeben sich damit neun verschiedene Kombinationen von Hintergrund und Transformationsfunktion. Tabelle 3.3 listet für all diese Kombinationen die Resultate für die Verzögerungszeit  $\tau$  und den modellierten Wert der flugverkehrsinduzierten Zirrenbedeckung AIC sowie die erzielte Qualität des Fits hinsichtlich des Korrelationskoeffizienten  $\rho$  und

Wirkung	$b(t_i)$	i	$\tau \pm \sigma(\tau)$	AIC $\pm \sigma(\text{AIC})$	$\rho$	$\chi$
CC	0	1	$2,72 \pm 0,24$	$0,89 \pm 0,21$	0,90	0,37
CC	0	2	$2,83 \pm 0,20$	$1,09 \pm 0,27$	0,90	0,34
CC	0	3	$3,29 \pm 1,09$	$1,37 \pm 0,34$	0,87	0,35
CC	SAR	1	$2,28 \pm 0,52$	$0,76 \pm 0,34$	0,77	0,45
CC	SAR	2	$2,76 \pm 1,16$	$1,01 \pm 0,55$	0,85	0,41
CC	SAR	3	$3,83 \pm 1,61$	$1,57 \pm 0,89$	0,89	0,50
CC	HCC-ECMWF	1	$2,89 \pm 0,22$	$0,91 \pm 0,29$	0,79	0,49
CC	HCC-ECMWF	2	$3,33 \pm 0,74$	$1,23 \pm 0,42$	0,85	0,43
CC	HCC-ECMWF	3	$4,68 \pm 1,02$	$2,05 \pm 0,65$	0,91	0,34

Tabelle 3.3: Ergebnisse des Fits zur Quantifizierung der flugverkehrsinduzierten Beiträge zu CC. Die Verzögerungszeit  $\tau$  ist in h, AIC in Bedeckungsgrad-Prozentpunkten angegeben.

Feld	$b(t_i)$	i	$\tau \pm \sigma(\tau)$	AIC $\pm\sigma(\text{AIC})$	$\rho$	$\chi$
OLR	SAR	1	$2,34 \pm 0,24$	$564 \pm 210$	0,91	23
OLR	SAR	2	$2,51 \pm 0,23$	$683 \pm 268$	0,94	20
OLR	SAR	3	$2,83 \pm 0,45$	$866 \pm 347$	0,96	17
OLR	TTR-ECMWF	1	$2,04 \pm 0,48$	$608 \pm 163$	0,78	36
OLR	TTR-ECMWF	2	$2,46 \pm 1,15$	$690 \pm 329$	0,82	33
OLR	TTR-ECMWF	3	$2,84 \pm 1,72$	$849 \pm 389$	0,82	33

Tabelle 3.4: Ergebnisse des Fits zur Quantifizierung der flugverkehrsinduzierten Beiträge zu OLR. Die Verzögerungszeit  $\tau$  ist in h, die Wirkung AIC in  $\text{mW}/\text{m}^2$  angegeben.

der Abweichung  $\chi$  auf. Die Werte der Verzögerungszeit  $\tau$  liegen hier je nach Konfiguration zwischen 2,7 und 4,7 Stunden. Die flugverkehrsinduzierte Zirrenbedeckung liegt zwischen 0,8 und 2,0 %. Die erreichten Korrelationskoeffizienten zwischen beobachtetem Tagesgang und modelliertem Tagesgang liegen im Bereich zwischen 0,77 und 0,91.

### 3.7.3 Quantifizierung der flugverkehrsinduzierten Beiträge zu OLR in NAR

Zur Quantifizierung des flugverkehrsinduzierten Beitrags zur ausgehenden langwelligen Strahlungsflussdichte in NAR werden zwei verschiedene Annahmen über die Form des natürlichen Tagesgangs von OLR untersucht (vgl. Abschnitt 2.10). Zusammen mit den drei betrachteten Transformationsfunktionen ergeben sich damit sechs verschiedene Kombinationen von Hintergrund und Transformationsfunktion. Tabelle 3.4 listet für

3.7. Quantifizierung der flugverkehrsinduzierten linearen Kondensstreifenbedeckung, Zirrenbedeckung und langwelligen Strahlungsflussänderung in NAR

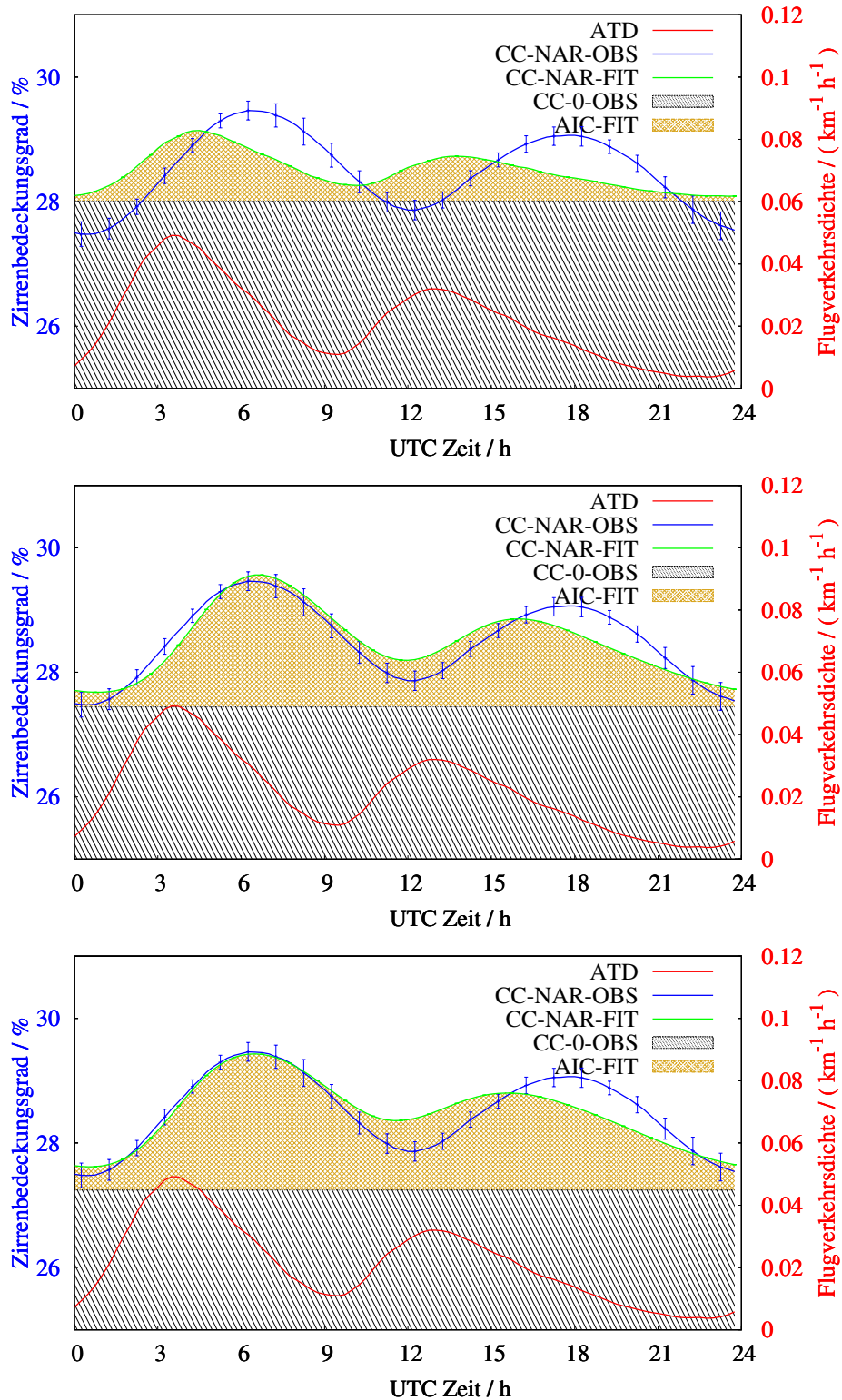


Abbildung 3.17: Mittlerer Tagesgang der Flugverkehrsdichte (rot) und der Zirrenbedeckung (blau) in NAR. Bei Annahme eines konstanten natürlichen Tagesgangs (schwarz) und der Transformationsfunktionen  $r_1$  (oben),  $r_2$  (Mitte) bzw.  $r_3$  (unten) ergibt sich jeweils der modellierte Tagesgang der Zirrenbedeckung (grün) als Superposition des Hintergrunds (schwarz schraffiert) und des durch die Transformationsfunktion definierten flugverkehrsinduzierten Anteils AIC (braun schraffiert).

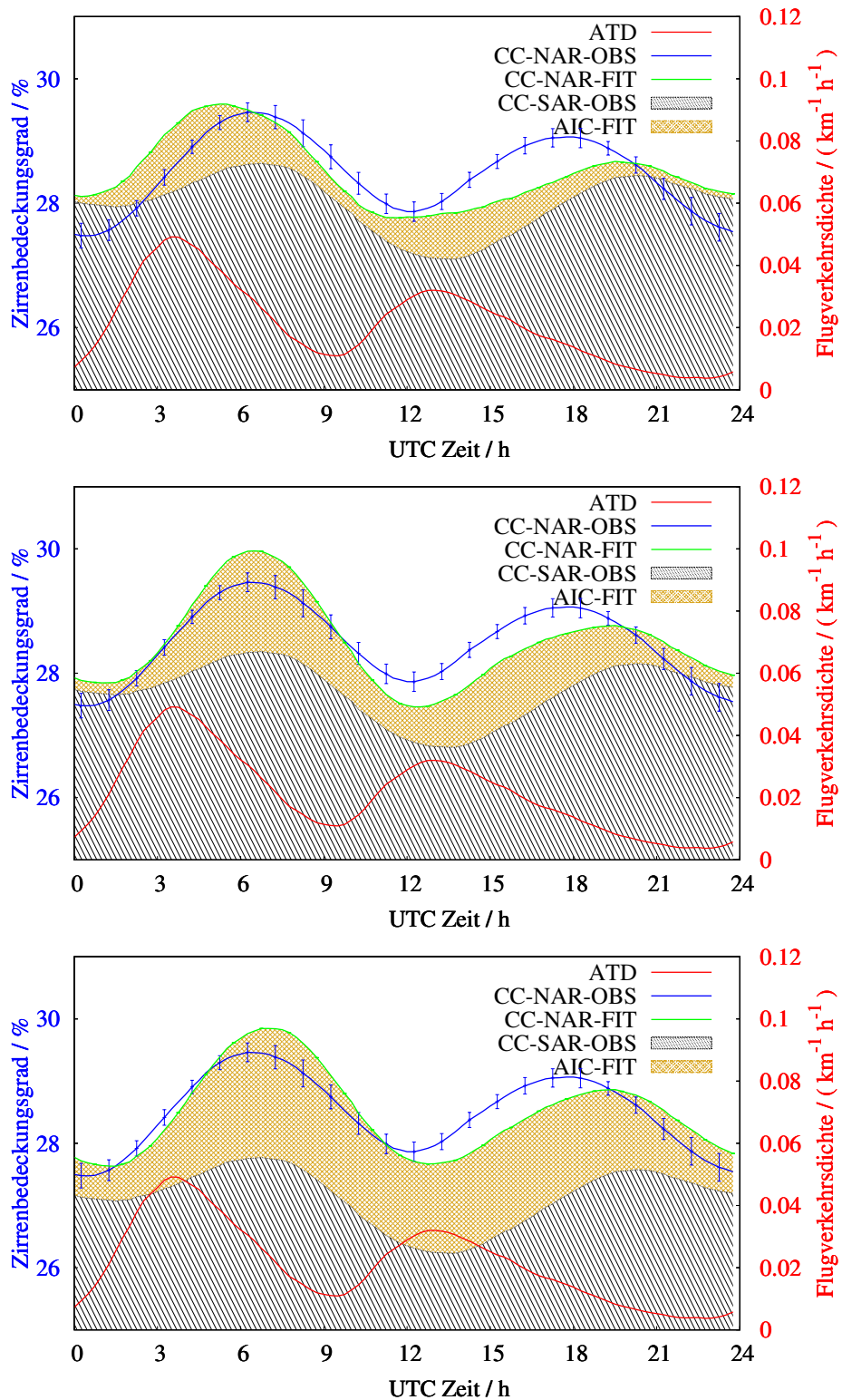


Abbildung 3.18: Mittlerer Tagesgang der Flugverkehrsdichte (rot) und der Zirrenbedeckung (blau) in NAR. Bei Annahme der in SAR beobachteten Variation im Tagesgang (schwarz) und der Transformationsfunktionen  $r_1$  (oben),  $r_2$  (Mitte) bzw.  $r_3$  (unten) ergibt sich jeweils der modellierte Tagesgang der Zirrenbedeckung (grün) als Superposition des Hintergrunds (schwarz schraffiert) und des durch die Transformationsfunktion definierten flugverkehrsinduzierten Anteils AIC (braun schraffiert).



3.7. Quantifizierung der flugverkehrsinduzierten linearen Kondensstreifenbedeckung, Zirrenbedeckung und langwelligen Strahlungsflussänderung in NAR

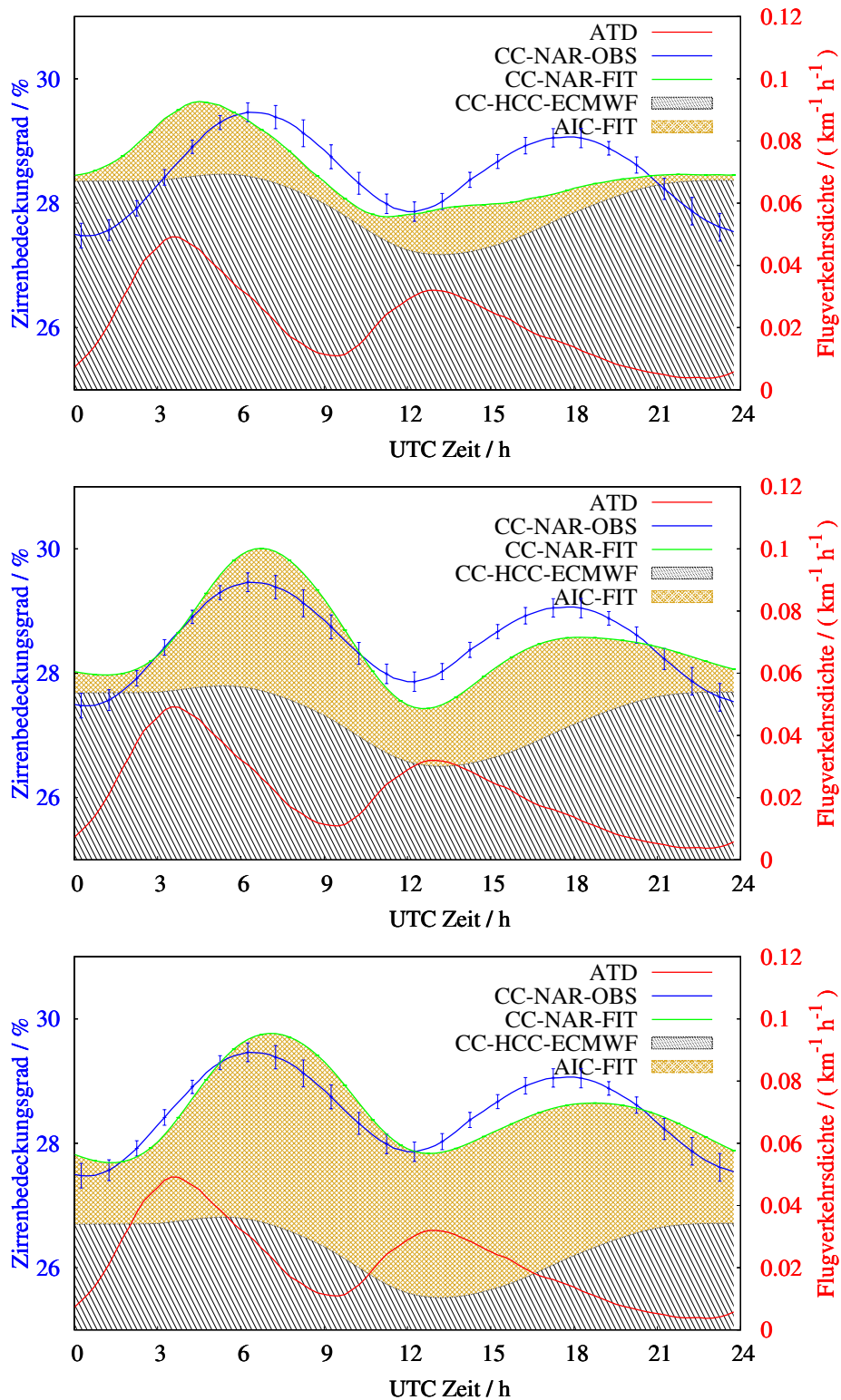


Abbildung 3.19: Mittlerer Tagesgang der Flugverkehrsdichte (rot) und der Zirrenbedeckung (blau) in NAR. Bei Annahme der in ECMWF-HCC beobachteten Variation im Tagesgang (schwarz) und der Transformationsfunktionen  $r_1$  (oben),  $r_2$  (Mitte) bzw.  $r_3$  (unten) ergibt sich jeweils der modellierte Tagesgang der Zirrenbedeckung (grün) als Superposition des Hintergrunds (schwarz schraffiert) und des durch die Transformationsfunktion definierten flugverkehrsinduzierten Anteils AIC (braun schraffiert).

