Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Lufthansa

Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkung

Teilaspekt A: „Minderung der Treibhausgasemissionen“

Endbericht

Umweltgerechte Flugrouten-Optimierung (UFO)

Environmentally compatible flight route optimisation

Projektkoordinator: Dr. Hermann Mannstein
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
Institut für Physik der Atmosphäre
Oberpfaffenhofen
82234 Weßling
Tel.: 08153 28 2503
Fax.: 08153 28 1841
E-Mail: Hermann.Mannstein@dlr.de

Verbundpartner: Deutsche Lufthansa AG (DLH)
Deutscher Wetterdienst (DWD)
Deutsche Flugsicherung (DFS)
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

DFS Deutsche Flugsicherung

DWD

Inhaltsverzeichnis

Umweltgerechte Flugrouten-Optimierung (UFO) 1
1 Zusammenfassung 4
2 Problemstellung und Ziel 4
2.1 Gesamtziel des Vorhabens 4
2.2 Bezug zu den förderpolitischen Zielen 4
2.3 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele 4
3 Durchgeführte Arbeiten 5
3.1 AP1 : Bewertung des durch Flugverkehr an einem beliebigen Ort und Zeit induzierten Strahlungsantriebes. 5
3.1.1 Arbeitsmodell 5
3.1.2 Trajektorienmodell CoCiP 12
3.1.3 Zirren im Wettervorhersagemodell 14
3.2 AP2: Validierung der Verfahren zur Vorhersage von Zirren und Kondensstreifen . 15
3.2.1 Validierung der Vorhersagen 15
3.2.2 Validierung der Zirrusparametrisierung 20
3.3 AP3: Erstellung eines Verfahrens zur Flugroutenoptimierung und Bewertung 21
3.3.1 Flugroutenoptimierung im LIDO System 21
3.3.2 Ergebnisse der Optimierung 31
3.3.3 Bewertung der betrieblichen Machbarkeit und der Auswirkungen auf die Luftraumkapazität durch die Flugsicherung 44
3.4 AP4: Konzeption von Messverfahren zur Messung von Feuchte und Kondensstreifenbildung im Flug 51
3.4.1 Existierende Feuchtemesssysteme 51
3.4.2 Test des Feuchtesensors auf der Falcon 53
3.5 AP 5: Begleitende Aktivitäten (alle Partner) 53
3.5.1 Bewertung von Realisierungsmöglichkeiten 53
3.5.2 Präsentationen des Projektes auf Veranstaltungen 54
3.5.3 BMU-Bericht 55
3.5.4 EU-FP7 Projekt REACT4C 55
4 Gewonnene Erkenntnisse 57
4.1 Anwendungspotenzial, quantitative Abschätzung der erreichbaren Beiträge zum Ziel der Fördermaßnahme 57
4.2 Erfolgsaussichten und Umsetzungskonzepte 57
4.2.1 Potenzial für einen signifikanten Beitrag zu den nationalen Klimaschutzzielen .. 58
4.2.2 Wirtschaftlichkeit und Anwendungsbreite 58
4.2.3 Rückwirkung auf andere Nachhaltigkeitsfaktoren 59
5 Literatur 60

1 Zusammenfassung

Das Flugplanungssystem Lido/Flight der Lufthansa Systems AG wurde für eine klimaoptimierte Flugroutenplanung erweitert und modifiziert. Eine erste Erweiterung umfasst die Implementierung einer zusätzlichen Schnittstelle zum Deutschen Wetterdienst. Dadurch können zusätzliche Information über Ort und Zeit von eisübersättigten Gebieten bei der Flugplanung verarbeitet werden. Dies wiederum macht eine Vorhersage von Kondensstreifen möglich, d.h. von Gebieten, in denen beim Durchfliegen potentiell Kondensstreifen entstehen würden. Eine zweite Erweiterung betrifft den Flugroutenoptimierungsalgorithmus von Lido/Flight an sich. Er wurde derart weiterentwickelt, so dass neben der Optimierung von Kosten, Treibstoff, Zeit und Distanz nun auch eine Optimierung hinsichtlich der Klimawirksamkeit eines Fluges möglich ist. Für die Minimierung der Klimawirksamkeit wurden fünf verschiedene Strategien implementiert, die für eine Flugwegplanung einzeln ausgewählt werden können. Im Weiteren wurde die Optimierung der Kosten optional um einen Kostenblock Klimakosten erweitert.
Insgesamt stehen sieben verschiedene Strategien für eine klimaoptimierte Flugwegplanung zur Verfügung, die hinsichtlich ihrer Wirksamkeit, sowie hinsichtlich ihrer Mehrkosten und Umwege bewertet wurden. Dafür wurden über 40.000 Flugpläne für ausgewählte Destinationen und Verkehrsgebiete gerechnet und mit einer konventionellen Flugwegplanung verglichen. **Eine Machbarkeit steht allerdings unter der Prämisse, dass die meteorologischen und klimawirkungsbezogenen Vorhersagen sich in absehbarer Zeit verbessern**.
Dazu wurde beim Deutschen Wetterdienst eine neue Parameterisierung der Zirrus-Bewölkung entwickelt, die es erlaubt, eisübersättigte Gebiete besser zu erfassen. Für die Vorhersage von Kondensstreifen, sich daraus entwickelnden Zirren und deren Strahlungswirkung wurde und wird am Institut für Physik der Atmosphäre des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt ein Modell zur Vorhersage und Analyse von Kondensstreifen un d deren Klimawirkung entwickelt.

2 Problemstellung und Ziel

2.1 Gesamtziel des Vorhabens

Das Ziel dieses Projektes war es, durch Einbeziehung einer Strategie zur Vermeidung von Kondensstreifen in die Optimierung von Flugrouten die gesamte Klimawirkung des Luftverkehrs zu minimieren.

2.2 Bezug zu den förderpolitischen Zielen

Dieses Vorhaben bezieht sich auf den Teilaspekt A: „Minderung der Treibhausgasemissionen“ des Förderprogramms „Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkung“ und bezieht sich mit seinem Ziel, die Klimarelevanz der Emissionen des Luftverkehrs mittel- und langfristig zu verringern, auf das Rahmenprogramm „Forschung für Nachhaltigkeit“ des BMBF.

2.3 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele

Um das Gesamtziel der Optimierung von Flugrouten unter Berücksichtigung ihrer Klimawirkung zu erreichen und auf ihre Durchführbarkeit unter wirtschaftlichen Aspekten beurteilen zu können;,wurden folgende Arbeitsziele verfolgt:

- Bewertung des durch Flugverkehr an einem beliebigen Ort und Zeit induzierten Strahlungsantriebes durch eine Maßzahl für den zu erwartenden Strahlungsantrieb

- Validierung der Verfahren zur Vorhersage von Zirren und Kondensstreifen und der gewonnenen Maßzahl

- Flugroutenoptimierung unter zusätzlicher Berücksichtigung des Strahlungsantriebes

Ergänzend dazu werden Möglichkeiten untersucht, die Analyse und Vorhersage von eisübersättigten Regionen vor allem durch zusätzliche Feuchtemessungen von Verkehrsflugzeugen aus zu verbessern und direkt die Kondensstreifenbildung als Indikator für die Feuchte in der oberen Troposphäre zu erfassen.