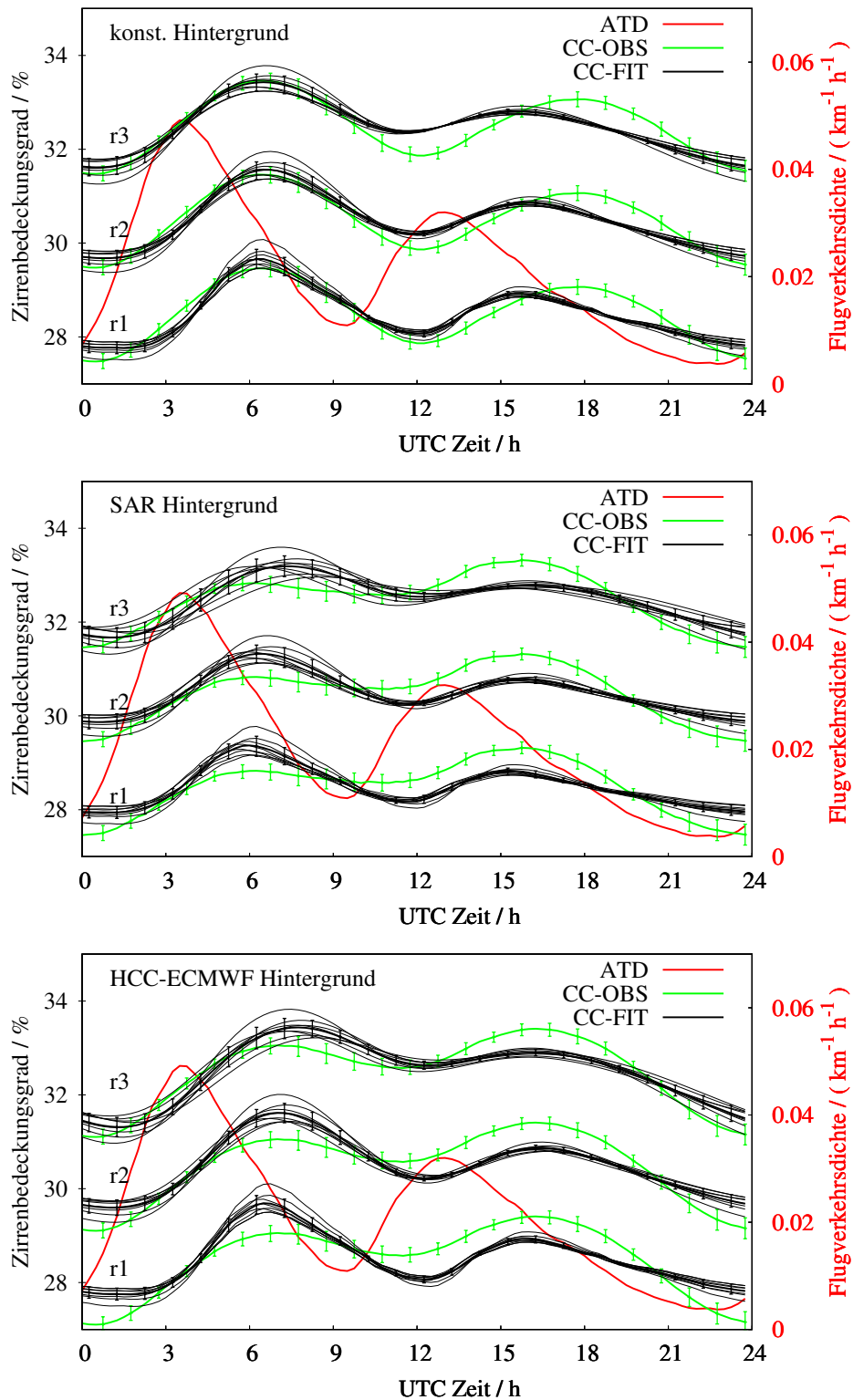


Abbildung 3.20: Mittlerer Tagesgang der Flugverkehrsdichte (ATD, rot), der in NAR beobachteten Zirrenbedeckung (grün, interannuale Variabilität subtrahiert), und der modellierten Zirrenbedeckung (schwarz), für konstanten Hintergrund (oben), SAR-Hintergrund (Mitte) und HCC-ECMWF-Hintergrund (unten). Zur besseren Unterscheidung sind die Tagesgänge für die Transformationsfunktionen  $r_2$  und  $r_3$  durch Addition von 2 % bzw. 4 % separiert.

3.7. Quantifizierung der flugverkehrsinduzierten linearen Kondensstreifenbedeckung, Zirrenbedeckung und langwelligen Strahlungsflussänderung in NAR

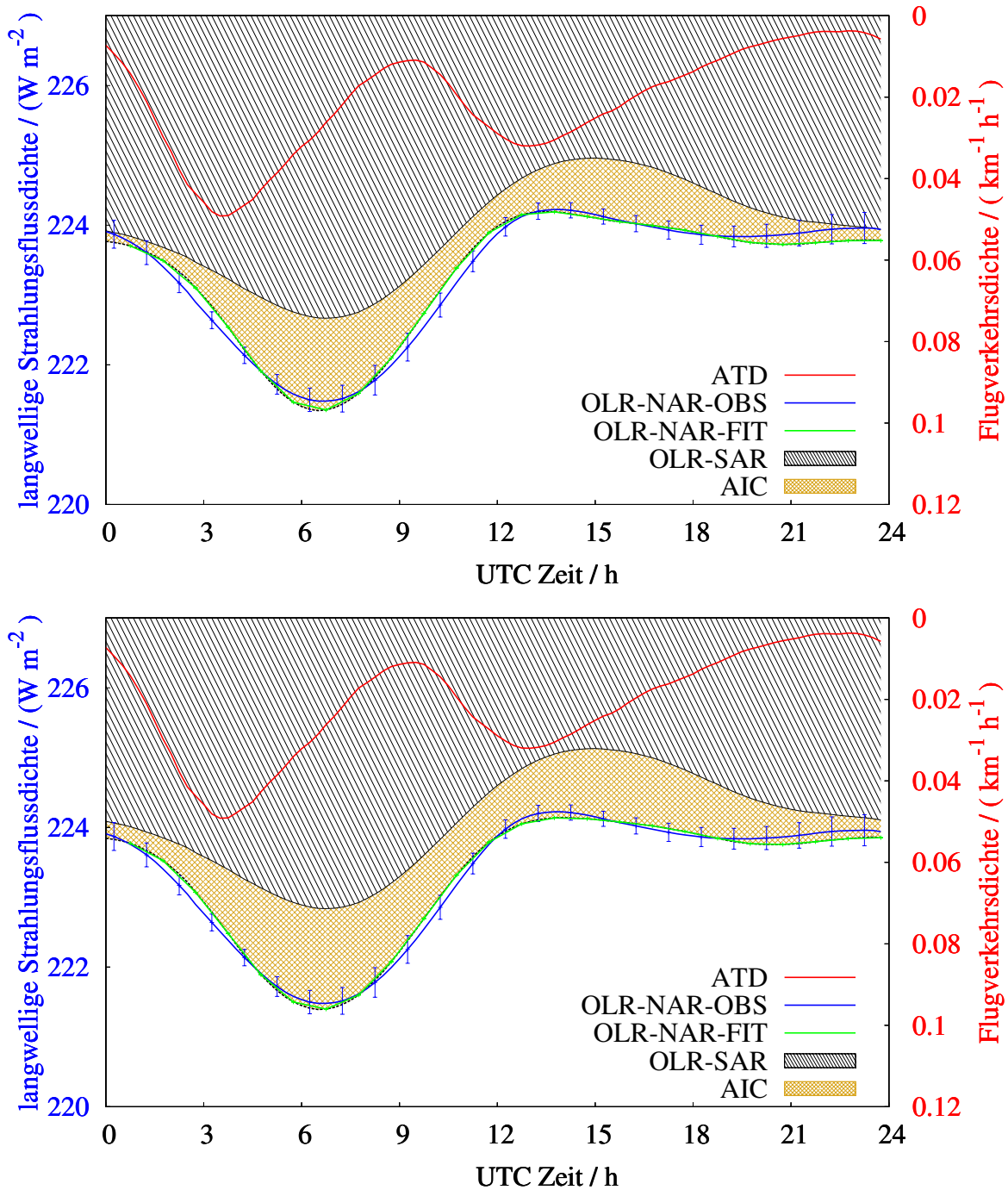


Abbildung 3.21: Oben: Mittlerer Tagesgang der Flugverkehrsdichte (ATD, rot) und des in NAR beobachteten Tagesgangs der ausgehenden langwelligen Strahlung (blau). Bei Annahme der in SAR beobachteten Variation im Tagesgang (schwarz) und der Transformationsfunktion  $r_2$  ergibt sich der modellierte Tagesgang der ausgehenden langwelligen Strahlung (grün) als Superposition des Hintergrunds (schwarz schraffiert) und des durch die Transformationsfunktion definierten flugverkehrsinduzierten Anteils AIC (braun schraffiert). Unten: Wie oben, jedoch auf Grundlage von Transformationsfunktion  $r_3$ .

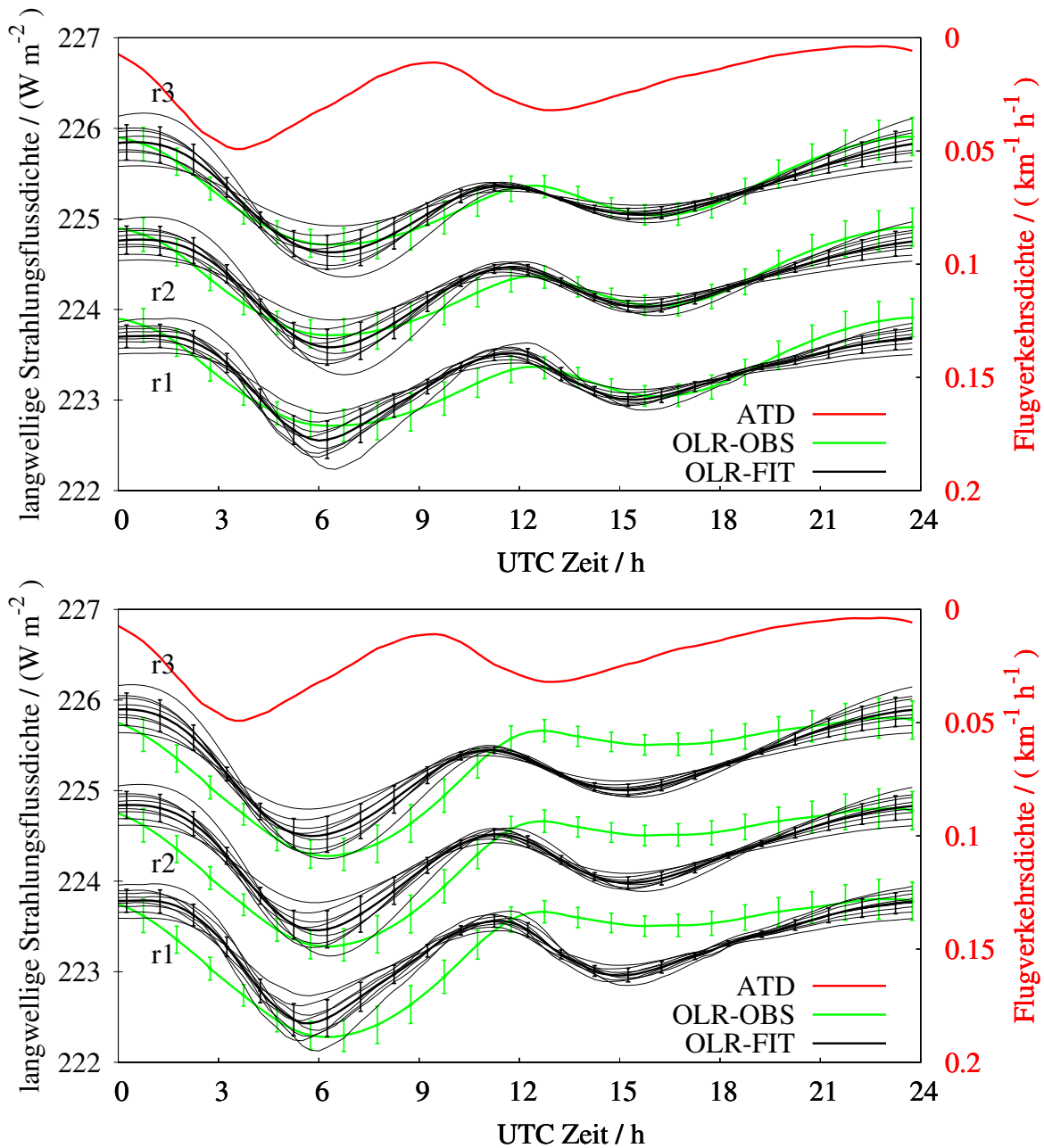


Abbildung 3.22: Mittlerer Tagesgang der Flugverkehrsichte (ATD, rot), der in NAR beobachteten ausgehenden langwelligen Strahlung (grün, interannuale Variabilität subtrahiert), und der modellierten ausgehenden langwelligen Strahlung (schwarz), für SAR-Hintergrund (oben) und HCC-ECMWF-Hintergrund (unten). Zur besseren Unterscheidung sind die Tagesgänge für die Transformationsfunktionen  $r_2$  und  $r_3$  durch Addition von festen Beträgen separiert.

all diese Kombinationen die Resultate für die Verzögerungszeit  $\tau$  und den modellierten Wert der flugverkehrsinduzierten Änderung der Strahlungsflussdichte sowie die erzielte Qualität des Fits hinsichtlich der Korrelation  $\rho$  und der Abweichung  $\chi$  auf. Die Werte der Verzögerungszeit  $\tau$  liegen hier je nach Konfiguration zwischen 2,7 und 4,7 Stunden. Die flugverkehrsinduzierte Wirkung beträgt je nach betrachteter Konstellation zwischen  $550 \text{ mW/m}^2$  und  $850 \text{ mW/m}^2$ . Die erreichten Korrelationskoeffizienten zwischen beobachtetem Tagesgang und modelliertem Tagesgang liegen im Bereich zwischen 0,78 und 0,96.

### 3.8 Vergleich mit MODIS

Wie im Abschnitt 1.1 angeführt, wurde der lineare Kondensstreifenbedeckungsgrad in der Nordhemisphäre auf Basis von MODIS-Daten des Satelliten Aqua quantifiziert (Duda et al. 2013). Aqua bewegt sich auf einer polaren, sonnensynchronen Erdumlaufbahn und überfliegt das Nordatlantikgebiet um 01:30 und 13:30 Lokalzeit (LT). Zwischenzeitlich konnten Duda et al. die Analyse auch auf MODIS-Daten des Satelliten Terra ausdehnen. Terra bewegt sich ebenso auf einer polaren, sonnensynchronen Umlaufbahn mit Überflugszeiten um 10:30 und 22:30 LT. Damit wird der Tagesgang der Kondensstreifenbedeckung in NAR zumindest begrenzt durch diese vier Stützstellen abgebildet. Ein Vergleich der in NAR detektierten Kondensstreifenbedeckung in MODIS zu den vier Überflugszeiten erlaubt einerseits einen Konsistenztest der aus Meteosat-SEVIRI zu den korrespondierenden Uhrzeiten abgeleiteten Kondensstreifenbedeckung, andererseits kann durch diesen Vergleich aber auch die untersuchte These eines zeitlich variablen flugverkehrsinduzierten Beitrags zum Tagesgang von CC und OLR auf ihre Plausibilität hin geprüft werden.

Die auf den NASA-Satelliten Aqua und Terra installierten MODIS-Instrumente decken das NAR Gebiet nicht in einem Überflug ab. Stattdessen setzen sich die in Duda et al. (2013) abgeleiteten Produkte aus mehreren aufeinanderfolgenden Überflügen, die infolge der sonnensynchronen polaren Umlaufbahn jeweils dieselbe Lokalzeit repräsentieren, zusammen. Näherungsweise kann man aber diesen Produkten eine UTC-Zeit zuordnen, die den Vergleich zu aus MSG abgeleiteten Produkten einer bestimmten UTC-Zeit erlaubt. Für die folgende Gegenüberstellung wird näherungsweise der  $30^\circ \text{ W}$  Meridian als Referenzwert definiert, die Zeitdifferenz zwischen Lokalzeit (LT) und UTC Zeit beträgt dort zwei Stunden, es wird also die Zuordnung  $22:30 \text{ LT} \iff 00:30 \text{ UTC}$ ,

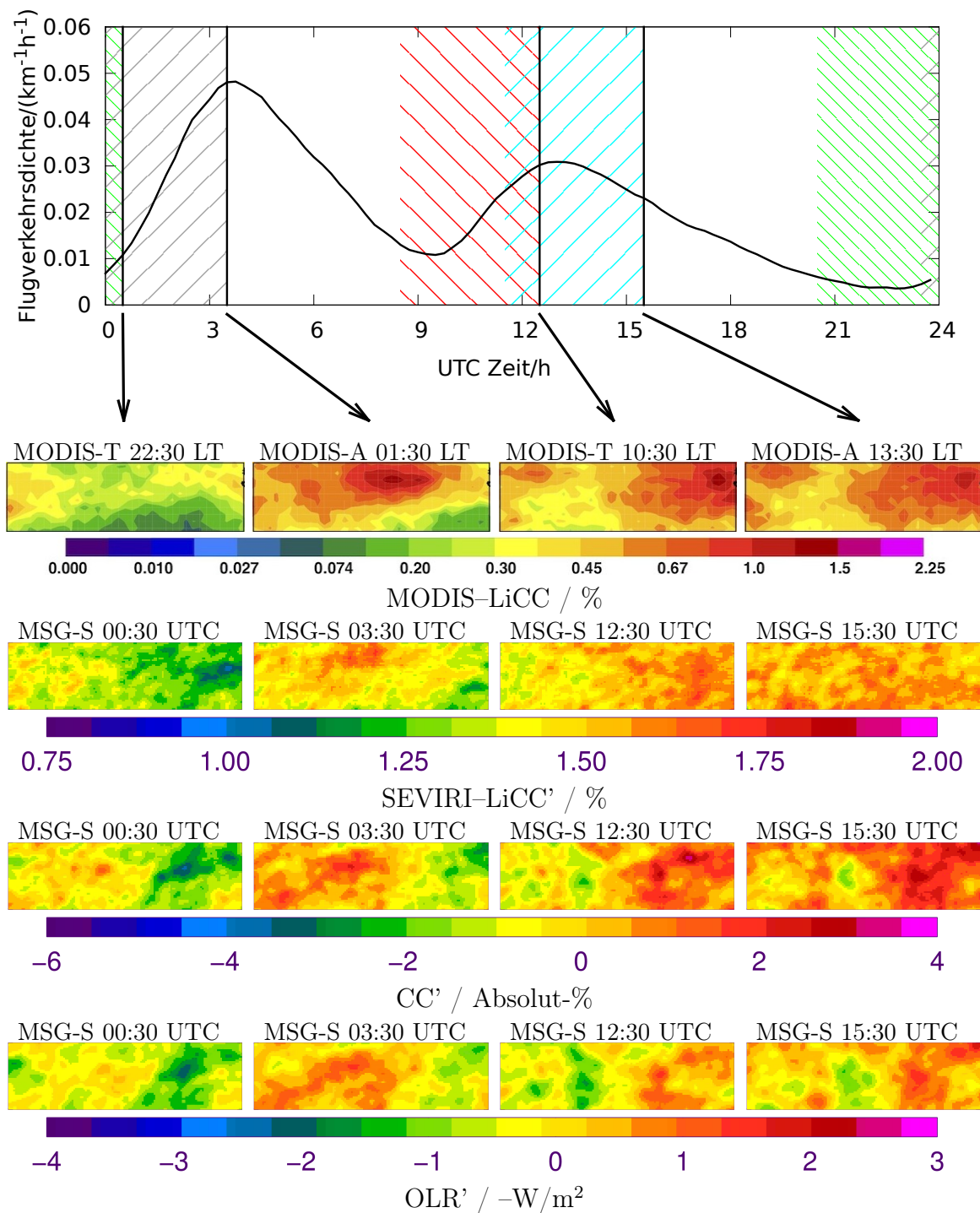


Abbildung 3.23: Oben: Tagesgang der Flugverkehrsichte (schwarze Kurve), UTC-angenäherter mittlere Zeitpunkte der MODIS-Überflüge in NAR (schwarze vertikale Linien) und 4-Stunden Zeitfenster vor diesen Überflügen (schraffiert). Unten: Mittlerer MODIS-LiCC (1. Zeile, Methode nach Duda et al. 2013, mittlere Sensitivität, Ursprungsabbildungen bereitgestellt von D. Duda), SEVIRI-LiCC' (2. Zeile), CC' (3. Zeile) und OLR' (4. Zeile). SEVIRI-LiCC', CC' und OLR' wurden mit einem boxcar-Filter mit Weite 5 geglättet (SMOOTH-Routine, siehe Handbuch IDL 7.0)). Alle Abbildungen repräsentieren das Gebiet NAR ( $45^{\circ}$  W –  $10^{\circ}$  W,  $45^{\circ}$  N –  $55^{\circ}$  N).

01:30 LT  $\iff$  03:30 UTC, 10:30 LT  $\iff$  12:30 UTC und 13:30 LT  $\iff$  15:30 UTC zugrunde gelegt. In Abbildung 3.23 ist diese Zuordnung für die Markierung der Überflugszeiten im Diagramm des Tagesgangs der Flugverkehrsdichte zugrunde gelegt. Zudem sind die Zeitfenster, die in einem Intervall von vier Stunden vor den einzelnen MODIS-Überflügen liegen, schraffiert dargestellt. Wie in Duda et al. (2013) erläutert, wurden für die Validierung der aus MODIS abgeleiteten Kondensstreifen (MODIS-LiCC) Flugverkehrsinformationen der vier vorausgehenden Stunden herangezogen und Kondensstreifen, die keinem Flugverkehrsereignis zugeordnet werden konnten, verworfen. An dieser Stelle sollen die schraffierten Gebiete indes nur illustrativen Charakter haben und das akkumulierte Flugverkehrsaufkommen vor den jeweiligen Überflügen verdeutlichen.

Abbildung 3.23 zeigt in der ersten Zeile des unteren Abschnittes die mittleren Werte von MODIS-LiCC für das Jahr 2006 in NAR für 22:30, 01:30, 10:30 und 13:30 LT. Diese Ausschnitte wurden aus Abbildungen der hemisphärischen jahresgemittelten MODIS-LiCC für das Jahr 2006, die von D. Duda bereitgestellt wurden<sup>4</sup>, extrahiert. Für den Überflug von Terra um 22:30 LT werden geringe Werte der linearen Kondensstreifenbedeckung ermittelt (Mittelwert 0,257 %, D. Duda, pers. Komm.). Nur drei Stunden später, um 01:30 LT, wird aus Aqua eine mehr als doppelt so hohe Kondensstreifenbedeckung abgeleitet (Mittelwert in NAR 0,547 %, D. Duda, pers. Komm.). Der Grund für diesen starken Anstieg in dieser kurzen Zeitspanne ergibt sich aus dem mittlerweile eingetretenen Flugverkehrsmaximum in NAR. Die räumliche Verteilung ist konsistent zu diesem Befund: der Anstieg im Bedeckungsgrad konzentriert sich weitgehend auf die westlichen drei Viertel von NAR. Weiter nach Osten ist der Flugverkehr zu diesem Zeitpunkt noch nicht vorgedrungen. Das Maximum wird in etwa im Zentrum von NAR festgestellt. Neun Stunden später findet der zweite Überflug von Terra statt. Hier wird in NAR ein Kondensstreifenbedeckungsgrad von 0,561 % diagnostiziert (D. Duda, pers. Komm.), der sich jedoch weitgehend auf die östliche Hälfte von NAR konzentriert. Zu diesem Zeitpunkt setzt der Flugverkehr von Europa in Richtung von Amerika ein und hat die Osthälfte von NAR weitgehend passiert, die Westhälfte jedoch noch kaum erreicht. Drei Stunden später, beim zweiten Überflug von Aqua, ist der Bedeckungsgrad noch etwas höher (0,603 %, D. Duda, pers. Komm.) und glatter über das Beobachtungsgebiet verteilt. Das im vorigen Zeitschritt beobachtete Maximum im Bedeckungsgrad linearer Kondensstreifen am Ostrand des NAR-Gebietes hat sich um etwa 0,8 Pro-

---

<sup>4</sup>Für den Satelliten Aqua sind die entsprechenden Originalabbildungen für die gesamte Nordhemisphäre auch in Duda et al. (2013) enthalten.

zentpunkte reduziert; hier sind in diesem Zeitfenster aufgrund abklingendem Flugverkehrsaufkommens am Ostrand kaum neue Kondensstreifen gebildet worden, die vorher gebildeten und im vorangegangenen Überflug detektierten Kondensstreifen haben sich aber teilweise aufgelöst oder zu sehr verbreitert.

Hingewiesen sei an dieser Stelle auch auf die Breitengradverteilung der detektierten Kondensstreifenbedeckung: Während beim Überflug um 01:30 LT das Maximum der Kondensstreifenbedeckung in einem engen Breitengradbereich (ca. 52° – 54° N) beobachtet wird, treten die von Flügen von Europa nach Amerika verursachten Kondensstreifen in den Überflügen um 10:30 und 13:30 LT in einem deutlich größeren Breitengradkorridor auf, in völliger Konsistenz zu den in Abschnitt 3.1 festgehaltenen Befunden der Breitengradverteilung des Flugverkehrsaufkommens in NAR.

In der zweiten Bildzeile der Abbildung 3.23 ist die über acht Jahre gemittelte räumliche Verteilung des aus MSG-SEVIRI abgeleiteten LiCC' (vgl. 2.5) für die oben definierten, den MODIS Überflügen zugeordneten Zeiten 00:30, 03:30, 12:30 und 15:30 UTC dargestellt. Während Terra und Aqua das Gebiet NAR auf einer sonnensynchronen polarumlaufenden Bahn abdeckt und im Jahresmittel so eine weitgehend homogene Detektionseffizienz bei der Bestimmung von MODIS-LiCC erlaubt, zeigt der aus MSG abgeleitete LiCC eine deutliche Abhängigkeit der Detektionseffizienz vom Satellitenzenitwinkel. Zur Elimination dieser Satellitenzenitwinkelabhängigkeit, die den Vergleich der räumlichen Verteilung der von MODIS-LiCC und SEVIRI-LiCC für bestimmte Uhrzeiten stören würde, wurde mit

$$\text{LiCC}'(x, y, t_i) = \text{LiCC}(x, y, t_i) - \langle \text{LiCC}(x, y, t_i) \rangle_{t_i} + \langle \langle \langle \text{LiCC}(x, y, t_i) \rangle \rangle_{x,y,t_i} \rangle \quad (3.1)$$

von der zu einer Uhrzeit  $t_i$  an einem Ort  $(x,y)$  im achtjährigen Mittel diagnostizierte Kondensstreifenbedeckung  $\text{LiCC}(x, y, t_i)'$  der an diesem Ort diagnostizierte 24-stündige Mittelwert subtrahiert und der im Gesamtgebiet beobachtete Mittelwert addiert. Für den Vergleich ist zudem zu beachten, dass SEVIRI-LiCC' einen hohen Sockelwert aus fälschlicherweise als Kondensstreifen identifizierten linearen Wolkenstrukturen (vgl. Abbildung 2.7 und Abschnitt 4.2) erfasst, während eine solche Fehlklassifizierung bei MODIS-LiCC durch die Nutzung von Flugverkehrsdaten als zusätzlichem Konsistenztest weitgehend eliminiert wurde (Duda et al. 2013). Diesem Unterschied wurde durch Anpassung des Minimalwerts der Farbskala Rechnung getragen. Die Stauchung des Wertebereichs der Farbskala spiegelt die niedrigere Detektionseffizienz bei SEVIRI-LiCC' wider. Da im Folgenden jedoch nicht die Absolutwerte von MODIS-LiCC und



SEVIRI-LiCC', sondern die räumliche Variabilität der beiden Größen zu den genannten Zeitpunkten verglichen werden sollen, spielen diese Effekte der höheren Falscherkennung und der geringeren Detektionseffizienz eine untergeordnete Rolle.

Die nach Gl. 3.1 abgeleitete regionale Verteilung von SEVIRI-LiCC' zu den MODIS-Überflugszeiten deckt sich in ihrer zeitlichen Variation sehr gut mit MODIS-LiCC. Um 00:30 UTC wird eine, verglichen zu späteren Zeitpunkten, sehr geringe Kondensstreifenbedeckung abgeleitet, die – in Konsistenz zu MODIS-LiCC – am westlichen Rand von NAR lokalisiert ist. Zum Zeitpunkt 03:30 UTC werden im Zentrum von NAR vermehrt Kondensstreifen detektiert. Das Maximum wird etwas weiter westlich als bei MODIS-LiCC festgestellt. Diese Verschiebung kann durch die unterschiedliche Auflösung der jeweils benutzten Sensoren erklärt werden. Während MODIS mit seiner höheren räumlichen Auflösung bereits jüngere schmalere Kondensstreifen, die sich flugverkehrsbedingt zu dieser Uhrzeit eher östlich in NAR befinden, detektieren kann, erfasst SEVIRI-LiCC' die Kondensstreifen erst verzögert. Um 12:30 UTC konzentriert sich SEVIRI-LiCC' im Ostteil von NAR, wiederum in Konsistenz zu MODIS-LiCC. Leichte Diskrepanzen in der räumlichen Verteilung ergeben sich indessen um 15:30 UTC. Hier kann die Häufung von linearen Kondensstreifen in der Osthälfte und am Westrand, wie sie in MODIS-LiCC Daten gefunden wird, nicht reproduziert werden. Teilweise könnte dies jedoch in der nur näherungsweise gültigen UTC  $\iff$  LT Zuordnung (siehe oben) begründet sein. Für die in Abbildung 3.23 ebenfalls gezeigten räumlichen Verteilungen der Variation von CC' und OLR' wurde für diese beiden Größen nach

$$\begin{aligned} \text{CC}'(x, y, t_i) &= \text{CC}(x, y, t_i) - \text{CC}(x, y', t_i)_{\text{SAR}} \\ &\quad - \langle\langle\langle\text{CC}(x, y, t_i) - \text{CC}(x, y', t_i)_{\text{SAR}}\rangle\rangle\rangle_{x,y,t_i} \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \text{OLR}'(x, y, t_i) &= \text{OLR}(x, y, t_i) - \text{OLR}(x, y', t_i)_{\text{SAR}} \\ &\quad - \langle\langle\langle\text{OLR}(x, y, t_i) - \text{OLR}(x, y', t_i)_{\text{SAR}}\rangle\rangle\rangle_{x,y,t_i} \end{aligned} \quad (3.3)$$

für jeden geographischen Ort (x,y) die Zirrenbedeckung bzw. die ausgehende langwellige Strahlung des am Äquator gespiegelten Ortes (x,y') (zur Motivation vgl. Abschnitt 2.10) subtrahiert, und, da hier keine Absolutwerte, sondern nur die zeitliche Variabilität betrachtet werden soll, der 24-stündige regionale Mittelwert dieser Differenz abgezogen. Es gibt also insofern

$$\langle\langle\langle\text{CC}'(x, y, t_i)\rangle\rangle\rangle_{x,y,t_i} \equiv 0 \quad (3.4)$$

sowie

$$\langle\langle\langle OLR'(x, y, t_i) \rangle\rangle\rangle_{x,y,t_i} \equiv 0. \quad (3.5)$$

Auch für die so ermittelten Felder von  $CC'$  ergibt sich für die betrachteten Zeitpunkte ein konsistentes Bild. Bei 00:30 UTC wird ein im Vergleich zum 24-Stundenmittel niedrigerer Zirrenbedeckungsgrad ermittelt, mit höheren Werten im Westteil als im Ostteil. Für 03:30 wird im Westteil von NAR eine hohe Zirrenbedeckung registriert. Die oben angesprochene auflösungsbedingte Verzögerung zwischen MODIS-LiCC und SEVIRI-LiCC' und die damit verbundene Verlagerung der maximalen Wirkung von Ost nach West setzt sich in der Zirrenbedeckung in konsistenter Weise fort, hier wird der größte flugverkehrsinduzierte Beitrag erst später registriert als bei SEVIRI-LiCC', und dadurch das Maximum weiter im Westen, in Regionen älteren Flugverkehrs, ermittelt. Um 12:30 UTC und auch um 15:30 UTC werden in der Osthälfte höhere Werte von  $CC'$  registriert. Die Übereinstimmung von  $CC'$  zu MODIS-LiCC erscheint hier sogar besser als die Übereinstimmung von LiCC' und MODIS-LiCC.

OLR' ist schließlich zu den betrachteten Zeiten sehr stark mit  $CC'$  antikorreliert (man beachte das negative Vorzeichen der benutzten Einheit). Hier gelten sinngemäß die für  $CC'$  getroffenen Aussagen in Analogie.

# Kapitel 4

## Diskussion

### 4.1 Qualität des Flugverkehrsdatensatzes

Der Tagesgang der Flugverkehrsdichte in NAR wurde auf Basis des sechswöchigen EUROCONTROL-Datensatzes (vgl. Abschnitt 3.1) abgeleitet. Zwischenzeitlich steht zusätzlich ein globaler Flugverkehrsdatensatz zur Verfügung, der im Rahmen des amerikanischen Projekts ACCRI (Brasseur und Gupta 2010) der Federal Aviation Administration (FAA) vom Volpe National Transportation Systems Center für das gesamte Jahr 2006 erzeugt wurde (Wilkerson et al. 2010). Ein aus diesen Daten abgeleiteter Tagesgang ist sowohl in seiner Form als auch hinsichtlich der diskutierten Unterschiede im Ost- und Westteil weitgehend konsistent zu dem hier genutzten Tagesgang (Schumann und Graf 2013). Trotz des relativ kurzen zugrundeliegenden Zeitraums erscheint daher der aus dem EUROCONTROL-Datensatz abgeleitete Tagesgang verlässlich und in seiner Form repräsentativ für den typischen Tagesgang im Nordatlantik zu sein. Ob der EUROCONTROL-Datensatz jedoch für alle acht betrachteten Jahre repräsentativ ist oder ob es, beispielsweise hinsichtlich eines Einbruchs des transatlantischen Verkehrsaufkommens infolge der wirtschaftlichen Verwerfungen in den Jahren 2008 ff. Veränderungen im Tagesgang des Flugverkehrsaufkommens gab, kann mangels verlässlicher Flugverkehrsdaten für diese Jahre nicht geklärt werden.