3 Durchgeführte Arbeiten

3.1 AP1 : Bewertung des durch Flugverkehr an einem beliebigen Ort und Zeit induzierten Strahlungsantriebes.

3.1.1 Arbeitsmodell

3.1.1.1 Motivation

Sehr früh im Verlauf des Projektes wurde klar, dass die Verwendung eines Trajektorienverfahrens (online in LIDO OC oder in das globale DWD Wettervorhersagemodell GME integriert), das die Strahlungswirkung eines entstehenden Kondensstreifens während seiner Lebenszeit verfolgt, während der Laufzeit des Projektes nicht möglich sein würde, da ein entsprechendes Verfahren (CoCiP) erst im Jahr 2010 realisiert wurde. Auch offline war zu diesem Zeitpunkt eine offline Integration des Trajektorienverfahrens nicht mehr möglich. Um eine erfolgreiche Umsetzung der neuen Optimierungsverfahren bei LH Systems im LIDO OC zu gewährleisten, wurde vor diesem Hintergrund entschieden, vorhandene Strukturen des Datentransfers vom DWD zum LIDO System zu nutzen. Im LIDO System wurden bereits vor diesem Projekt Prognosen des Windfeldes mit einer räumlichen Auflösung von 1.25° x 1.25° in Länge und Breite und einer zeitlichen Auflösung von 3 Stunden für die relevanten Flugniveaus zur Berechnung des Treibstoffverbrauches und der Flugzeit und somit auch zur Optimierung der Flugrouten verwendet. Diese Daten werden vom globalen DWD Wettervorhersagemodell GME bereits während des operationellen Prognoselaufes bereitgestellt. Der Ablauf der operationellen Dienste sowohl beim DWD als auch bei LH-Systems wurde für das Projekt nutzbar gemacht, um auf Basis des DWD Modells einerseits Prognosen der Eisübersättigung und andererseits eine grob vereinfachte Abschätzung des potentiellen, über die Lebensdauer integrierten Strahlungsantriebes (Maßzahl) auf der Basis der im Prognoselauf zu einem Zeitpunkt verfügbaren Informationen über den Atmosphärenzustand bereitzustellen und an das LIDO System zu übermitteln.

3.1.1.2 Eisübersättigung

Die Entstehung von Kondensstreifen hängt stark von vorhandenen eisübersättigten Regionen ab. Ohne diese, würden sich Kondensstreifen bereits nach ca. 2 Minuten auflösen (Sussmann und Gierens 2001). Aus diesem Grund ist es von großer Wichtigkeit, dass diese korrekt vom Modell vorhergesagt werden. Das globale Modell GME des DWDs lässt Übersättigungen (Relative Feuchte über Eis RHi>100%) zu, welches eine gute Ausgangsbasis bietet. Untersucht werden muss jedoch, inwiefern die modellierten Werte denen der Wirklichkeit entsprechen.

Eisübersättigte Regionen, sogenannte ISSR (Ice Supersaturated Regions), befinden sich im Sommer und Herbst meist bei 300 hPa und im Winter und Frühling bei 340 hPa. Die durchschnittliche vertikale Ausdehnung liegt bei 1-2 km (Spichtinger et al. 2003) während die

horizontale Ausbreitung bei 150 ± 250 km liegt (Gierens und Spichtinger 2000) ,(Abbildung 1).

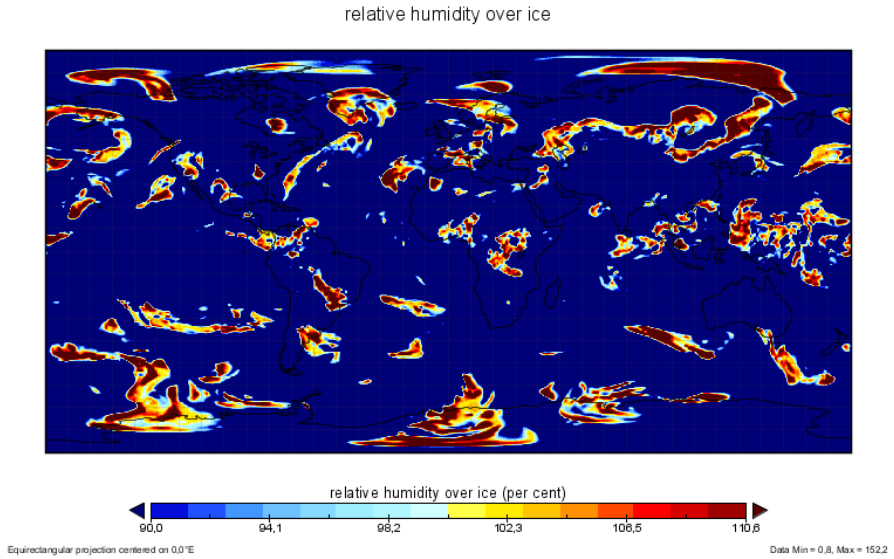


Abbildung 1: Relative Feuchte bezüglich Eis im DWD-GME Modell

Bei der Evolution der ISSR spielt die Eiswolkenmikrophysik, also die Entstehung oder das Vorhandensein von Zirren, sowie die räumliche und zeitliche Auflösung der Wettermodelle eine große Rolle. Im Rahmen des UFO Projektes wird primär das globale Modell GME verwendet, da somit Vorhersagen über dem Nord Atlantik betrachtet werden können. Zur Entwicklung eines besseren Verständnisses für die Eis-mikrophysikalisch relevanten Prozesse, werden auch Modellsimulationen von Idealisierten Simulationen in der COSMO Modell Umgebung, sowie COSMO-DE Läufe verwendet, die Modellkette ist in Abbildung 2 dargestellt.

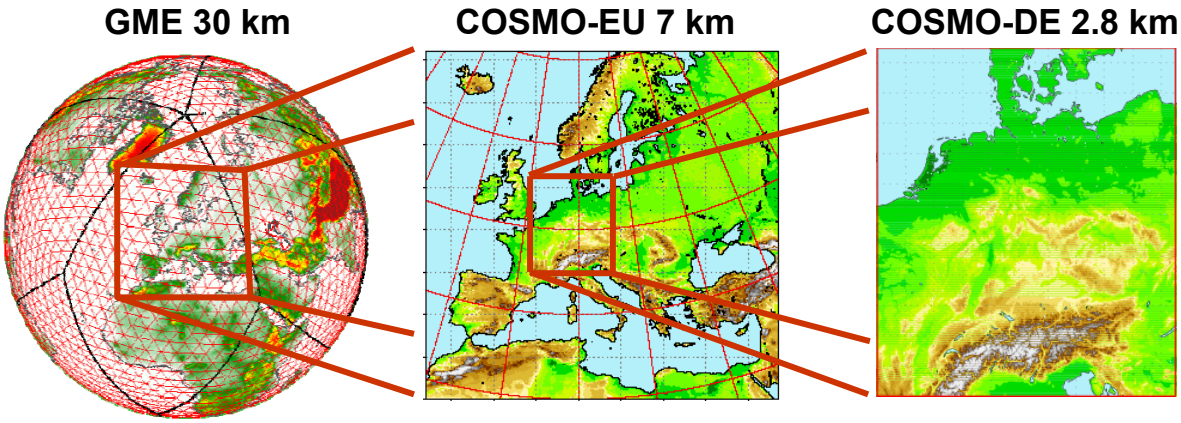


Abbildung 2: Operationelle Modellkette des DWD

In Abbildung 3 sind Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen für idealisierte Simulationen und das GME dargestellt. Die grüne Linie stellt jeweils den Referenzwert von RHi dar, welcher auf MOZAIC Messungen basiert (Gierens et al. 1999). Der linke Plot beschreibt das Verhalten von relativer Feuchte für idealisierte Simulationen bei einer Auflösung von 1km. Bedingt durch die hohe Auflösung werden atmosphärische Fluktuationen besser erfasst und die relative Feuchte über Eis nimmt vermehrt höhere maximale Werte an. Das GME, rechts dargestellt, kann kleinräumige Strukturen bedingt durch eine horizontale Auflösung von 30 km nicht so gut erfassen (GME-Routine in rot). Jedoch erhält man mit dem verbesserten

Eismikrophysik Schema, welches im Abschnitt 3.1.3 erläutert wird, eine Annäherung an die MOZAIC Referenz Linie. Somit scheinen gute Vorraussetzungen für ein Benutzen der GME Modell Daten geschaffen zu sein.