## 4.2 Qualität der linearen Kondensstreifenerkennung in SEVIRI-Daten

Die abgeleiteten Werte der linearen Kondensstreifenbedeckung für den Nordatlantik sind relativ klein (0,1 – 0,15 %), sie liegen etwa einen Faktor 3 - 5 unter den mit dem polarumlaufenden Satelliten MODIS-Aqua abgeleiteten Werten (Duda et al. 2013, für NAR 0,58 %, pers. Komm.). Diese Diskrepanz überrascht jedoch nicht; die räumliche Auflösung von SEVIRI im Bereich des Nordatlantiks liegt bei etwa 5 km x 5 km. Ein SEVIRI-Pixel entspricht somit etwa 25 MODIS-Pixeln. Linienstrukturen, die unterhalb der SEVIRI Auflösung liegen, können so bei MODIS aufgelöst werden, während sie bei SEVIRI unentdeckt bleiben.

Die LiCC-Tagesgänge zeigen – anders als die Flugverkehrsdichte – ein niedrigeres erstes Maximum und ein stärker ausgeprägtes zweites Maximum. Dieser Befund könnte aus der Bündelung des mit dem ersten Maximum korrespondierenden Flugverkehrs von Amerika in Richtung Europa zusammenhängen. Diese Flüge werden in einem schmalen Breitengradbereich abgewickelt als die Flüge von Europa nach Amerika (vgl. Abschnitt 3.1). Zudem konzentrieren sich diese Flüge auf ein engeres Zeitfenster. Beides führt zu einem höheren Überlappungsgrad linearer Kondensstreifen. Es ist bekannt, dass zunehmende Überlappung von linearen Kondensstreifen die Detektionseffizienz eines CDA sinken lässt (Mannstein et al. 1999; Duda et al. 2013). Das beobachtete Verhalten des Tagesgangs der linearen Kondensstreifenbedeckung kann somit erklärt werden. Daneben kann aber auch nicht ausgeschlossen werden, dass Tagesgänge im Auftreten linienförmiger natürlicher Zirren zum beobachteten Befund beitragen, oder Tagesgänge in der Detektionseffizienz infolge eines Tagesgangs in den Feldern der benutzten Helligkeitstemperaturdifferenz eine Rolle spielen.

## 4.3 Qualität des Zirrendetektionsalgorithmus MeCiDA2

Der Zirrenerkennungsalgorithmus MeCiDA2 ist eine Kombination aus sechs unabhängigen Zirrentests. Jeder dieser Tests nutzt unterschiedliche Kanalkombinationen. Es werden Schwellwertverfahren und morphologische Tests kombiniert, wodurch eine Vielzahl verschiedener Zirrentypen detektierbar ist (Krebs et al. 2007; Ewald et al. 2013). Die einzelnen Tests zeichnen sich durch verschiedene Sensitivitäten hinsichtlich unter-

schiedlicher Arten von Zirren aus (vgl. Abbildung 3.3).

Die einzelnen Zirrentests aus MeCiDA2 sind mit einem logischen OR verknüpft. Es wäre daher denkbar, dass durch natürliche Tagesgänge in einer Helligkeitstemperatur die in MeCiDA2 implementierten Schwellwerte je nach Tageszeit eine unterschiedliche Sensitivität aufweisen. So könnte ein Tagesgang in der Ozonkonzentration zwar prinzipiell zu einem Tagesgang der Helligkeitstemperatur im SEVIRI-Kanal bei  $9,7 \mu\text{m}$  führen. Über die logische OR Verknüpfung würde sich ein solches, in einem Einzeltest auftretendes Artefakt in das Gesamtergebn hinein fortpflanzen. Dieser Effekt wurde für die Vorgängerversion MeCiDA (Krebs et al. 2007) gründlich untersucht (Graf et al. 2009). Dabei wurde festgestellt, dass alle sechs Einzeltests sehr ähnliche Formen des Tagesgangs wiedergeben.

Zudem wurde, wie in Abschnitt 2.6 dargestellt, am IPA ein von MeCiDA2 völlig unabhängiges Verfahren zur Ableitung der optischen Dicke von Zirren entwickelt (Kox 2012). Anstelle optische Dicken abzuleiten, kann dieser Algorithmus natürlich auch als Zirrendetektionsalgorithmus betrieben werden. Während sich der Algorithmus COCS durch eine höhere Empfindlichkeit auszeichnet und besonders im Bereich optischer Dicken von  $0,1 - 0,3$  sensitiver auf Zirren reagiert, wurde die Form des Tagesgangs der Zirrenbedeckung – bei höherem Untergrund – reproduziert (Kox 2012). MeCiDA2-Artefakte als Auslöser eines Zirrentagesgangs scheiden damit aus.

## 4.4 Qualität der mit RRUMS abgeleiteten langwelligen Strahlungsflussdichten

Der Algorithmus RRUMS (Krebs 2006; Vazquez-Navarro et al. 2012) basiert auf einer Schmalband-Breitband-Konversion sowie einer Konversion von Strahldichten in Strahlungsflussdichten („radiance-to-irradiance conversion“). Derartige Verfahren sind in der Literatur etabliert (EUMETSAT 2010). RRUMS wurde mit Messungen von CERES sowie mit GERB Messungen validiert. Für zirrenfreie Bildpunkte wurde für die nach Gleichung 2.5 abgeleiteten Werte eine RMS-Abweichung von  $1,7 \text{ W/m}^2$  und für zirrenbedeckte Pixel eine RMS-Abweichung von  $2,5 \text{ W/m}^2$  gefunden. Letzterer Wert variiert jedoch mit dem Satellitenzenitwinkel mit kleineren RMS-Werten um  $1,3 \text{ W/m}^2$  für Satellitenzenitwinkel um  $40 - 60^\circ$ , was in etwa dem in dieser Arbeit betrachteten Untersuchungsgebiet NAR entspricht (Vazquez-Navarro et al. 2012).

Da bei der Ableitung der ausgehenden langwelligen Strahlungsflussdichte anders als bei der Zirrendetektion keine Schwellwertverfahren herangezogen werden, reagiert die-

se Größe besonders sensitiv auf inkrementelle flugverkehrsinduzierte Beiträge. Eine mögliche Beeinflussung der aus OLR abgeleiteten Tagesgänge infolge der Kopplung an die MeCiDA2 Zirrenerkennung wird im folgenden Abschnitt diskutiert.

## 4.5 Einfluss der Zirrenklassifikation auf den Tagesgang der ausgehenden langwelligen Strahlung

Wie in Abschnitt 2.7 beschrieben, dient das Resultat der Zirrenerkennung mit MeCiDA2 als Eingangsgröße für die Ableitung der ausgehenden langwelligen Strahlung. Je nach der Zirrenklassifikation eines Pixels werden in Gl. 2.5 unterschiedliche Parameter  $a_k(\theta_{sat}, c_{MEC})$  genutzt, um die ausgehende langwellige Strahlung je nach Zirrenstatus des Pixels abzuleiten. Generell gibt es einen Zusammenhang zwischen Zirrenbedeckung und ausgehender langwelliger Strahlung: Bei Pixeln mit Zirrusbedeckung emittiert die Zirrenschicht mit ihrer in der Regel kälteren Temperatur in den Weltraum, während in zirrenfreien Bildelementen die in der Regel wärmere Erdoberfläche, der atmosphärische Wasserdampf und/oder Wasserwolken eine höhere thermische Abstrahlung verursachen. Daher ist es zunächst plausibel, dass sich ein in der Zirrenbedeckung diagnostizierter Tagesgang auch in der langwelligen Abstrahlung wiederfindet.

Durch die in Gl. 2.5 vorgenommene Aufspaltung der Koeffizienten  $a_k$  in zwei Sets von Parametern für zirrenfreie ( $c_{MEC} = 0$ ) und zirrenbedeckte ( $c_{MEC} = 1$ ) Pixel könnte sich jedoch, z. B. durch Fehler in der Bestimmung der Parameter  $a_k(\theta_{sat}, c_{MEC})$  oder aber infolge mangelnder Eignung der für Zirren ermittelten Parameter für die beobachteten Strukturen, zusätzlich zu dem oben erläuterten physikalischen Effekt eine künstliche fehlerhafte Fortpflanzung des Tagesgangs der Zirrenbedeckung in den Tagesgang der langwelligen Strahlung hinein ergeben. Um einen derartigen Effekt untersuchen zu können, wurde exemplarisch für das Jahr 2005 die Ableitung der ausgehenden langwelligen Strahlungsflussdichte in drei verschiedenen Varianten durchgeführt:

$$\text{OLR}_{\text{original}} = \sigma \left( a_0(\theta_{sat}, c_{MEC}) + \sum_{k=1}^7 a_k(\theta_{sat}, c_{MEC}) T_k \right)^4 \quad (4.1)$$

$$\text{OLR}_{\text{zirrenfrei}} = \sigma \left( a_0(\theta_{sat}, 0) + \sum_{k=1}^7 a_k(\theta_{sat}, 0) T_k \right)^4 \quad (4.2)$$

$$\text{OLR}_{\text{zirrenbedeckt}} = \sigma \left( a_0(\theta_{sat}, 1) + \sum_{k=1}^7 a_k(\theta_{sat}, 1) T_k \right)^4 \quad (4.3)$$

#### 4.5. Einfluss der Zirrenklassifikation auf den Tagesgang der ausgehenden langwelligen Strahlung

Abbildung 4.1 zeigt die auf diese Weise für das Jahr 2005 abgeleiteten Tagesgänge.

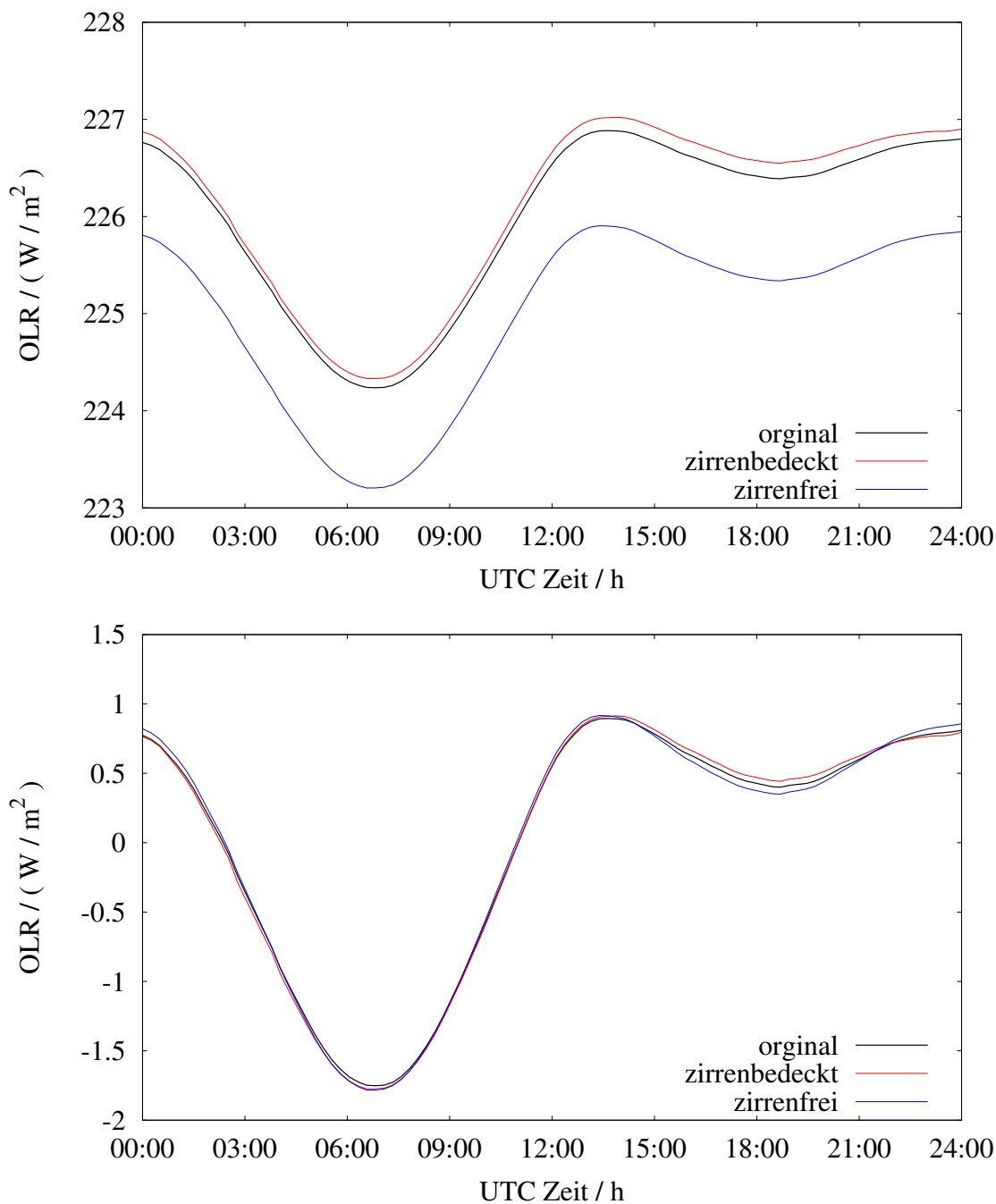


Abbildung 4.1: Oben: Mittlerer Tagesgang der am Oberrand der Atmosphäre ausgehenden langwelligen Strahlung, abgeleitet aus RRUMS bei Nutzung der standardmäßig vorgeschalteten Zirrenerkennung (Gl. 4.1, schwarze Linie), bei Nutzung der Parametrisierung für zirrenbedeckte Pixel für alle Pixel (Gl. 4.3, rote Linie) sowie bei Nutzung der Parametrisierung für zirrenfreie Pixel für alle Pixel (Gl. 4.2, blaue Linie), jeweils für das Jahr 2005. Unten: Identische Größen, jedoch nach Abzug des jeweiligen 24-h Mittelwertes.

Oben sind die Absolutwerte der ausgehenden langwelligen Strahlung dargestellt, unten ist jeweils der Mittelwert abgezogen. Man erkennt, dass sich die Mittelwerte der auf diese Weise ermittelten Tagesgänge voneinander um einige  $\text{W}/\text{m}^2$  unterscheiden. Dieser Unterschied ist jedoch im Wesentlichen auf eine Verschiebung der Tagesgänge um einen tageszeitunabhängigen Offset verursacht; der untere Teil der Abbildung belegt, dass in der Form des Tagesgangs in den drei Varianten kaum Unterschiede auftreten. Insbesondere wird der beobachtete Tagesgang der ausgehenden langwelligen Strahlung nicht durch Nutzung der Zirreninformation und damit des Zirrentagesgangs hervorgerufen.

## 4.6 Diskussion der Kausalität

Basis dieser Arbeit ist die statistische Analyse mittlerer beobachteter Tagesgänge verschiedener atmosphärischer Größen und ihre Erklärung durch den Tagesgang des Flugverkehrsaufkommens. Generell erlaubt ein derartiger statistischer Ansatz nur die Beschreibung statistischer Kenngrößen. Die Kausalität

$$\text{Flugverkehr} \implies \text{beobachtete Wirkung}$$

kann nicht aus dieser statistischen Untersuchung heraus bewiesen werden, sondern kann nur durch zusätzliche Argumente gefolgert werden. Es gibt hier jedoch eine Reihe von Argumenten, die für einen solchen kausalen Zusammenhang sprechen:

1. Der statistisch unterstellte Zusammenhang zwischen dem Tagesgang der Flugverkehrsdichte und der dadurch in bestimmten Zeitfenstern verursachten stärkeren Bildung von Kondensstreifen und Zirren lässt sich in Einzelszenen beobachten. Die Ergebnisse in Abschnitt 3.2 dargestellten Situation könnten durch viele weitere solcher Fälle ergänzt werden. Ein systematischer Vergleich von Helligkeitstemperaturdifferenzbildern von 00:00 UTC und 04:00 UTC für den Monat Januar 2012 zeigt, dass der Effekt einer in diesem Zeitfenster auftretenden Zunahme von linienförmigen Strukturen in NAR systematisch auftritt und häufig an mehreren Tagen in Serie zu beobachten ist.
2. Der Tagesgang des Flugverkehrs in NAR und der Tagesgang der Zirrenbedeckung in NAR zeigen prinzipiell eine verwandte Form. Die beobachteten Unterschiede (Verschiebung und Verbreiterung) können physikalisch erklärt werden. Die Tagesgänge zeigen beide jeweils zwei Maxima, wobei das erste Maximum eine schmälere Form als das zweite besitzt.