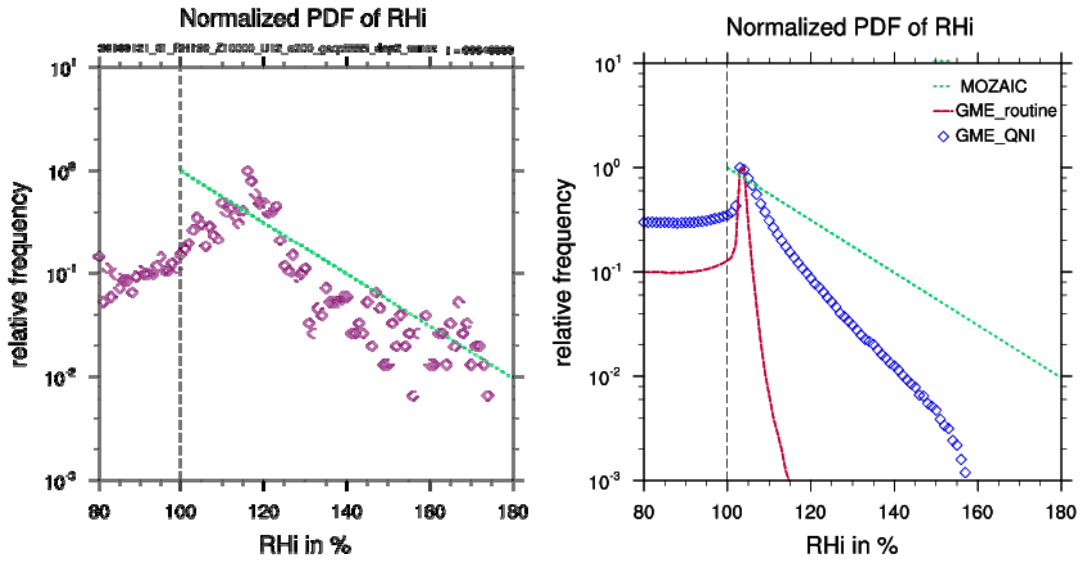


Abbildung 3: Relative Feuchte bezüglich Eis von Idealisierten Rechnungen mit dem COSMO Modell und GME im Vergleich mit Referenz MOZAIC Linie, in grün dargestellt.

3.1.1.3 Parameterisierung des Strahlungsantriebs

Auf der Basis von umfangreichen Modellrechnungen mit dem Strahlungstransfercode LibRadTran wurde der Strahlungsantrieb zusätzlicher Zirren und Kondensstreifen als kleine Störung der im Wettermodellen sowieso verfügbaren Strahlungsbilanz am Oberrand der Atmosphäre sowohl im Bereich der reflektierten Solarstrahlung (SW) als auch im Bereich der emittierten Infrarotstrahlung (LW) parametrisiert. Kondensstreifen und Zirren sind durch den Eiswasserweg (IWP) und die Temperatur im betreffenden Niveau beschrieben, die Strahlungseigenschaften in der Hintergrundatmosphäre durch die ausgehende langwellige Strahlung (LWO) und die Albedo (ALB). Als weitere Variable geht die Zenithdistanz der Sonne θ ein. Die ursprüngliche Fassung dieser Parametrisierung lautet

```
LW = 0.924*(LWO - (T_zi*2.-320)) * tanh(30.*IWP)

SW = -832.*(0.73-ALB)*tanh(15.*IWP)*cos(θ))
```

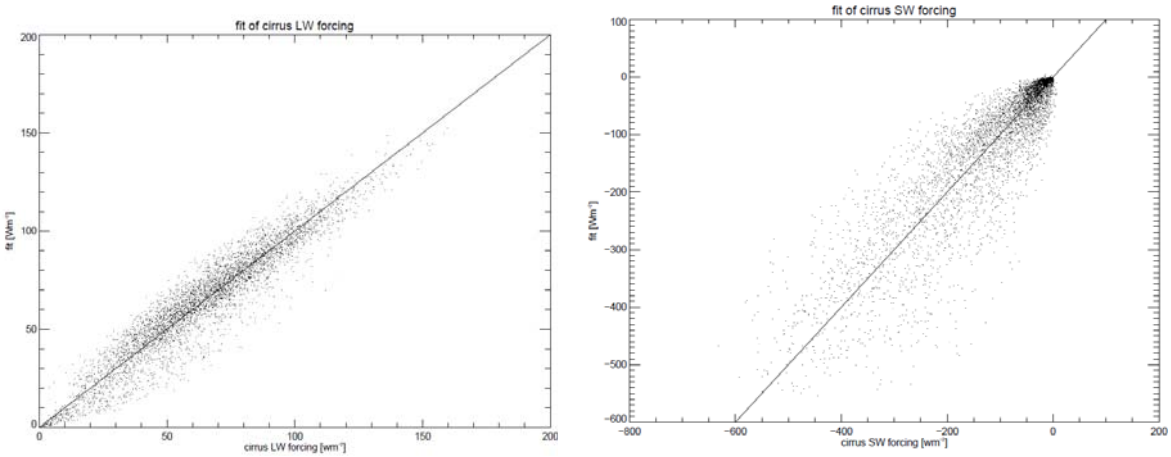


Abbildung 4: Parameterisierung des langwelligen (links) und des kurzwelligen (rechts) Strahlungsantriebs durch Kondensstreifen und Zirren

Mit dieser einfachen Parameterisierung wird ein Korrelationskoeffizient zwischen den Modelldaten und dem Fit von 0.95 im langwelligen und von 0.89 im kurzwelligen Bereich erzielt – siehe auch Abbildung 4.

Eine wesentliche Erweiterung und Verfeinerung der Parameterisierung, die allerdings auch Informationen über die Eiskristallstruktur (Habit) und die Partikelgröße, die optische Dicke im kurzwelligen Bereich bei 550 nm erfordern, ist bei Schumann et al. 2009 veröffentlicht. Da diese explizite Information über die Eigenschaften von Kondensstreifen und Zirren im vorläufigen Modell zur Anschätzung der Maßzahl (siehe folgenden Abschnitt) noch nicht verwendet werden. Im Trajektorienmodell CoCiP (siehe 3.1.2) dient sie zur Berechnung des Strahlungsantriebs.