3. An Einzeltagen ist der Tagesgang der Zirrenbedeckung im Wesentlichen von der meteorologischen Situation im Beobachtungsgebiet und der durch Advektion im Tagesverlauf ein- oder ausgetragenen Zirrenbedeckung gegeben. Mittelt man aber die Tagesgänge über längere Zeitspannen, zeigt sich in allen jahresgemittelten Tagesgängen, aber auch in allen saisonal-gemittelten Tagesgängen (Graf et al. 2012) und in fast allen einmonatigen Mittelwerten (Graf et al. 2012) der oben diskutierte Tagesgang. Der beobachtete Tagesgang ist damit keine zufällige statistische Fluktuation. Ein solcher Tagesgang muss eine auf der Tagesskala periodisch auftretenden Ursache haben. Der Flugverkehr wirkt als solcher periodischer Trigger von Zirrenbildung im Beobachtungsgebiet und kann das beobachtete Muster weitgehend erklären. Die natürlichen Zirrenbildungsprozesse können, soweit sie vom ECMWF-Modell richtig wiedergegeben werden, diese Erscheinung nicht erklären, der Korrelationskoeffizient  $\rho$  beträgt 0,09<sup>1</sup> (vgl. Abschnitt 3.6).
4. Der Tagesgang des Flugverkehrs variiert zwischen dem Ost- und Westteil von NAR. Dieses Verhalten wird durch den Tagesgang der Zirrenbedeckung und der ausgehenden langwelligen Strahlung wiedergegeben. Diese gegensätzliche Verschiebung der Positionen der Maxima zwischen West- und Ostteil ist ohne einen Flugverkehrseffekt nicht zu erklären. Auch Wettervorhersagemodelle (ohne Flugverkehrsinformation) offenbaren kein derartiges Verhalten. Gestützt wird der postulierte Flugverkehrseffekt durch konsistente Befunde im Tagesgang der linearen Kondensstreifenbedeckung.
5. Der im flugverkehrsfreien Südatlantik (SAR) beobachtete Tagesgang der Zirrenbedeckung wird, auch unter Berücksichtigung der dreistündigen Modellauflösung, gut durch ECMWF Daten wiedergegeben ( $\rho = 0,97$ ). Im Nordatlantik (NAR) ist der vom Modell vorhergesagte Tagesgang nicht mit dem beobachteten Tagesgang korreliert (s.o.). Dies überrascht umso mehr, als in der Regel die Vorhersagegüte der Wettermodelle in der Nordhemisphäre infolge der dort in größerer Zahl verfügbaren Beobachtungsdaten üblicherweise eine bessere Qualität aufweisen. Eine Diskrepanz zwischen Modell und Beobachtung deutet allgemein auf einen nicht vom Modell abgebildeten Prozess hin. Da hier die Diskrepanz nur im Nordatlantik, nicht aber im Südatlantik auftritt, erscheint es wahrscheinlich, dass der Flugverkehr für diesen Effekt verantwortlich ist.

---

<sup>1</sup>Die Abweichung dieser Ergebnisse von Graf et al. (2012) ergeben sich infolge der Verbreiterung der ECMWF Datengrundlage auf 5 Jahre.

Bei der ausgehenden langwelligen Strahlung wird der Tagesgang im Nordatlantik zwar auch mit guter Korrelation ( $\rho = 0,88$ ) wiedergegeben, dies ist infolge des natürlichen Tagesgangs in OLR, der natürlich vom Modell erfasst wird, zu erwarten. Aber auch in diesem Fall ist die Übereinstimmung zwischen Modell und beobachtetem Tagesgang in SAR besser ( $\rho = 0,92$ ), was auf einen nicht vom Modell wiedergegebenen Prozess in NAR hindeutet.

6. Die beobachtete Form der Tagesgänge der einzelnen Beobachtungsgrößen wurde durch einen angenommenen natürlichen Hintergrund und einen flugverkehrsinduzierten Beitrag modelliert. Bei der linearen Kondensstreifenbedeckung kam es hier zu Diskrepanzen zwischen beobachtetem und modelliertem Tagesgang, die in Abschnitt 4.2 diskutiert wurden. Durch die modellierten Tagesgänge der Zirrenbedeckung und insbesondere der langwelligen Strahlungsflussdichte konnten jedoch die beobachteten Tagesgänge dieser Größen in hoher Güte reproduziert und damit erklärt werden.
7. Die Methode ist prinzipiell unabhängig von der Klassifizierung der Zirren nach ihrer individuellen Form. In dieser Arbeit wurde die Methode aber auch auf den beobachteten linearen Kondensstreifenbedeckungsgrad angewandt. Die abgeleiteten Ergebnisse für lineare Kondensstreifen und flugverkehrsinduzierte Zirren sind zueinander konsistent, insbesondere wird, wie zu erwarten, für lineare Kondensstreifen eine kürzere Wirkung als für flugverkehrsinduzierte Zirrenbedeckung und auch eine geringere Gesamtwirkung abgeleitet. Diese Ergebnisse erscheinen zwar selbstverständlich, sind jedoch in keiner Weise methodisch vorgegeben. Die abgeleitete flugverkehrsinduzierte Zirrenbedeckung liegt deutlich über dem diagnostizierten Wert der linearen Kondensstreifenbedeckung (Faktor 10 – 15), aber auch um einen Faktor 2 – 4 über den Werten linearer Kondensstreifenbedeckung, wie sie mit einem CDA auf Basis höheraufgelöster polarumlaufenden Satelliten abgeleitet wird (Duda et al. 2013).
8. Ein Vergleich der räumlichen Verteilung der linearen Kondensstreifenbedeckung, der flugverkehrsinduzierten Zirrenbedeckung und der langwelligen Strahlung in NAR für Zeitpunkte, in denen MODIS-Überflüge in NAR stattfinden, zeigt für alle genannten Größen eine zur Hypothese eines flugverkehrsinduzierten Beitrags konsistente regionale Verteilung und zeitliche Variabilität.
9. Die über die Transformationsfunktionen abgeleiteten Tagesgänge der flugver-

kehrinduzierten Zirrenbedeckung sowie der ausgehenden langwelligen Strahlung konnten mithilfe des Kondensstreifenzirren-Vorhersagemodells CoCiP (Schumann 2012) weitgehend reproduziert und so physikalisch erklärt werden (Schumann und Graf 2013).

10. Hier nicht gezeigt wurden konsistente Ergebnisse für ein alternativ definiertes Gebiet NAR' mit einer nördlichen Begrenzung bei  $65^\circ$  N. Eine größere Nord-Süd-Ausdehnung des Untersuchungsgebietes erfasst zwar einen größeren Teil des Nordatlantischen Flugkorridors (vgl. Abbildung 2.3), erzwingt jedoch aufgrund der begrenzten Gebietsabdeckung durch Meteosat-8/9 (vgl. graue Linie in Abbildung 2.3) eine Reduzierung der Ost-West-Ausdehnung des Untersuchungsgebietes. Durch eine solche Reduzierung wird die Analyse von Unterschieden in den Tagesgängen für die West- und Ost-Teilgebiete erschwert, so dass in dieser Arbeit dieses Alternativgebiet nicht behandelt wurde.

In Summe stützen alle diese Punkte die Hypothese, dass die beobachteten Tagesgänge in der geschilderten Weise flugverkehrsinduziert sind.

Neben diesen Aspekten wurden im Rahmen der Arbeit zusätzliche Untersuchungen durchgeführt, die mögliche Auslöser der beobachteten Tagesgänge speziell in der Zirrenbedeckung ausschließen konnten.

1. Der Mond induziert durch seine Erdumlaufbahn Gezeiten, die sich nicht nur im Meeresspiegel und dem bekannten Gezeitenzyklus widerspiegeln, sondern auch zu Gezeiteneffekten in der Atmosphäre führen. Analysen zeigten jedoch, dass der in NAR beobachtete Tagesgang nicht vom Mond verursacht sein kann. Aufgrund der Umlaufzeit des Mondes von 27,32 Tagen würde sich ein dadurch induzierter Tagesgang, entgegen der Beobachtung, im UTC-Zeitschema ständig verschieben.
2. Die Satelliten Meteosat-8/9 sind zwar nominell geostationär, d.h. sie bewegen sich in der geostationären Erdumlaufbahn und sind dabei über einer festen Längengradkoordinate platziert. In der Realität gibt es jedoch kleinere Abweichungen von dieser Idealbahn, die Satelliten schwanken auf ihrer Bahn um ihre Nominalposition und beschreiben eine „liegende 8“ (Leo van de Berg, EUMETSAT, pers. Komm.). Durch periodische Abweichungen von Meteosat verändert sich der Satellitenzenitwinkel leicht, so dass hierdurch eine periodische Schwankung der abgeleiteten Helligkeitstemperaturen und damit auch eine periodische Beeinflussung von aus diesen Helligkeitstemperaturen abgeleiteten Produkten möglich

erscheinen. Allerdings ist die Periodendauer dieser Schwankung nicht identisch mit der Erdumlaufdauer des Satelliten. Bei der Ableitung eines Tagesgangs auf Basis einer achtjährigen Zeitreihe mitteln sich somit dadurch verursachte Schwankungen weitgehend heraus, die Periodizität tritt so auf der Tagesgangsskala im Jahresmittel nicht auf.

3. Die achtjährige Zeitreihe der Zirrenbedeckung wurde auf Basis von Daten der Satelliten Meteosat-8 und Meteosat-9 für den Zeitraum vom Februar 2004 bis Januar 2012 gewonnen. Der beobachtete Tagesgang der Zirrenbedeckung ist indessen unabhängig vom betrachteten Jahr robust und hängt nicht vom jeweils operationellen Satelliten ab.

## 4.7 Diskussion der Wirkungsdauer

Neben den Absolutwerten der flugverkehrsinduzierten Beiträge zu LiCC, CC und OLR ist die mit dem Fitparameter  $\tau$  verknüpfte Wirkungsdauer von großem Interesse. Sie bestimmt die Zeitskala der Wirkungsentfaltung. Vor allem für Mitigationsfragestellungen (s.u.) ist sie ein zentraler Parameter. In dieser Arbeit wurden bei der linearen Kondensstreifenbedeckung  $\tau$ -Werte von 1,5 h (für Transformationsfunktion  $r_2$ ) und 2,5 h (für Transformationsfunktion  $r_3$ ) abgeleitet. Diese Werte implizieren eine maximale Wirkung des Flugverkehrs auf die lineare Kondensstreifenbedeckung in einem Alter von  $0,9 \times 1,5 \text{ h} = 1,35 \text{ h}$  für  $r_2$  bzw.  $0,5 \times 2,5 \text{ h} = 1,25 \text{ h}$  für  $r_3$ . Aber auch in Zeiträumen von 3 – 4 Stunden ergeben sich je nach zugrunde gelegter Transformationsfunktion noch nennenswerte Beiträge (vgl. Abbildung 2.11).

Für die Zirrenbedeckung wurden, je nach gewähltem Hintergrund,  $\tau$ -Werte von 2,8 – 3,3 h (für Transformationsfunktion  $r_2$ ) bzw. 3,8 – 4,6 h (für Transformationsfunktion  $r_3$ ) gefunden. Die maximale Wirkung flugverkehrsinduzierter Zirrenbedeckung entfaltet sich hier nach 2,5 – 3 h für  $r_2$  bzw. 1,9 – 2,3 h für  $r_3$ , aber auch zu späteren Zeiten ergeben sich noch wesentliche Beiträge. Bei der Transformationsfunktion  $r_2$  wird beispielsweise bei einem Alter von 5 – 6 h noch etwa ein Drittel der maximal verursachten Wirkung beobachtet, bei  $r_3$  werden bei einem Alter von 1,5  $\tau$  (5,7 – 7 h) noch etwa die Hälfte der maximal beobachteten Wirkung erzielt (vgl. Abbildung 2.11). Bei noch größerem Alter sind die über die Transformationsfunktion abgeleiteten Beiträge dann geringer; bei einem Alter von 10 h (entspricht 3,3  $\tau$  bei  $r_2$  bzw. 2,4  $\tau$  bei  $r_3$ ) wird noch etwa 5 % der Maximalwirkung (für  $r_2$ ) bzw. 1 – 2 % der Maximalwirkung (für  $r_3$ ) beobachtet.

Bei der flugverkehrsinduzierten Änderung der langwelligen Strahlungsflussdichte ergeben sich leicht kleinere Werte von  $\tau$  im Vergleich zur flugverkehrsinduzierten Zirrenbedeckung. Dieser Effekt ist zu erwarten, denn die Ableitung der langwelligen Strahlungsflussdichte kann bereits inkrementell kleine Veränderungen der Helligkeitstemperaturen der einzelnen SEVIRI-Kanäle erfassen. Damit wird die flugverkehrsinduzierte Wirkung in OLR früher sichtbar als in CC, wo die flugverkehrsinduzierte Wirkung in den Helligkeitstemperaturen von SEVIRI groß genug sein muss, um die Schwellwerte der Zirrendetektion zu erreichen. Dadurch verlagert sich die zeitliche Entwicklung zu kleineren Werten von  $\tau$ . In OLR werden zudem schmale flugverkehrsinduzierte Zirren in ihrer Wirkung mit erfasst, die nur einen (für eine Zirrendetektion zu kleinen) Teil eines 5 km x 5 km SEVIRI-Pixels ausfüllen. Davon abgesehen gilt die im vorigen Absatz für die flugverkehrsinduzierte Zirrenbedeckung geführte Diskussion sinngemäß, sie wird hier nicht nochmal wiederholt.

Die abgeleiteten Werte von  $\tau$  könnten infolge von aus dem Beobachtungsgebiet durch Advektion abtransportierten Wirkungsanteilen unterschätzt sein. Dieser Effekt wird jedoch als gering eingeschätzt. Zum einen ist das Untersuchungsgebiet hinreichend groß dimensioniert, so dass die Verweildauern dort in der Regel deutlich größer sind als die für  $\tau$  abgeleiteten Werte. Vor allem wird aber aus dem Beobachtungsgebiet abgeflossene Wirkung durch Wirkungseintrag an anderer Stelle teilweise kompensiert. Die vor allem aus Westen bzw. aus Nord/Süd-Richtung ins Untersuchungsgebiet eingetragene Wirkung stammt aus Regionen mit einem sehr ähnlichen Tagesgang des Flugverkehrs, so dass diese Einträge methodisch die Analyse nicht stören und abtransportierte Wirkungsteile auch in ihrem Tagesgang weitgehend kompensieren dürften.

Die Wirkungsdauer ist insbesondere ein Schlüsselparameter in der Bewertung von Mitigationsstrategien. Nachts kann flugverkehrsinduzierte Zirrenbedeckung mangels solarer Einstrahlung ihre im kurzwelligen Spektralbereich kühlende Komponente nicht entfalten. Der Netto-Strahlungsantrieb entspricht dann dem langwelligen Strahlungsantrieb. Vor diesem Hintergrund wurde vorgeschlagen, durch einer Verlagerung von Nachtflügen in die Morgenstunden eine Reduktion der Klimawirkung von Kondensstreifen zu realisieren (Stuber et al. 2006; Stuber und Forster 2007). Andere Arbeiten kommen zu dem Ergebnis, dass eine solche Verlagerung durch lange Wirkungszeiten der flugverkehrsinduzierten Wirkung keine nennenswerte Reduktion ermöglicht (Newinger 2010; Newinger und Burkhardt 2012). Die oben diskutierten Resultate implizieren, dass sich die Hauptwirkung der flugverkehrsinduzierten Zirrenbedeckung in einem Zeitfenster von 1 – 8 Stunden nach dem Flug entfaltet und eine Vermeidung von Spätabend- und

Nachtflügen auf den Tagesgang der flugverkehrsinduzierten Strahlungsantriebs einen deutlichen Einfluss hätte, in Abweichung zu Befunden in Newinger und Burkhardt (2012). Dennoch erscheint eine derartige Mitigationsstrategie nicht zielführend. Da auch für ein Alter von 6 – 8 Stunden noch nennenswerte Wirkungsbeiträge beobachtet werden, müsste hier bereits lange vor Sonnenuntergang der Flugverkehr eingestellt werden. Im Winter könnte insoweit angesichts der früh einsetzenden Dämmerung bereits in den Nachmittagsstunden nicht mehr geflogen werden, um eine Wirkungsentfaltung in den Nachtstunden zu vermeiden. Der Flugverkehr müsste dann in der Zeit kurz vor Sonnenaufgang bis in die Mittagsstunden abgewickelt werden. Derartige Mitigationsstrategien haben keinerlei Realisierungsperspektive. Es stehen aber alternative, wesentlich praktikablere Mitigationsansätze zur Diskussion, die zum einen eine klimatologisch optimierte Flugroutenwahl zur Reduzierung der Klimawirkung des Flugverkehrs, zum anderen aber insbesondere eine wetterabhängige Routenwahl zur gezielten Minimierung der durch Flugverkehr induzierten Wirkung umfassen (Gierens et al. 2008; Matthes et al. 2012).