3.1.1.4 Abschätzung der Maßzahl

Wie oben erwähnt, konnte die Lebensdauer eines Kondensstreifens nicht mittels Trajektorienrechnungen berechnet werden weil aufgrund der zeitlichen Projektstruktur das Trajektorienmodell des DLR noch im Entwicklungsstadium war, als die finale Schnittstellen- und Systemspezifikation bei LSY durchgeführt wurden. Daher entschied man sich stattdessen die Lebensdauer und die künftige Entwicklung eines Kondensstreifens aus den zu einem einzigen Zeitpunkt vorliegenden atmosphärischen Daten (Temperatur, Druck, Feuchte, Vertikalwind, sowie Größen, die die aktuelle Strahlungssituation beschreiben) zu schätzen. Dieses Vorgehen kann natürlich in der Berechnung der Kostenfunktion große Fehler verursachen und sollte im Rahmen eines endgültigen operationellen Verfahrens entsprechend verbessert werden; wir waren aber der Meinung, dass es im Sinne einer Machbarkeitsstudie zunächst verantwortbar sei, derartig vorzugehen.

Der Abschätzung der Lebensdauer eines Kondensstreifens lag folgendes Konzept zugrunde: Wir nehmen an, dass sich eine Kondensstreifen nur dann klimarelevant auswirken kann wenn er erstens persistent ist (was Eisübersättigung voraussetzt) und wenn er zweitens im Eisgehalt wachsen kann (was voraussetzt, dass der Kondensstreifen mit der Umgebung mit mehr als ca. 2 cm/s aufsteigt; dabei wird durch adiabatische Abkühlung zusätzliche Übersättigung erzeugt, die auf die Eiskristalle des Kondensstreifens auskondensieren kann, wobei die Kristalle wachsen). Wenn die Übersättigung wegen der aufwärts gerichteten Bewegung ansteigt, werden sich irgendwann natürliche Zirren über das sog. homogene Gefrieren von Aerosoltröpfchen in der Hintergrundluft bilden. Wir machen hier den Ansatz, dass in diesem Augenblick die Strahlungswirkung des Kondensstreifens verglichen mit der

Strahlungswirkung der übrigen Zirren unerheblich wird. Der Zeitpunkt der Zirrenbildung beendet also die geschätzte Lebenszeit des Kondensstreifens. Da wir die Vertikalgeschwindigkeit nur zu einem Zeitpunkt vorliegen haben, nehmen wir einfach an, diese sei für die Lebenszeit des Kondensstreifens konstant. Dem augenblicklichen Vertikalwind entspricht eine zeitliche Zunahme der Übersättigung (dS/dt) und damit ergibt sich die Lebenszeit D des Kondensstreifens grob als

$D= (S_{ci}-S_0) / (dS/dT)$

wobei S_0 die Übersättigung im Moment der Bildung des Kondensstreifens ist, und S_{ci} die Übersättigung, die zur Bildung von Zirren nötig ist (typischerweise > 45%, von der Temperatur abhängig).

Für eine einfache Abschätzung der Strahlungswirkung berechnen wir die Breite des Kondensstreifens und seinen Eiswassergehalt zur halben Lebensdauer. Der Eiswassergehalt ergibt sich aus der Annahme, dass die gesamte Übersättigung im Kondensstreifen auf die Eiskristalle kondensiert. Die Breite wird unter der Annahme einer konstanten Ausbreitungsgeschwindigkeit berechnet. Sodann benötigen wir noch die vertikale Ausdehnung des Kondensstreifens, für die wir konstant 500 m ansetzen. Dies erlaubt, die sogenannte optische Dicke zu bestimmen, die eine Grundgröße für die Strahlungstransportrechnung ist.

Die flächenspezifische (d.h. pro Quadratmeter) Strahlungswirkung des Kondensstreifens wird, wie oben erklärt, mit Hilfe der im Wettermodell vorliegenden Größen Sonnenstand (Zenithwinkel), Solarkonstante und Albedo von Boden und tiefer liegenden Wolken, Infrarotabstrahlung des Erde-Atmosphäresystems (OLR: outgoing longwave radiation), und der geschätzten optischen Dicke des Kondensstreifens berechnet. Die gesamte Strahlungswirkung ergibt sich danach durch Multiplikation mit der Fläche des Kondensstreifens (Breite mal Länge oder eventuell Breite mal die Länge, die mit einem kg Kerosin geflogen werden kann). Ein Beispiel ist in der Abbildung zu sehen. Es ist zu beachten, dass es sich hier um ein potenzielles Contrail-forcing handelt, das nur aktuell wird, wenn dort auch wirklich geflogen wird.

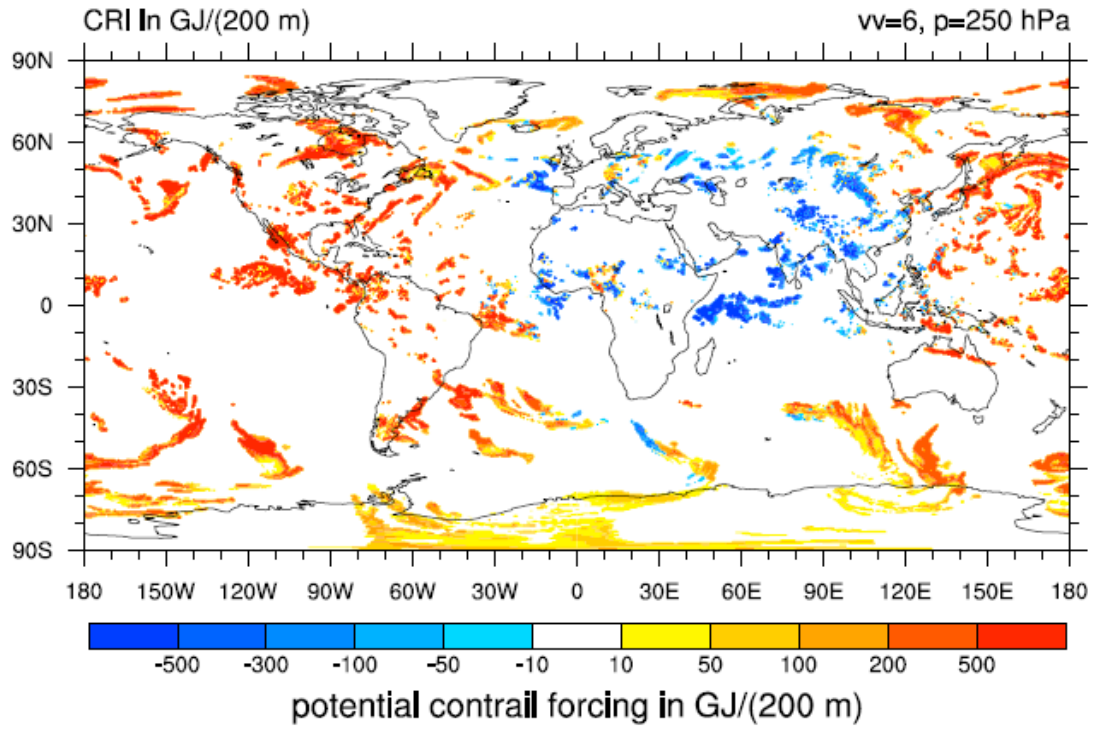


Abbildung 5: Abschätzung des potentiellen Strahlungsantriebs von Kondensstreifen aus dem GME Modell des DWD

Wie oben erwähnt, führt die Notwendigkeit, die Lebensdauer des Kondensstreifens mithilfe der zu einem Zeitpunkt vorliegenden Daten abschätzen zu müssen, unter Umständen zu großen Fehlern. Die größte Quelle von Unsicherheit liegt darin, dass die Maßzahl cri quadratisch von der geschätzten Lebenszeit abhängt (weil erstens die Strahlung über diese Zeit wirksam ist und zweitens die Breite des Kondensstreifens mit der Zeit linear zunimmt, siehe Bild). Da die Lebenszeit direkt vom Vertikalwind abhängt, hängt also die Maßzahl quadratisch vom Vertikalwind ab, der zum Zeitpunkt der angenommenen Kondensstreifenbildung herrscht. Dass dieser sich im Laufe der Zeit ändern kann und auch generell ändert, kann überhaupt nicht berücksichtigt werden, und dies kann zu grotesk großen Fehlern führen. (Beispiele dafür können in einem Bericht nachgelesen werden, der im Rahmen des Projektes verfasst wurde). Daher ist diese Art der Maßzahl nur für eine Machbarkeitsstudie brauchbar, aber nicht für echte operationelle Maßnahmen.