# Kapitel 5

## Zusammenfassung und Ausblick

### 5.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde eine neue Methode zur Quantifizierung der linearen Kondensstreifenbedeckung, der flugverkehrsinduzierten Zirrenbedeckung und der dadurch verursachten Veränderung in der ausgehenden langwelligen Strahlung entwickelt. Der Fokus wurde dabei auf die beiden letztgenannten Größen gelegt. Die Methode basiert auf der Verknüpfung des mittleren Tagesgangs des Flugverkehrsaufkommens mit den beobachteten Tagesgängen der genannten Größen. Hierzu werden Transformationsfunktionen mit freien Parametern konstruiert, die die mittlere Wirkung eines Flugverkehrereignisses als Funktion des Alters auf die genannten Beobachtungsgrößen abbildet. Durch Anwendung dieser Funktionen auf den Tagesgang des Flugverkehrsaufkommens wird ein Tagesgang der jeweils betrachteten Größe abgeleitet. Dieser modellierte Tagesgang wird mithilfe eines Fits der freien Parameter an die beobachteten Tagesgänge gefittet, wobei Annahmen über die natürliche Form des Tagesgangs getroffen werden. Sind die Fitparameter ermittelt, lässt sich aus ihnen direkt die mittlere Wirkung des Flugverkehrs, ihr Tagesgang und die mittlere Wirkungsdauer jeweils getrennt für jede einzelne betrachtete Größe ableiten.

Diese Methode erweitert die bisher etablierten Verfahren zur Quantifizierung des Bedeckungsgrades linearer Kondensstreifen und flugverkehrsinduzierter Zirren. Sie verzichtet auf den Einsatz von Linienerkennungsverfahren und erweitert so den Beobachtungshorizont flugverkehrsinduzierter Zirrenbedeckung über ihren initialen Zustand als lineare Kondensstreifen hinaus. Abgesehen von Trendanalysen, in denen aus Langzeitrends von Flugverkehrsaufkommen und Zirrenbedeckung in verschiedenen Gebieten auf den Flugverkehrseffekt rückgeschlossen wurde, ist diese Methode die erste, die die

Ableitung der flugverkehrsinduzierten Wirkung auf Zirrenbedeckungsgrad und langwellige Strahlungsflussdichte aus Beobachtungsdaten erlaubt. Eine Quantifizierung der Flugverkehrswirkung ist für die Validierung von Klimamodellen, die Kondensstreifen und Kondensstreifen-Zirren behandeln, notwendig. Die Kenntnis des zeitlichen Verlaufs der Wirkung, wie ihn die Transformationsfunktionen beschreiben, ist zudem eine zentrale Größe für die Beurteilung möglicher Mitigationsstrategien.

Die entwickelte Methode wurde in dieser Arbeit auf ein geeignetes Untersuchungsgebiet im Nordatlantik angewandt. Dieses als NAR ( $45^\circ$  W -  $10^\circ$  W,  $45^\circ$  N -  $55^\circ$  N) bezeichnete Gebiet deckt einen Großteil des transatlantischen Flugkorridors ab. Die besondere Eignung des Gebietes resultiert aus der Form des Tagesgangs des Flugverkehrsaufkommens in dem Gebiet und aus seiner Lage im Beobachtungsbereich des Meteosat-8/9 Satelliten. Zur Analyse der linearen Kondensstreifenbedeckung, des Zirrenbedeckungsgrades sowie der ausgehenden langwelligen Strahlung wurde ein achtjähriger Datensatz (Februar 2004 – Januar 2012) aus Meteosat-8 und Meteosat-9 Beobachtungen herangezogen. Die Quantifizierung des Bedeckungsgrades mit linearen Kondensstreifen erfolgte nach Mannstein et al. (2012), die Zirrenbedeckung mithilfe des Zirrenerkennungsalgorithmus MeCiDA2 (Ewald et al. 2013) sowie die am Oberrand der Atmosphäre abgestrahlte langwellige Strahlungsflussdichte mithilfe des Algorithmus RRUMS (Vazquez-Navarro et al. 2012). Aus diesen Daten wurden mittlere Tagesgänge der jeweils untersuchten Größe abgeleitet. Ein repräsentativer Tagesgang des Flugverkehrsaufkommens konnte aus einem EUROCONTROL-Flugverkehrsdatensatz abgeleitet werden.

Durch Anwendung der Methode wurde der flugverkehrsinduzierte Beitrag der linearen Kondensstreifenbedeckung, der Zirrenbedeckung und der ausgehenden langwelligen Strahlung quantifiziert. Für die lineare Kondensstreifenbedeckung wurden Werte zwischen 0,10 und 0,15 % ermittelt. Die Absolutbeträge dieser Werte erscheinen kleiner als andere Werte in der Literatur, dies lässt sich jedoch auf die geringere räumliche Auflösung von SEVIRI und die dadurch geringere Detektionseffizienz linearer Kondensstreifen zurückführen. Für die flugverkehrsinduzierte Zirrenbedeckung wurden Werte von 1,0 – 2,0 % ermittelt. Die flugverkehrsinduzierte Zirrenbedeckung liegt damit deutlich über dem diagnostizierten Wert der linearen Kondensstreifenbedeckung in dieser Arbeit (Faktor 10-15), aber auch um einen Faktor 2 – 4 über den Werten linearer Kondensstreifenbedeckung, wie sie mit dem derzeit wohl ausgereiftesten CDA (Duda et al. 2013) für NAR ermittelt wurden. Für den langwelligen Strahlungsantrieb infolge flugverkehrsinduzierter Zirrenbedeckung wurden Werte von 650 – 850 mW/m<sup>2</sup> gefunden. Eine Zirrenbedeckungsänderung von 1 – 2 % kann diesen hohen Wert nicht komplett erklären



(Schumann und Graf 2013). Es ist anzunehmen, dass einerseits Zirrenbedeckungsgradveränderungen nicht voll erfasst werden und sich andererseits flugverkehrsinduzierte Zirren teilweise auch über, unter oder in bereits existierenden Zirrenfeldern bilden und dort Strahlungswirksamkeit entfalten, während sie die Zirrenbedeckung dort definitionsgemäß nicht verändern.

Durch die Anwendung der Methode in Kombination mit angenommenen natürlichen Hintergrundtagesgängen können die beobachteten Tagesgänge weitgehend erklärt werden. Die besten Ergebnisse, gemessen im Korrelationskoeffizienten zwischen beobachtetem und modelliertem Tagesgang, werden für den langwelligen Strahlungsantrieb erreicht; hier kann der beobachtete Tagesgang als Summe von Hintergrundtagesgang und modelliertem Flugverkehrsbeitrag mit einem Korrelationskoeffizienten von bis zu 0,96 reproduziert werden. Bei der Zirrenbedeckung werden Korrelationskoeffizienten zwischen 0,77 und 0,91 erreicht.

Bei der linearen Kondensstreifenbedeckung wird die maximale Wirkung etwa 1,3 h nach der Emission erreicht, bei der flugverkehrsinduzierten Zirrenbedeckung stellt sich die maximale Wirkung nach 2,5 – 3 h ein. Der langwellige Strahlungsantrieb entfaltet schon etwa 2 h nach der Emission seine maximale Wirkung. Der Abfall der Wirkung auf Zirrenbedeckung und langwelligen Strahlungsfluss dauert darüber hinaus aber noch an; nach etwa sechs Stunden ist immer noch die Hälfte der Maximalwirkung aktiv, bis sie nach 10 Stunden fast vollständig abgeklungen ist.

Die Zuverlässigkeit der Methode hängt von der geeigneten Wahl der Transformationsfunktion, vor allem aber wesentlich von der korrekten Annahme der natürlichen Hintergrundtagesgänge der beobachteten Größen ab. Der natürliche Tagesgang – „natürlich“ ist hier synonym zu „nicht vom Flugverkehr beeinflusst“ zu verstehen – ist jedoch nicht direkten Messungen zugänglich. Kurze Phasen von Luftraumsperrungen, die z. B. infolge von Vulkanausbrüchen oder aufgrund terroristischer Anschläge auftreten, reichen hierfür nicht aus (Dietmüller et al. 2008). Historische Daten aus Zeiten vor nennenswertem Flugverkehrsaufkommen liegen nicht vor. Stattdessen müssen hilfsweise aus Modellen möglichst realistische Tagesgänge extrahiert oder ein ähnliches Beobachtungsgebiet ohne Flugverkehr analysiert werden. Beide Ansätze wurden in dieser Arbeit zur Anwendung gebracht.

Entgegen den anderen oben genannten Ansätzen (Linienerkennung und Trendanalyse) liefert diese Methode nicht nur eine Information über die Größenordnung der betrachteten Parameter. Als Ergebnis des Fits ergibt sich direkt eine Zeitskala, auf der die Störung wirkt. Die Kenntnis dieser Größe ist nicht nur von wissenschaftlichem Interesse; sie hat darüber hinaus weitreichende Folgen für die Entwicklung von Mitigationsstrategien. Sind etwa die typischen Zeitskalen im Bereich weniger Stunden, so kann sich eine zeitliche Verlagerung des Flugverkehrs klimatologisch lohnen (Vermeidung von Nachtflügen). Soweit dagegen Kondensstreifen typischerweise einen Tag existieren, ist eine derartige Mitigationsstrategie nicht zielführend.

Die in dieser Arbeit entwickelte Methode der Quantifizierung flugverkehrsinduzierter Beiträge in Tagesgängen verschiedener Größen wurde in der Arbeit Graf et al. (2012) publiziert. In der Arbeit Schumann und Graf (2013) wurde die Methode auf die ausgehende langwellige Strahlung angewandt und zur Skalierung der Ergebnisse eines Kondensstreifen-Zirren Vorhersagemodells an die beobachteten Werte in NAR genutzt. So konnten die für NAR ermittelten Werte global extrapoliert werden. Die Zahlenwerte in dieser Arbeit unterscheiden sich leicht von den in den Arbeiten Graf et al. (2012) und Schumann und Graf (2013) berichteten Werten. Zum einen liegt dies an einer in dieser Arbeit verbreiterten zeitlichen Basis der zur Ableitung von Modelltagesgängen herangezogenen ECMWF-Daten, aber auch die Definition eines Jahres (vgl. 2.8) wurde in dieser Arbeit leicht verändert.

Der Vergleich der räumlichen Verteilung der untersuchten Größen mit der geographischen Verteilung von aus MODIS abgeleiteten Kondensstreifen (Abschnitt 3.8) wurde noch nicht publiziert.

## 5.2 Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind zunächst nur für die betrachtete Region gültig. Die Methode stellt besondere Anforderungen an die Form des Tagesgangs des Flugverkehrsaufkommens. Insbesondere soll der Tagesgang keine Ähnlichkeit mit dem Tagesverlauf der solaren Einstrahlung haben, um Flugverkehrseffekte und natürliche Beiträge trennen zu können. Damit ist eine Anwendung der Methode über Europa oder Amerika schwierig. Dennoch können die für das Untersuchungsgebiet gewonnenen Werte auch Hinweise auf die global zu erwartenden Werte der flugverkehrsinduzierten Zirrenbedeckung und der flugverkehrsinduzierten Änderung der ausgehenden langwelligen

Strahlungsflussdichte liefern. Dazu können mithilfe von Modellen die für NAR abgeleiteten Größen global extrapoliert werden. Eine derartige Analyse, die über den Rahmen dieser Arbeit hinausgeht und insofern an dieser Stelle als Ausblick zu klassifizieren ist, konnte mittlerweile durchgeführt werden und ist publiziert (Schumann und Graf 2013). In der Zusammenfassung wurde darauf hingewiesen, dass die Zuverlässigkeit der Methode von der korrekten Annahme der natürlichen Hintergrundtagesgänge der beobachteten Größen abhängt. Es ist zu erwarten, dass mit der fortschreitenden Entwicklung von Wettervorhersagemodellen diese Tagesgänge immer besser in Modellen repräsentiert werden. Die in dieser Arbeit verfolgte Methode wird also im Laufe der Zeit immer exakter anwendbar werden.

Die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Messgrößen der linearen Kondensstreifenbedeckung, der Zirrenbedeckung und der ausgehenden langwelligen Strahlung können in zukünftigen Arbeiten auf weitere Parameter ausgedehnt werden. So ermöglicht der in Abschnitt 2.6 angesprochene Algorithmus COCS (Kox 2012) die Untersuchung des Tagesgangs der optischen Dicke und ggf. zukünftig auch des effektiven Radius von Eispartikeln.

Eine ähnlich konzipierte Studie ließe sich in Gebieten durchführen, deren Tagesgang der Flugverkehrsdichte ein spezifisches Muster zeigt, welches sich deutlich von natürlichen Strukturen unterscheidet. Insbesondere könnte das Verfahren auf Gebiete über dem Pazifik angewandt werden. Dort zeigt der Flugverkehr zwischen Amerika und Asien eine ähnliche Signatur. Allerdings müssten hier anstelle von Meteosat-8/9 Daten die amerikanischen geostationären Satelliten der GOES-Reihe als Datenquelle herangezogen werden. Aber auch im Bereich des von Meteosat abgedeckten Bereichs gibt es noch weitere Regionen, in denen diese Methode zur Anwendung gebracht werden kann. Denn auch der Flugverkehr zwischen Europa und Südamerika zeigt, wenngleich auch mit einem wesentlich niedrigeren Gesamtaufkommen, einen ähnlichen Tagesgang, der durch das Maximum der nach Norden gehenden Flüge einerseits und das Maximum der nach Süden gehenden Flüge andererseits hervorgerufen wird.

Grundsätzlich lässt sich die entwickelte Methode nicht nur wie hier gezeigt auf die Tagesskala, sondern auch auf die Wochenskala anwenden. Prinzipiell bietet sich die Analyse des Wochengangs anstelle des Tagesgangs noch mehr an, denn ggf. periodisch mit einer Schwingungsdauer von exakt sieben Tagen auftretende Signale in z.B. der Zirrenbedeckung lassen sich mit großer Wahrscheinlichkeit dem Flugverkehr zuordnen. Lediglich Wochenzyklen in anthropogenen bodengebundenen Emissionen könnten theoretisch störend wirken. Leider sind die Wochengänge im Flugverkehrsaufkommen

zumindest nach ersten Untersuchungen sehr gering. Die Fluggesellschaften versuchen, durch entsprechende Preisgestaltung die Nachfrage auf die gesamte Woche zu verteilen, um die Auslastung der Flugzeugflotte möglichst hoch zu halten. Allerdings wurde dieser Effekt noch nicht abschließend untersucht; er bleibt zukünftigen Studien vorbehalten.

# Anhang A

## Spezifikation der benutzten ECMWF Daten

Wie in Abschnitt 2.11 diskutiert, existieren im ECMWF-Archiv eine Vielzahl von verschiedenen Modellversionen (operationelles Archiv, ERA-Interim, delayed-cutoff, ...). Um dem Leser einen expliziten Zugriff auf die in dieser Arbeit genutzte Modellversion zu erlauben, ist hier der MARS-Aufruf exemplarisch für einen Zeitschritt aufgeführt. Bei diesem Aufruf werden HCC-Felder extrahiert (PARAM=HCC). Diese Zeile wäre für TTR entsprechend anzupassen (PARAM=TTR).

```
RETRIEVE,  
CLASS=OD,  
TYPE=FC,  
EXPVER=1,  
LEVTYPE=SFC,  
LEVELIST=ALL,  
RESOL=799,  
STREAM=OPER,  
REPRES=GG,  
DATE=20060901,  
TIME=12,  
STEP=0/3/6/9/12/15/18/21/24/27/30/33/36/39/42/45/48/51/54/57/60/  
63/66/69/72/75/78/81/84/87/90/93/96/99/102/105/108/111/114/117/  
120/123/126/129/132/135/138/141/144,  
PARAM=HCC,  
AREA=65.0/ -50.0/ -65.0/0.0,
```

GRID=0.25/0.25,  
FORMAT=P,  
TARGET=OD\_FC\_20060901\_12\_cc.grb

# Anhang B

## Speicherort der benutzten Daten

An dieser Stelle sind die Speicherorte der für diese Arbeit benutzten Daten aufgeführt.

- Die Original-EUROCONTROL Daten für das Jahr 2004 sind auf dem Rechner lx313 unter `/export/MSG5/contrails2/contrails_member/` verfügbar. Wenngleich diese Daten das gesamte Jahr abdecken, ist darauf zu achten, dass der Datensatz originär nur aus sechs Wochen besteht (vgl. Abschnitt 2.3) und die übrigen Tage von EUROCONTROL aus diesen sechs Wochen konstruiert wurden.
- Die SEVIRI Daten sind im HRIT-Format verfügbar und liegen auf dem Rechner lx313 im Verzeichnis `/export/MSG6/HRIT/` (für die Jahre 2004–2006), `/export/MSG7/HRIT/` (2007–2008), `/export/MSG8/HRIT/` (2009–2010), `/export/MSG9/HRIT/` (2011–2012). Über den symbolischen Link `/data/msg/HRIT/` sind die Daten zudem ohne jahresabhängige Pfadunterscheidung adressierbar.
- Die abgeleiteten Produkte von LiCC sind in einer zylinderäquidistanten Auflösung von  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  für NAR und SAR jeweils für ein Kalenderjahr auf dem Rechner lx313 unter `/export/MSG3/graf_k/cda_eqd/` zu finden (`field2004_cda_nar.sav`, ..., `field2004_cda_nar.sav`). Sie liegen als IDL `.sav`-Dateien (vgl. Handbuch IDL 7.0) vor und wurden mit der IDL Routine `SAVE` erzeugt. `SAVE` erzeugt Daten im XDR (eXternal Data Representation) Format. Diese Dateien können mit der IDL Routine `RESTORE` gelesen werden.
- Die abgeleiteten Produkte von CC und OLR sind in einer zylinderäquidistanten Auflösung von  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  für NAR und SAR jeweils für ein Kalenderjahr als `.sav` Dateien auf dem Rechner lx313 unter `/export/MSG8/tmp/mecida2/` abgelegt (`field2004_ci_nar_mecida2.sav`, ..., `field2012_ci_nar_mecida2.sav` für

CC in NAR, field2004\_lw\_nar\_mecida2.sav, ..., field2012\_lw\_nar\_mecida2.sav für OLR in NAR, field2004\_ci\_sar\_mecida2.sav, ..., field2012\_ci\_sar\_mecida2.sav für CC in SAR, field2004\_lw\_sar\_mecida2.sav, ..., field2012\_lw\_sar\_mecida2.sav für OLR in SAR). Hier finden sich auch die in Abschnitt 4.5 diskutierten auf unterschiedliche Weise errechneten OLR-Felder für das Jahr 2005 (field2005\_lw\_nar\_mecida2\_ci.sav für den Fall aus Gleichung 4.3 bzw. field2005\_lw\_nar\_mecida2\_wo\_ci.sav für den Fall aus Gleichung 4.2).

- Die aus diesen Feldern abgeleiteten Zeitreihen von LiCC, CC und OLR sind unter /athome/graf\_k/mecida\_final/eval/ abgelegt. Diese Felder sind als formatierte ASCII .txt Dateien abgelegt und können somit nicht nur unter IDL, sondern von jedem beliebigen Programm gelesen werden. Die Nomenklatur folgt dem Schema produkt\_gebiet\_jahr\_time\_series.txt, z.B. mecida2\_nar\_2004\_time\_series.txt oder olr\_mecida2\_sar\_2009\_time\_series.txt. Diese Dateien enthalten für jeden 15-Minuten Zeitschritt des betrachteten Jahres eine Zeile, in der der Zeitstempel, der Satellitenstatus und die Messgrößen für NAR, NAR-W, NAR-E und weitere Teilgebiete aufgelistet sind. Die Gebietszuordnung der einzelnen Spalten ist in der Datei README.txt im selben Ordner erläutert.
- Die Programme, die zur Ableitung von LiCC, CC und OLR genutzt wurden, und die nachgeschalteten Programme zur Extraktion der Tagesgänge der entsprechenden Größen sind unter /athome/graf\_k/mecida\_final/eval/ abgelegt. Dort finden sich auch Routinen, die die Extraktion der Flugverkehrsdichte aus den oben genannten EUROCONTROL Daten erlauben. Eine Datei README.TXT im selben Verzeichnis erläutert den Einsatz.



# Literaturverzeichnis

- H. Appleman. The formation of exhaust contrails by jet aircraft. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 34:14–20, 1953.
- D. Atlas, Z. Wang, and D. P. Duda. Contrails to cirrus-morphology, microphysics, and radiative properties. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 45(1):5–19, 2006. doi: 10.1175/JAM2325.1.
- S. Bakan, M. Betancor, V. Gayler, and H. Grassl. Contrail frequency over Europe from NOAA-satellite images. *Ann. Geophys.*, 12:962–968, 1994. doi: 10.1007/s00585-994-0962-y.
- S. T. Bedka, P. Minnis, D. P. Duda, and R. Chee, T. L. and Palikonda. Properties of linear contrails in the Northern Hemisphere derived from 2006 Aqua MODIS observations. *Geophys. Res. Lett.*, 2013. doi: 10.1029/2012GL054363. early view.
- M. Betancor Gothe and H. Graßl. Satellite remote sensing of the optical depth and mean crystal size of thin cirrus and contrails. *Theor. Appl. Clim.*, 48:101–113, 1993. doi: 10.1007/BF00864917.
- O. Boucher. Air traffic may increase cirrus cloudiness. *Nature*, 397:30–31, 1999. doi: 10.1038/16169.
- G. P. Brasseur and M. Gupta. Impact of aviation on climate - Research priorities. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91:461–463, 2010. doi: 10.1175/2009BAMS2850.1.
- L. Bugliaro, T. Zinner, C. Keil, B. Mayer, R. Hollmann, M. Reuter, and W. Thomas. Validation of cloud property retrievals with simulated satellite radiances: a case study for SEVIRI. *Atmos. Chem. Phys.*, 11(12):5603–5624, 2011. doi: 10.5194/acp-11-5603-2011.
- U. Burkhardt and B. Kärcher. Process-based simulation of contrail cirrus in a global climate model. *J. Geophys. Res.*, 114:D16201, 2009. doi: 10.1029/2008JD011491.
- U. Burkhardt and B. Kärcher. Global radiative forcing from contrail cirrus. *Nature Clim. Change*, 1:54–58, 2011. doi: 10.1038/nclimate1068.
- D. P. Dee, S. M. Uppala, A. J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M. A. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, A. C. M. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, C. Delsol, R. Dragani, M. Fuentes, A. J. Geer, L. Haimberger, S. B. Healy, H. Hersbach, E. V. Holm, L. Isaksen, P. Kallberg,

- M. Köhler, M. Matricardi, A. P. McNally, B. M. Monge-Sanz, J.-J. Morcrette, B.-K. Park, C. Peubey, P. de Rosnay, C. Tavalato, J.-N. Thepaut, and F. Vitart. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137(656):553–597, 2011. doi: 10.1002/qj.828.
- M. Derrien and H. Le Gléau. MSG/SEVIRI cloud mask and type from SAFNWC. *Int. J. Remote Sens.*, 26:4707–4732, 2005. doi: 10.1080/01431160500166128.
- N. C. Dickson, K. Gierens, H. L. Rogers, and R. L. Jones. Vertical spatial scales of ice supersaturation and probability of ice supersaturated layers in low resolution profiles of relative humidity. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Transport, Atmosphere and Climate (TAC-2)*, pages 239–243, 2009.
- S. Dietmüller, M. Ponater, R. Sausen, K.-P. Hoinka, and S. Pechtl. Contrails, natural clouds, and diurnal temperature range. *J. Climate*, 21(19):5061–5075, 2008. doi: 10.1175/2008JCLI2255.1.
- D. P. Duda, P. Minnis, L. Nguyen, and R. Palikonda. A case study of the development of contrail clusters over the great lakes. *J. Atmos. Sci.*, 61(10):1132–1146, 2004.
- D. P. Duda, P. Minnis, K. Khlopenkov, T. L. Chee, and R. Boeke. Estimation of 2006 Northern Hemisphere contrail coverage using MODIS data. *Geophys. Res. Lett.*, 40(3):612–617, 2013. doi: 10.1002/grl.50097.
- K. Eleftheratos, C. S. Zerefos, P. Zanis, D. S. Balis, G. Tselioudis, K. Gierens, and R. Sausen. A study on natural and manmade global interannual fluctuations of cirrus cloud cover for the period 1984–2004. *Atmos. Chem. Phys.*, 7(10):2631–2642, 2007. doi: 10.5194/acp-7-2631-2007.
- R. Ettenreich. Wolkenbildung über einer Feuerbrunst und an Flugzeugabgasen. *Meteorol. Z.*, 36:335–336, 1919.
- EUMETSAT. *Outgoing Longwave Radiation Factsheet*. EUMETSAT, eum/ops/-doc/09/5176 edition, 2010.
- European Commission. Flightpath 2050, Europe’s vision for aviation. *Report of the High Level Group on Aviation Research*, 2011. doi: 10.2777/50266.
- F. Ewald, L. Bugliaro, H. Mannstein, and B. Mayer. An improved cirrus detection algorithm MeCiDA2 for SEVIRI and its evaluation with MODIS. *Atmos. Meas. Tech.*, 6(2):309–322, 2013. doi: 10.5194/amt-6-309-2013.
- C. Eyers, P. Norman, J. Middel, M. Plohr, S. Michot, K. Atkinson, and R. Christou. Aero2k global aviation emissions inventories for 2002 and 2025. Technical report, Technical Report QINETIC/04/01113 (QinetiQ, 2004), 2004.
- D. Fahey, U. Schumann, S. Ackerman, P. Artaxo, O. Boucher, M. Danilin, B. Kärcher, P. Minnis, T. Nakajima, and O. Toon. *Aviation-Produced Aerosols and Cloudiness*, pages 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, 1999. ISBN 0 521 66300 8. URL <http://elib.dlr.de/9107>.
- V. Freudenthaler, F. Homburg, and H. Jäger. Optical parameters of contrails from lidar measurements: Linear depolarization. *Geophys. Res. Lett.*, 23:3715–3718, 1996. doi: 10.1029/96GL03646.
- C. Frömming, M. Ponater, U. Burkhardt, A. Stenke, S. Pechtl, and R. Sausen. Sensitivity of contrail coverage and contrail radiative forcing to selected key parameters. *Atmos. Environ.*, 45:1483–1490, 2011. doi: 10.1016/j.atmosenv.2010.11.033.
- K. Gierens, L. Lim, and K. Eleftheratos. A Review of Various Strategies for Contrail Avoidance. *Open. Atmos. Sci. J.*, 2:1–7, 2008. doi: 10.2174/1874282300802010001.
- K. Gierens, B. Kärcher, H. Mannstein, and B. Mayer. Aerodynamic Contrails: Phenomenology and Flow Physics. *J. Atmos. Sci.*, 66:217, 2009. doi: 10.1175/2008JAS2767.1.
- K. Graf. Der Einfluss des Flugverkehrs auf den Zirrenbedeckungsgrad in Europa, Nordafrika und über dem Nordatlantik. Diplomarbeit, Fakultät für Physik der Ludwig Maximilians Universität München, 2007.
- K. Graf, H. Mannstein, B. Mayer, and U. Schumann. Some evidence of aviation fingerprint in diurnal cycle of cirrus over the North Atlantic. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Transport, Atmosphere and Climate (TAC-2)*, pages 180–185, 2009.
- K. Graf, U. Schumann, H. Mannstein, and B. Mayer. Aviation induced diurnal North Atlantic cirrus cover cycle. *Geophys. Res. Lett.*, 39:L16804, 2012. doi: 10.1029/2012GL052590.
- J. E. Harries, J. E. Russell, J. A. Hanafin, H. Brindley, J. Futyan, J. Rufus, S. Kellock, G. Matthews, R. Wrigley, A. Last, J. Mueller, R. Mossavati, J. Ashmall, E. Sawyer, D. Parker, M. Caldwell, P. M. Allan, A. Smith, M. J. Bates, B. Coan, B. C. Stewart, D. R. Lepine, L. A. Cornwall, D. R. Corney, M. J. Ricketts, D. Drummond, D. Smart, R. Cutler, S. Dewitte, N. Clerbaux, L. Gonzalez, A. Ipe, C. Bertrand, A. Joukoff, D. Crommelynck, N. Nelms, D. T. Llewellyn-Jones, G. Butcher, G. L. Smith, Z. P. Szewczyk, P. E. Mlynchak, A. Slingo, R. P. Allan, and M. A. Ringer. The Geostationary Earth Radiation Budget Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 86: 945–960, 2005. doi: 10.1175/BAMS-86-7-945.
- J. M. Haywood, R. P. Allan, J. Bornemann, P. M. Forster, P. N. Francis, S. Milton, G. Rädcl, A. Rap, K. P. Shine, and R. Thorpe. A case study of the radiative forcing of persistent contrails evolving into contrail-induced cirrus. *J. Geophys. Res.*, 114 (D24), 2009. doi: 10.1029/2009JD012650.
- J. Hendricks, B. Kärcher, and U. Lohmann. Effects of ice nuclei on cirrus clouds in a global climate model. *J. Geophys. Res.*, 116(D18), 2011. doi: 10.1029/2010JD015302.

- ICAO. *Guidance concerning Air Navigation in and above the North Atlantic MNPS Airspace - Edition 2011*. European and North Atlantic Office of ICAO, 2011. URL <http://www.paris.icao.int/>. Published on behalf of the North Atlantic Systems Planning Group (NAT SPG) by the European and North Atlantic Office of ICAO.
- IDL 7.0. *IDL Reference Guide*. Boulder, CO 80301, 2007. URL <http://www.rsinc.com>.
- H. Iwabuchi, P. Yang, K. N. Liou, and P. Minnis. Physical and optical properties of persistent contrails: Climatology and interpretation. *J. Geophys. Res.*, 117(D6), 2012. doi: 10.1029/2011JD017020.
- H. Jäger, V. Freudenthaler, and F. Homburg. Remote sensing of optical depth of aerosols and cloud cover related to air traffic. *Atmos. Environ.*, 32:3123–3127, 1998. doi: 10.1016/S1352-2310(97)00332-4.
- B. Kärcher, B. Mayer, K. Gierens, U. Burkhardt, H. Mannstein, and R. Chatterjee. Aerodynamic Contrails: Microphysics and Optical Properties. *J. Atmos. Sci.*, 66: 227, 2009. doi: 10.1175/2008JAS2768.1.
- T. Koop, B. Luo, A. Tsias, and T. Peter. Water activity as the determinant for homogeneous ice nucleation in aqueous solutions. *Nature*, 406:611–614, 2000. doi: 10.1038/35020537.
- S. Kox. *Remote sensing of the diurnal cycle of optically thin cirrus clouds*. Dissertation, Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München, 2012. URL <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bvb:19-151170>.
- W. Krebs. *Analyse des Einflusses des Flugverkehrs auf die natürliche Zirkusbewölkung über Europa, Nordafrika und dem Nordatlantik*. Dissertation, Fakultät für Physik der Ludwig Maximilians Universität München, 2006. URL <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bvb:19-53454>.
- W. Krebs, H. Mannstein, L. Bugliaro, and B. Mayer. Technical note: A new day-and night-time Meteosat Second Generation Cirrus Detection Algorithm MeCiDA. *Atmos. Chem. Phys.*, 7(24):6145–6159, 2007. doi: 10.5194/acp-7-6145-2007.
- N. Lamquin, K. Gierens, C. J. Stubenrauch, and R. Chatterjee. Evaluation of upper tropospheric humidity forecasts from ECMWF using AIRS and CALIPSO data. *Atmos. Chem. Phys.*, 9(5):1779–1793, 2009. doi: 10.5194/acp-9-1779-2009.
- D. S. Lee, D. W. Fahey, P. M. Forster, P. J. Newton, R. C. Wit, L. L. Lim, B. Owen, and R. Sausen. Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmos. Env.*, 43(22-23):3520 – 3537, 2009. doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.04.024.
- D. S. Lee, G. Pitari, V. Grewe, K. Gierens, J. E. Penner, A. Petzold, M. J. Prather, U. Schumann, A. Bais, T. Berntsen, D. Iachetti, L. L. Lim, and R. Sausen. Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation. *Atmos. Env.*, 44:4678–4734, 2010. doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.06.005.

- H. Mannstein and U. Schumann. Aircraft induced contrail cirrus over Europe. *Meteorol. Z.*, 14(4):549 – 554, 2005. doi: 10.1127/0941-2948/2005/0058.
- H. Mannstein and U. Schumann. Corrigendum to Mannstein, H. & Schumann, U., 2005: Aircraft induced contrail cirrus over Europe. *Meteorol. Z.*, 14, no. 4, p. 549-554. *Meteorol. Z.*, 16:131 – 132, 2007. doi: 10.1127/0941-2948/2007/0178.
- H. Mannstein, R. Meyer, and P. Wendling. Operational detection of contrails from NOAA-AVHRR-data. *Int. J. Rem. Sens.*, 20(8):1641–1660, 1999. doi: 10.1080/014311699212650.
- H. Mannstein, P. Spichtinger, and K. Gierens. A Note on How to Avoid Contrail Cirrus. *Transport. Res.*, 10:421 – 426, 2005. doi: 10.1016/j.trd.2005.04.012.
- H. Mannstein, A. Brömser, and L. Bugliaro. Ground-based observations for the validation of contrails and cirrus detection in satellite imagery. *Atmos. Meas. Tech.*, 3(3):655–669, 2010. doi: 10.5194/amt-3-655-2010.
- H. Mannstein, M. Vazquez-Navarro, K. Graf, D. P. Duda, and U. Schumann. Contrail detection in satellite images. In U. Schumann, editor, *Atmospheric Physics*, Research Topics in Aerospace, pages 433–447. Springer Berlin Heidelberg, 2012. ISBN 978-3-642-30182-7. doi: 10.1007/978-3-642-30183-4.
- D. Marquardt. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *J. Soc. Ind. Appl. Mat.*, 11(2):431–441, 1963. doi: 10.1137/0111030.
- S. Matthes, U. Schumann, V. Grewe, C. Frömming, K. Dahlmann, A. Koch, and H. Mannstein. Climate Optimized Air Transport. In U. Schumann, editor, *Atmospheric Physics*, Research Topics in Aerospace, pages 727–746. Springer Berlin Heidelberg, 2012. ISBN 978-3-642-30182-7. doi: 10.1007/978-3-642-30183-4.
- B. Mayer and A. Kylling. Technical note: The libradtran software package for radiative transfer calculations - description and examples of use. *Atmos. Chem. Phys.*, 5(7): 1855–1877, 2005. doi: 10.5194/acp-5-1855-2005.
- M. McCormick. Sage II: An overview. *Adv. Space Res.*, 7(3):219 – 226, 1987. doi: 10.1016/0273-1177(87)90151-7.
- R. Meerkötter, U. Schumann, P. Minnis, D. Doelling, T. Nakajima, and Y. Tsushima. Radiative forcing by contrails. *Ann. Geophys.*, 17:1080–1094, 1999. doi: 10.1007/s00585-999-1080-7.
- W. P. Menzel and J. F. W. Purdom. Introducing GOES-I: The First of a New Generation of Geostationary Operational Environmental Satellites. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 75:757–782, 1994.
- R. Meyer, H. Mannstein, R. Meerkötter, U. Schumann, and P. Wendling. Regional radiative forcing by line-shaped contrails derived from satellite data. *J. Geophys. Res.*, 107(4104):doi:10.1029/2001JD000426, 2002.