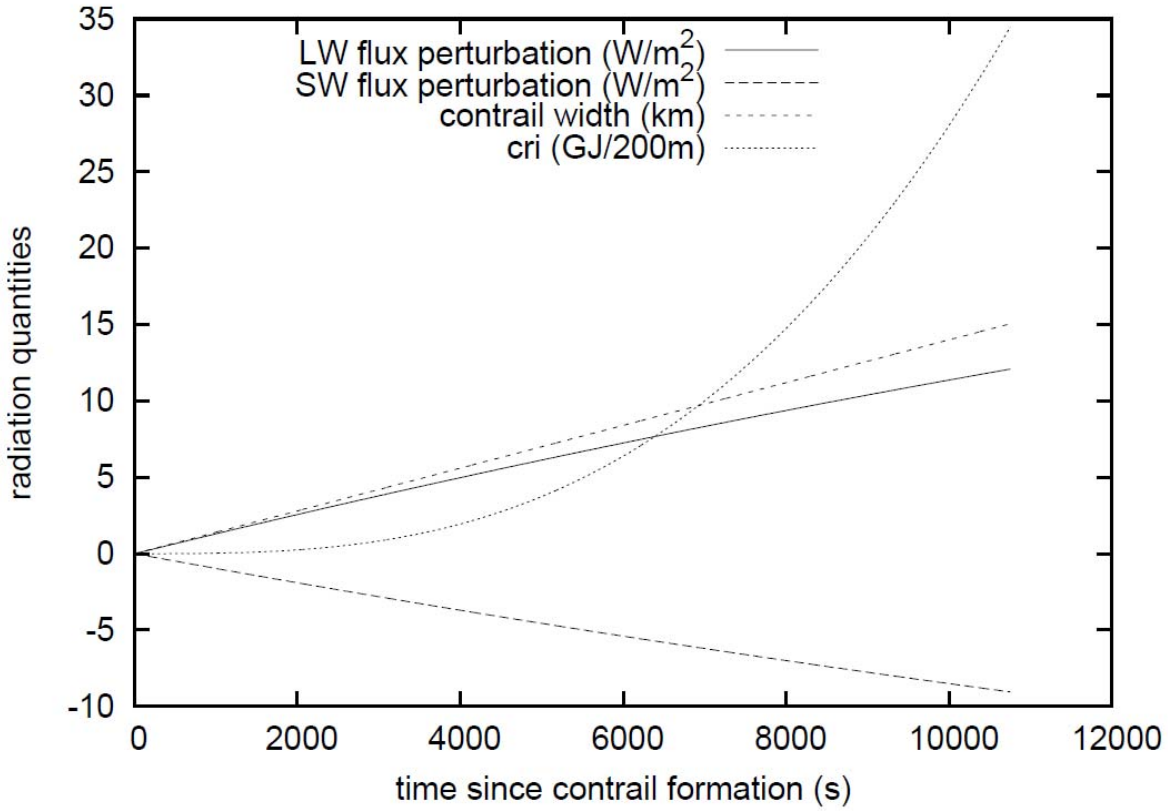


Abbildung 6: Zeitliche Entwicklung der Strahlungsstörungen durch den Kondensstreifen und seiner Breite. Diese Größen verändern sich linear über die Lebenszeit des Kondensstreifens. Da die Maßzahl (cri) das Produkt aus Strahlungswirkung und Breite enthält, entwickelt sie sich quadratisch als Funktion der Zeit. Dies begründet große Unsicherheit der derart geschätzten Maßzahl

3.1.1.5 Maßzahl/Metrik

In diesem Projekt wurde von Anfang an eine Energiemetrik (cri) als Maßzahl benutzt mit der Einheit GJ/200m. Da diese 200m einer Flugstrecke entsprechen, die man mit 1 kg Kerosin ungefähr fliegen kann, werden wir in diesem Abschnitt GJ/(kg Kerosin) verwenden. Die in GJ ausgedrückte Energie ist die Energie, die wegen des Kondensstreifens entweder die Atmosphäre nicht verlassen kann weil der Kondensstreifen die von der Erde und der unteren Atmosphäre (inkl. tiefe Wolken) ausgestrahlte Infrarotstrahlung absorbiert (cri positiv) oder die gar nicht erst zur Erde gelangt (cri negativ), weil der Kondensstreifen Sonnenstrahlung, die sonst den Boden erreichen würde, direkt wieder in den Weltraum reflektiert.
Da der Mensch nicht gewohnt ist, mit diesen Energien umzugehen, und weil man sich deshalb nicht recht vorstellen kann, was soundsoviel GJ/kg eigentlich für das Klima bedeuten, soll hier gezeigt werden, dass die Energiemetrik in eine Temperaturmetrik umgerechnet werden kann, und zwar in das sog. Absolute Global Temperature Potential (AGTP in der Einheit K/(kg Kerosin)). Wie das genau geht, ist in einem Bericht gezeigt, der im Rahmen des Projekts erstellt wurde. Im Wesentlichen läuft es darauf hinaus, dass Energieänderungen in Temperaturänderungen umgerechnet werden können, wenn die Wärmekapazität des in Frage stehenden Systems bekannt ist. Eine einfache Abschätzung ergibt eine Wärmekapazität des Erde-Atmosphäre-Systems von der Größenordnung 10^{15} GJ/K. Dies entspricht ungefähr einem Ozean von 500 m Wassertiefe. In genaueren Rechnungen berücksichtigt man auch den tieferen Ozean, der eine viel längere Reaktionszeit auf Energieeinträge hat als der relativ flache 500 m tiefe Ozean. Wir haben dann 2 gekoppelte Systeme mit unterschiedlichen Wärmekapazitäten. In der unten gezeigten

Abbildung 7 sieht man die durch 1 kg Kerosin verursachte Temperaturänderung in der Atmosphäre für 2 beispielhafte Kondensstreifen mit 180GJ/kg und 50 GJ/kg. Diese Temperaturänderungen sind verglichen mit der Temperaturänderung, die durch die entsprechende CO_2 Emission ausgelöst wird. Man sieht zuerst einen steilen Abfall der beiden Linien für die Kondensstreifen (bzw. einen steilen Anstieg für das CO_2), der nach ca. 50 Jahren in einen flacheren Verlauf mündet, wenn sich der tiefe Ozean dämpfend bemerkbar macht. Nach dieser Zeit ist in dem 180 GJ/kg Fall die Temperaturwirkung des Kondensstreifens immer noch viel größer als die des CO_2, aber für den anderen Kondensstreifen ist es umgekehrt. Man könnte hier diese 50 Jahre als einen natürlichen Zeithorizont verwenden und für die Entscheidung „Kondensstreifen vermeiden oder nicht“ die AGTP-Werte für t=50 Jahre vergleichen.

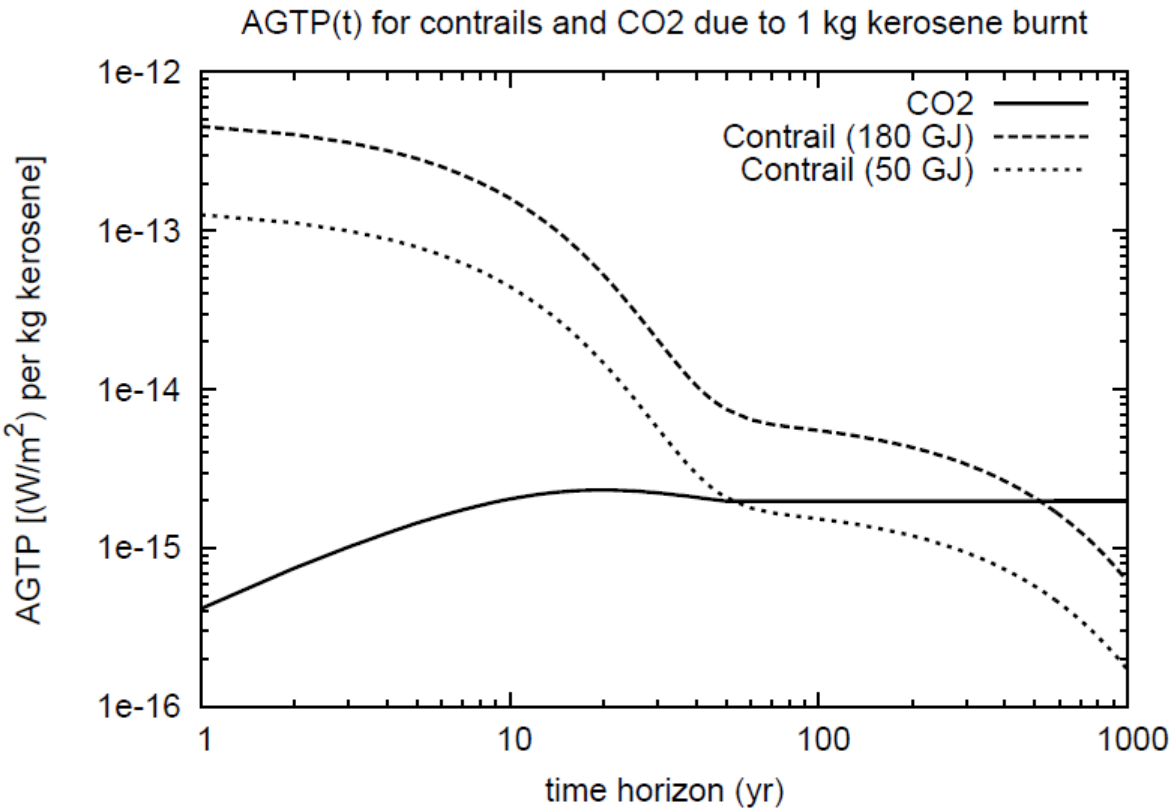


Abbildung 7: Absolute Global Temperature Potential Funktionen für 2 Kondensstreifen und CO_2, die bei Verbrennen von 1 kg Kerosin entstehen können. Die Einheit von AGTP ist K/(kg Kerosin) und nicht (W/m²)/kg. Nach 50 Jahren macht sich der dämpfende Einfluss des tiefen Ozeans bemerkbar.

3.1.2 Trajektorienmodell CoCiP

Das Rechenprogramm "Contrail Cirrus Prediction Tool" CoCiP beschreibt den Lebenszyklus jedes einzelnen Kondensstreifens mit einem Lagrange-Gauß-Abgasfahnen-Modell, mit einfacher Wolkenmikrophysik, ohne Rückwirkung auf den atmosphärischen Zustand in der Umgebung. Das Modell simuliert Kondensstreifen, wenn das Schmidt-Appleman-Kriterium erfüllt ist und wenn die umgebende Atmosphäre feucht genug ist für den Fortbestand von Kondensstreifen. Die Eigenschaften der anfänglichen Abgasfahne hängen dabei von den Eigenschaften des Flugzeugs ab.

Die Entwicklung der einzelnen Kondensstreifen ist abhängig von Wind, Temperatur, Feuchtigkeit und Eiswassergehalt in der Umgebung. Diese Felder werden anhand von Daten

aus einem Wettervorhersagemodell (numerical weather prediction, NWP) bestimmt. Die Bahn der Abgasfahne folgt dem horizontalen und vertikalen Wind. Scherung und turbulente Mischung beeinflussen die Dicke, Breite und Schräglage der Kondensstreifen. Der Eiswassergehalt wird als Funktion der Eisübersättigung in der Umgebung bestimmt unter der Annahme von Eissättigung im Kondensstreifen. Das Modell simuliert zudem die Abnahme der Zahl der Eispartikeln durch Turbulenz, Aggregation und Sedimentation. Der Klima-Strahlungsantrieb infolge der Kondensstreifen wird aus den Eigenschaften der Kondensstreifen und der vom NWP-Modell bereits bekannten Strahlungsflüsse ohne Kondensstreifen mit der in 3.1.1.3 beschriebenen Parameterisierung berechnet.

Das Tool erlaubt die effiziente Simulation der Kondensstreifen einer großen Flotte von Flugzeugen, auch global, mit wenig Rechenzeit. Das Verfahren wurde anhand von Fallstudien getestet und mit Messungen verglichen. Die Genauigkeit der Ergebnisse hängt von der Güte des vom NWP-Modell bereitgestellten Feuchtigkeitsfeldes ab. Die Ergebnisse helfen bei der Interpretationen von Messdaten aus in-situ-, Satelliten- und Lidarbeobachtungen zum Einfluss der Luftfahrt auf Zirruswolken. CoCiP kann verwendet werden, um den Einfluss von Kondensstreifen auf das Klima vorherzusagen und zu minimieren.

Für die Auswertungen in diesem Projekt konnte CoCiP noch nicht verwendet werden, da dieses Programm nicht rechtzeitig im Projektablauf fertig gestellt und getestet war.