- P. Minnis, D. F. Young, D. P. Garber, L. Nguyen, W. L. Smith, Jr., and R. Palikonda. Transformation of contrails into cirrus during SUCCESS. *Geophys. Res. Lett.*, 25: 1157–1160, 1998. doi: 10.1029/97GL03314.
- P. Minnis, J. Ayers, R. Palikonda, and D. Phan. Contrails, cirrus trends, and climate. *J. Clim.*, 17:1671–1685, 2004.
- P. Minnis, R. Palikonda, B. J. Walter, J. K. Ayers, and H. Mannstein. Contrail properties over the eastern North Pacific from AVHRR data. *Meteorol. Z.*, 14(4):515 – 523, 2005. doi: 10.1127/0941-2948/2005/0056.
- O. Möhler, S. Büttner, C. Linke, M. Schnaiter, H. Saathoff, O. Stetzer, R. Wagner, M. Krämer, A. Mangold, U. Ebert, and U. Schurath. Effect of sulfuric acid coating on heterogeneous ice nucleation by soot aerosol particles. *J. Geophys. Res.*, 110 (11210), 2005. doi: 10.1029/2004JD005169.
- C. Newinger. Einfluss des Tagesgangs des Luftverkehrs auf Bedeckungsgrad und Strahlungsantrieb von Kondensstreifenwirren. Diplomarbeit, Fakultät für Physik der Ludwig Maximilians Universität München, 2010.
- C. Newinger and U. Burkhardt. Sensitivity of contrail cirrus radiative forcing to air traffic scheduling. *J. Geophys. Res.*, 117:D10205, 2012. doi: 10.1029/2011JD016736.
- R. Palikonda, P. Minnis, D. P. Duda, and H. Mannstein. Contrail coverage derived from 2001 AVHRR data over the continental United States of America and surrounding areas. *Meteorol. Z.*, 14(4):525 – 536, 2005. doi: 10.1127/0941-2948/2005/0051.
- J. E. Penner, Y. Chen, M. Wang, and X. Liu. Possible influence of anthropogenic aerosols on cirrus clouds and anthropogenic forcing. *Atmos. Chem. Phys.*, 9(3): 879–896, 2009. doi: 10.5194/acp-9-879-2009.
- J. J. Puschell, H. A. Lowe, J. W. Jeter, S. M. Kus, W. T. Hurt, D. Gilman, D. L. Rogers, R. L. Hoelter, and R. Ravella. Japanese Advanced Meteorological Imager: a next generation GEO imager for MTSAT-1R. In W. L. Barnes, editor, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, volume 4814 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, pages 152–161, 2002.
- A. Rap, P. M. Forster, A. Jones, O. Boucher, J. M. Haywood, N. Bellouin, and R. R. De Leon. Parameterization of contrails in the UK Met Office Climate Model. *J. Geophys. Res.*, 115(D10), 2010. doi: 10.1029/2009JD012443.
- R. Rhode and H. Pearson. Condensation trails - where they occur and what can be done about them. *Wartime Report*, 1942. URL <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a801456.pdf>.
- A. Rodriguez, R. Stuhlmann, S. Tjemkes, D. M. Aminou, H. Stark, and P. Blythe. Me-teosat Third Generation: mission and system concepts. In *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, volume 7453 of *Society of*

- Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, 2009. doi: 10.1117/12.824236.
- W. Rossow and R. Schiffer. Advances in understanding clouds from ISCCP. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80:2261–2287, 1999.
- J. E. Russell. QUALITY SUMMARY: GERB L2 ARG: 3 scan average Edition 1 product. Technical report, 2011. URL [http://ggsps.rl.ac.uk/GERBED1\\_ARG\\_QS\\_v2.pdf](http://ggsps.rl.ac.uk/GERBED1_ARG_QS_v2.pdf).
- K. Sassen. Contrail-cirrus and their potential for regional climate change. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78:1885–1903, 1997.
- J. Schmetz, P. Pili, S. Tjemkes, D. Just, J. Kerkmann, S. Rota, and A. Ratier. An Introduction to Meteosat Second Generation (MSG). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83:977–992, 2002.
- E. Schmidt. Die Entstehung von Eisnebel aus den Auspuffgasen von Flugmotoren. *Schriften der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung*, 44:1–15, 1941.
- J. Schulz, P. Albert, H.-D. Behr, D. Caprion, H. Deneke, S. Dewitte, B. Dürr, P. Fuchs, A. Gratzki, P. Hechler, R. Hollmann, S. Johnston, K.-G. Karlsson, T. Manninen, R. Müller, M. Reuter, A. Riihelä, R. Roebeling, N. Selbach, A. Tetzlaff, W. Thomas, M. Werscheck, E. Wolters, and A. Zelenka. Operational climate monitoring from space: the EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM-SAF). *Atmos. Chem. Phys.*, 9(5):1687–1709, 2009. doi: 10.5194/acp-9-1687-2009.
- U. Schumann. On conditions for contrail formation from aircraft exhausts. *Meteorol. Z.*, 5:4–23, 1996.
- U. Schumann. A contrail cirrus prediction model. *Geosci. Model Dev.*, 5(3):543–580, 2012. doi: 10.5194/gmd-5-543-2012.
- U. Schumann and K. Graf. Aviation-induced cirrus and radiation changes at diurnal timescales. *J. Geophys. Res.*, 118(5):2404–2421, 2013. doi: 10.1002/jgrd.50184.
- P. Spichtinger, K. Gierens, U. Leiterer, and H. Dier. Ice supersaturation in the tropopause region over Lindenberg, Germany. *Meteorol. Z.*, 12(3):143–156, 2003. doi: 10.1127/0941-2948/2003/0012-0143.
- F. Stordal, G. Myhre, W. Arlander, T. Svendby, E. Stordal, W. Rossow, and D. Lee. Is there a trend in cirrus cloud cover due to aircraft traffic? *Atmos. Chem. Phys.* doi: 10.5194/acp-5-2155-2005.
- C. J. Stubenrauch, A. Chédin, G. Rädcl, N. A. Scott, and S. Serrar. Cloud Properties and Their Seasonal and Diurnal Variability from TOVS Path-B. *J. Climate*, 19: 5531, 2006. doi: 10.1175/JCLI3929.1.
- N. Stuber and P. Forster. The impact of diurnal variations of air traffic on contrail radiative forcing. *Atmos. Chem. Phys.*, 7(12):3153–3162, 2007. doi: 10.5194/acp-7-3153-2007.

- N. Stuber, P. Forster, G. Rädcl, and K. Shine. The importance of the diurnal and annual cycle of air traffic for contrail radiative forcing. *Nature*, 441:864–867, 2006. doi: 10.1038/nature04877.
- A. M. Tompkins, K. Gierens, and G. Rädcl. Ice supersaturation in the ECMWF integrated forecast system. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 133(622):53–63, 2007. doi: 10.1002/qj.14.
- K. E. Trenberth, J. T. Fasullo, and J. Kiehl. Earth’s Global Energy Budget. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 90:311, 2009. doi: 10.1175/2008BAMS2634.1.
- S. M. Uppala, P. W. Kallberg, A. J. Simmons, U. Andrae, V. D. C. Bechtold, M. Fiorino, J. K. Gibson, J. Haseler, A. Hernandez, G. A. Kelly, X. Li, K. Onogi, S. Saarinen, N. Sokka, R. P. Allan, E. Andersson, K. Arpe, M. A. Balmaseda, A. C. M. Beljaars, L. V. D. Berg, J. Bidlot, N. Bormann, S. Caires, F. Chevallier, A. Dethof, M. Dragosavac, M. Fisher, M. Fuentes, S. Hagemann, E. Holm, B. J. Hoskins, L. Isaksen, P. A. E. M. Janssen, R. Jenne, A. P. McNally, J.-F. Mahfouf, J.-J. Morcrette, N. A. Rayner, R. W. Saunders, P. Simon, A. Sterl, K. E. Trenberth, A. Untch, D. Vasiljevic, P. Viterbo, and J. Woollen. The ERA-40 re-analysis. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131(612):2961–3012, 2005. doi: 10.1256/qj.04.176.
- M. Vazquez-Navarro, H. Mannstein, and B. Mayer. An automatic contrail tracking algorithm. *Atmos. Meas. Tech.*, 3(4):1089–1101, 2010. doi: 10.5194/amt-3-1089-2010.
- M. Vazquez-Navarro, B. Mayer, and H. Mannstein. A fast method for the retrieval of integrated longwave and shortwave top-of-atmosphere irradiances from MSG/SEVIRI (RRUMS). *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, 5:4969–5008, 2012. doi: 10.5194/amtd-5-4969-2012.
- I. Waitz, S. Lukachko, and J. Lee. Military aviation and the environment: Historical trends and comparison to civil aviation. *J. Aircraft*, 42(2):329–339, 2005.
- L. Weickmann. Wolkenbildung durch ein Flugzeug. *Naturwissenschaften*, 7:625, 1919.
- J. T. Wilkerson, M. Z. Jacobson, A. Malwitz, S. Balasubramanian, R. Wayson, G. Fleming, A. D. Naiman, and S. K. Lele. Analysis of emission data from global commercial aviation: 2004 and 2006. *Atmos. Chem. Phys.*, 10:6391–6408, 2010. doi: 10.5194/acp-10-6391-2010.
- D. M. Winker, M. A. Vaughan, A. Omar, Y. Hu, K. A. Powell, Z. Liu, W. H. Hunt, and S. A. Young. Overview of the CALIPSO Mission and CALIOP Data Processing Algorithms. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 26:2310, 2009. doi: 10.1175/2009JTECHA1281.1.
- WMO. International Cloud Atlas, Manual on the Observation of Clouds and Other Meteors. Technical Report I, World Meteorological Organisation Geneva, 1995.
- WMO. International Cloud Atlas, Plates. Technical Report 407, World Meteorological Organisation Geneva, 1987.



- D. Wylie, D. L. Jackson, W. P. Menzel, and J. J. Bates. Trends in Global Cloud Cover in Two Decades of HIRS Observations. *J. Climate*, 18:3021–3031, 2005. doi: 10.1175/JCLI3461.1.
- D. P. Wylie, W. P. Menzel, H. M. Woolf, and K. I. Strabala. Four Years of Global Cirrus Cloud Statistics Using HIRS. *J. Climate*, 7:1972–1986, 1994. doi: 10.1175/1520-0442(1994)007<1972:FYOGCC>2.0.CO;2.
- C. Zerefos, K. Eleftheratos, D. Balis, P. Zanis, G. Tselioudis, and C. Meleti. Evidence of impact of aviation on cirrus cloud formation. *Atmos. Chem. Phys.*, 3:1633–1644, 2003. doi: 10.5194/acp-3-1633-2003.

# Abkürzungsverzeichnis

ACARE	Advisory Council for Aeronautics Research in Europe
ACCRI	Aviation Climate Change Research Initiative
AIC	Aviation Induced Cirrus
CALIOP	Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization
CALIPSO	Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations
CDA	Contrail Detection Algorithm
COCS	Cirrus Optical properties derived from CALIOP and SEVIRI
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ESA	European Space Agency
EUMETSAT	European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
EUROCONTROL	European Organisation for the Safety of Air Navigation
FAA	Federal Aviation Administration
GERB	Geostationary Earth Radiation Budget Experiment
GRIB	GRIdded Binary
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
HCC	High Cloud Cover
HRV	High Resolution Visible
ICAO	International Civil Aviation Organization
IDL	Interactive Data Language
IFS	Integrated Forecast System
INSAT	Indian National Satellite System
IPA	Institut für Physik der Atmosphäre
IPCC	International Panel on Climate Change
LT	Local Time
MeCiDA	Meteosat Cirrus Detection Algorithmus

MFG	Meteosat First Generation
MODIS	MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer
MSG	Meteosat Second Generation
MTG	Meteosat Third Generation
MTSAT	Multifunctional Transport Satellites
NAR	North Atlantic Region
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NMPSA	North Atlantic minimum Navigation Performance Specifications Airspace
RRUMS	Rapid Retrieval of upwelling fluxes from MSG/SEVIRI
RSS	Rapid Scan Service
SAR	South Atlantic Region
SARS	Severe acute respiratory syndrome
SEVIRI	Spinning Enhanced Visible and Infra-Red Imager
SSP	Sub Satellite Point
TOA	Top Of Atmosphere
TTR	Top Thermal Radiation
UMARF	Unified Meteorological Archive and Retrieval Facility
WMO	World Meteorological Organisation

# Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen verwendet habe.

München, 17. April 2013

# Danksagung

Für die Begleitung und Unterstützung meiner Arbeit möchte ich mehreren Personen meinen Dank aussprechen.

In besonderer Weise gilt mein herzlicher Dank Herrn Prof. Dr. Ulrich Schumann für die enge fachliche Begleitung und die Begutachtung dieser Arbeit. Er stand stets für die Diskussion von Ergebnissen zur Verfügung und wirkte durch eigene Analysen und Konzeptideen konstruktiv beim Fortgang der Arbeit mit. Durch sein Kondensstreifen-zirren-Vorhersagemodell CoCiP und die damit durchgeführte Modellierung des Tagesgangs in NAR konnte die in der vorliegenden Arbeit verfolgte Hypothese untermauert werden. Sein tiefes Interesse an meiner Arbeit wirkte sehr motivierend.

Herrn Prof. Dr. Bernhard Mayer danke ich für die Begleitung der Arbeit und die Übernahme des Zweitgutachtens. Besonders zur Analyse des Einflusses von Bahnabweichungen von MSG auf die Helligkeitstemperaturen von SEVIRI hat er durch Rechnungen mit dem Strahlungstransportmodell LibRadtran beigetragen, aber auch an der Entwicklung der in dieser Arbeit benutzten Algorithmen MeCiDA, MeCiDA2 und RRUMS war er maßgeblich beteiligt.

Herzlich danke ich auch Herrn Dr. Hermann Mannstein für die Begleitung dieser Arbeit. Er hat den hier benutzten Kondensstreifen-erkennungsalgorithmus für MSG-SEVIRI entwickelt und war maßgeblich an der Entwicklung von MeCiDA, MeCiDA2 und RRUMS beteiligt. Diese Algorithmen und seine Expertise sind ein wichtiges Fundament dieser Arbeit. Hermann Mannstein verstarb plötzlich und unerwartet am 26.01.2013, kurz vor der Fertigstellung dieser Arbeit. Sein Tod ist fachlich und menschlich ein großer Verlust.

Ein weiterer Dank gilt David Duda im Speziellen für die Auswertung der MODIS-LiCC Resultate aus Duda et al. (2013) für das Untersuchungsgebiet und die Bereitstellung der für MODIS-Terra ermittelten Kondensstreifenbedeckung in NAR. Generell danke ich ihm und dem ganzen Team um Pat Minnis für die angenehme Kooperation im Rahmen des Projekts ACCRI.

Winfried Beer danke ich herzlich für die freundliche und professionelle Betreuung bei IT-Problemen und für die Bereitstellung von unzähligen TB an Speicherplatz.

Ein weiterer Dank gilt meiner Kollegin Sabine Rentsch für ihre Mithilfe beim Aufbau des achtjährigen MSG-Datensatzes.

Auch den weiteren Kolleginnen und Kollegen in meiner Abteilung sei gedankt für die angenehme Atmosphäre und das kollegiale Arbeitsklima. Mein Dank dafür an Dr. Ralf Meerkötter, Dr. Margarita Vasquez-Navarro, Dr. Luca Bugliaro, Dr. Stephan Kox und Isabelle Huber.

Besonders danken möchte ich Greta für ihre Unterstützung in allen Situationen und ihre Begleitung beim Radfahren, beim Essen gehen, auf das Frühlings- und Oktoberfest, auf den Auer Dult, auf diversen Stadtrundgängen berühmter Frauen und für vieles anderes.

Daneben möchte ich meinen Kolleginnen Ingo, Simon, Dominik, Stefan, Tina, Lisa, Jan, Anke, Phillip und vielen weiteren im Institut für abwechslungsreiche Stunden danken. Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern und Geschwistern für ihre Unterstützung.