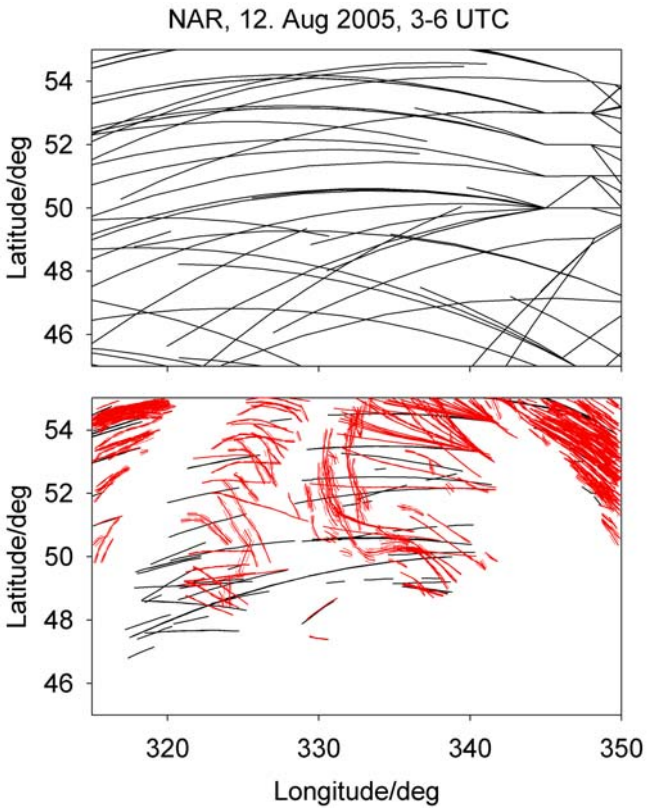


Abbildung 8: Zur Berechnung des Kondensstreifenforcings basierend auf Trajektorienberechnungen (CoCiP). Dargestellt sind im oberen Bild die Flugbewegungen in 3 Stunden über dem Nordatlantik, im unteren Bild in schwarz die Teilstrecken, die basierend auf Wettermodelldaten zu Kondensstreifen führten und in rot die verdrifteten Kondensstreifen zum Endzeitpunkt.

3.1.3 Zirren im Wettervorhersagemodell

Die globale Verteilung von Zirruswolken hat einen großen Einfluss auf den Strahlungshaushalt der Atmosphäre, was besonders im Bereich der Klimamodellierung, sowie der numerischen Wettervorhersage von Bedeutung ist. Darüber hinaus beeinflusst die Entstehung von Zirruswolken eisübersättigte Regionen, in denen sich potentiell Kondensstreifen bilden können. Aus diesen Gründen sind Parametrisierungen der mikrophysikalischen Prozesse in Zirruswolken von großer Bedeutung. Insbesondere sind die Effekte von Aerosolen von Interesse, da Wechselwirkungen zwischen Aerosolen und Wolken die Größe und Verteilung von Eiskristallen beeinflussen. Diese Prozesse führen zu der Ausbildung von Zirren mit unterschiedlichen Eigenschaften von Mikrophysik und Strahlung. Daher müssen die Prozesse der Zirrenentstehung, heterogenes und homogenes Gefrieren, weiter erforscht und verstanden werden.
Das operationelle Eismikrophysik Schema beinhaltet das homogene Gefrieren von Wolkentropfen bei -37 Grad, während die heterogene Nukleation durch eine Temperatur abhängige Gleichung basierend auf Fletcher et al. (1962) dargestellt wird. Das im Rahmen des Projektes neu entwickelte Eiswolkenmikrophysik Schema wird im Folgenden erläutert: Die Parametrisierungen des homogenen Gefrierens von Lösungstropfen basierend auf Kärcher et el. (2006) wurde zusätzlich zum Gefrieren der Wolkentropfen implementiert. Das Schema für das heterogene Gefrieren wurde durch Phillips et al. (2008) ersetzt, welches den Vorzug hat, dass es direkt mit Aerosol Konzentrationen von Russ, Staub und organischen Substanzen arbeitet. Dieses ermöglicht Sensitivitätsstudien zu den Aerosol Anzahlen, sowie ein mögliches Koppeln an die Aerosol Modell Klimatologie. In Eidhammer et al. (2009) ist gezeigt, dass dieses Schema gut mit Messungen übereinstimmt.
Bei homogenem Gefrieren von Lösungströpfchen erhält man hohe Anzahldichten von ca. 50 cm^{-3} (Hoyle et al. 2005), wobei die Durchmesser der Eiskristalle sehr klein sind. Das heterogene Gefrieren ruft niedrigere Anzahldichten und große Durchmesser (~100 µm) hervor. Heterogene Nukleation tritt bei wärmeren Temperaturen und geringeren vertikalen Geschwindigkeiten auf und baut Übersättigung ab bevor homogenes Gefrieren von Lösungstropfen einsetzt. Diese unterschiedlichen Eigenschaften führen einerseits zur Konkurrenz zwischen den Prozessen, dienen aber andererseits auch als Indikator zur Bestimmung, welcher Prozess zu welchem Zeitpunkt aktiv ist. Um dieses zu Analysieren, wurde ein 2-Momenten 2-Moden Schema mit neuen prognostischen Variablen eingeführt.

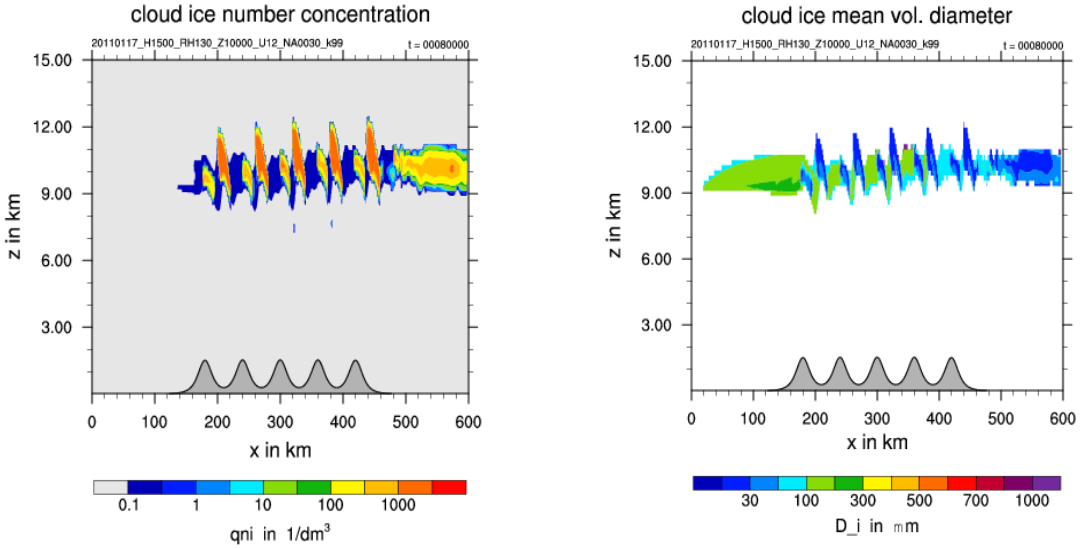


Abbildung 9: Anzahldichten qni und mittlerer Durchmesser von Eiskristallen. Durch eine separate 2-Moden Darstellung von homogen und heterogen entstandenem Eis lassen sich die unterschiedlichen Prozesse klar voneinander unterscheiden.

In ***Abbildung 9*** sind die erklärten Charakteristiken der Eiswolken mit dem 2-Moden 2-Momenten Schema in Idealisierten Rechnungen mit dem COSMO Modell dargestellt. Des weiteren wurde das besagte Schema in das COSMO-DE, sowie in das GME implementiert. Beispiel Plots für die globale Zirrenbedeckung sind in Abbildung 10 zu sehen.

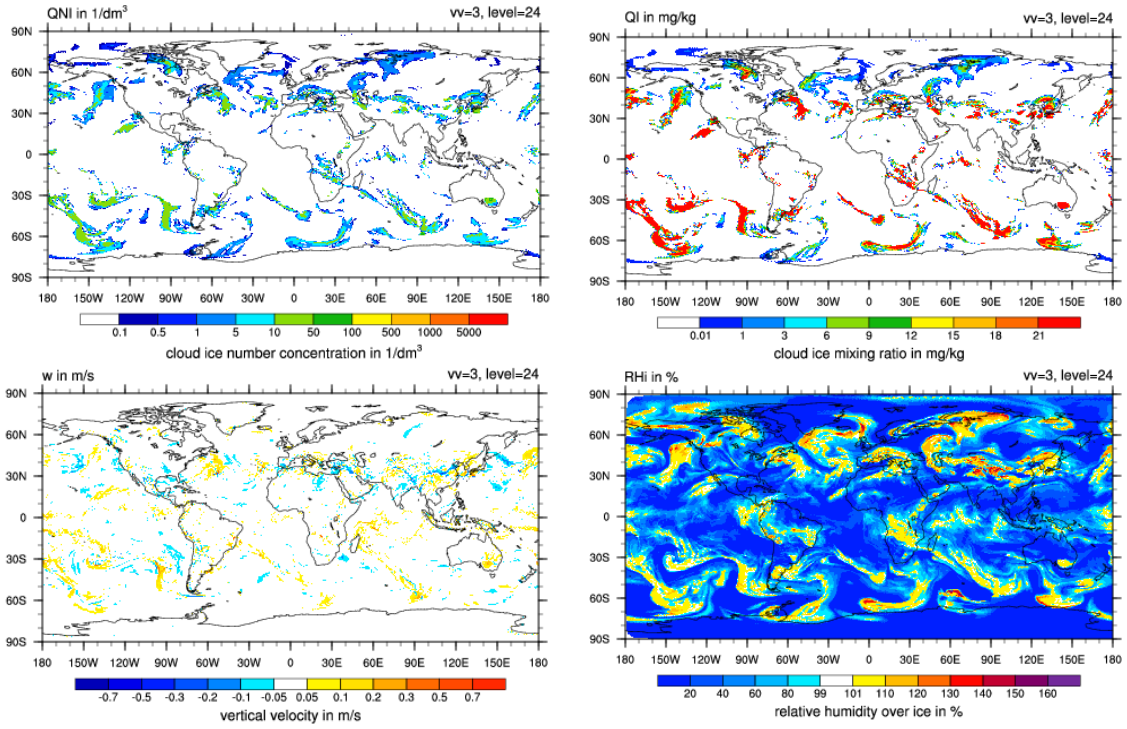


Abbildung 10: Anzahldichten qni, Wolkeneis qi, vertikal Geschwindigkeit w und relative Feuchte über Eis RHi des GMEs in der oberen Troposphäre.

Da die Prozesse stark von der Vertikalgeschwindigkeit abhängen, wird basierend auf Joos et al., 2008 im GME eine Vertikalgeschwindigkeit superponiert, welche subskalige orographische Effekte berücksichtigt. Im COSMO steht zusätzlich die turbulente kinetische Energie TKE zur Verfügung, welche in den höher aufgelösten Modellen COSMO-DE/-EU als zusätzliche Vertikalgeschwindigkeit verwendet wird.

3.2 AP2: Validierung der Verfahren zur Vorhersage von Zirren und Kondensstreifen

3.2.1 Validierung der Vorhersagen

3.2.1.1 Validierung der Vorhersagen mit Hilfe von METEOSAT Daten

Zur Validierung der Kondensstreifenprognosen wurde eine automatische Kondensstreifenerkennung (entsprechend Mannstein et al., 1999) aus METEOSAT Daten mit den DWD-GME Vorhersagen der Feuchte und des Strahlungsantriebs

verglichen. Mit der automatischen Kondensstreifenerkennung wird zwar nur ein geringer Anteil der Kondensstreifen erkannt (über Südbayern nur ca. 8%, siehe Mannstein et al. 2010) und die Falscherkennung ist wesentlich höher, als bei der Anwendung des Verfahrens auf die Daten polarumlaufender und somit räumlich höher auflösender Satelliten. Dennoch bildet dieses Verfahren die räumliche und zeitliche Verteilung von strahlungswirksamen Kondensstreifen ab, wie sich mittleren Tagesgang der Kondensstreifenverteilung über dem Nordatlantik zeigt (siehe Abbildung 11).

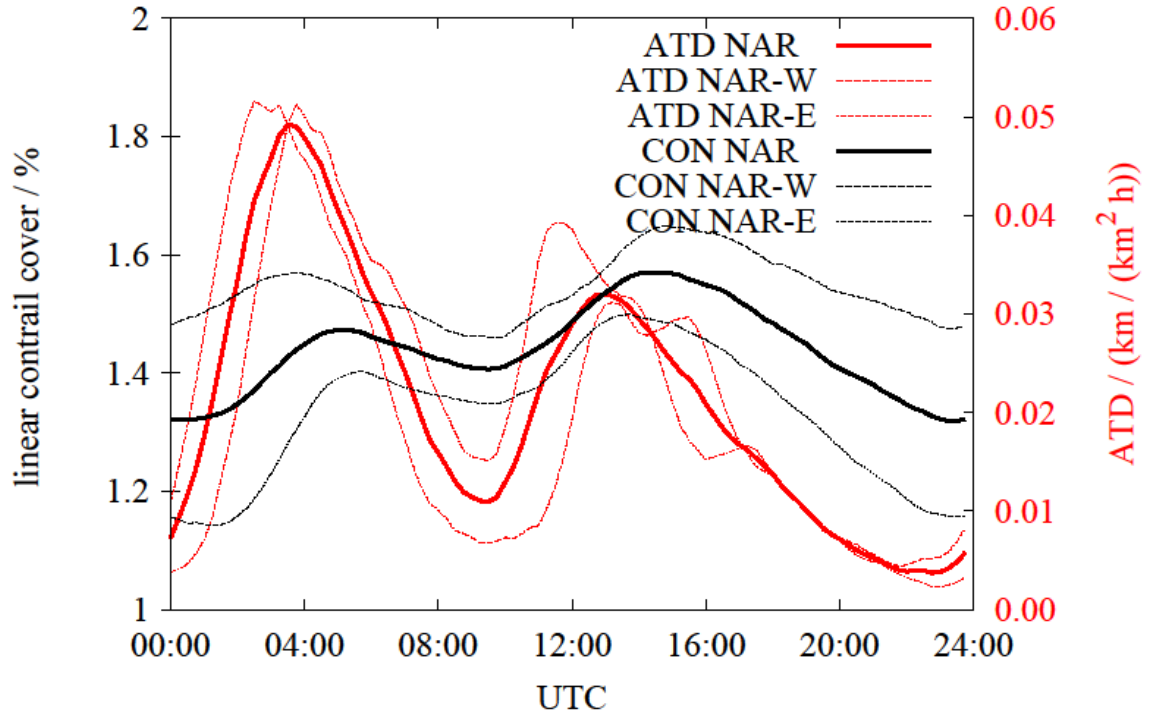


Abbildung 11: Mittlerer Tagesgang der Flugverkehrsdichte (air traffic density, ATD) in rot und der Bedeckung mit linearen Kondensstreifen bzw. Zirren über dem Nordatlantik. Zusätzlich ist das Gebiet in eine westliche und östliche Hälfte aufgeteilt. Hier folgen die zeitlichen Unterschiede in der Kondensstreifenbedeckung dem Muster der Flugverkehrsdichte.

Die in METEOSAT – Daten analysierten Kondensstreifen wurden mit den DWD Prognosen des potentiellen Kondensstreifenforcings und auch der Eisübersättigung für einen Zeitraum von 4 Kalenderwochen im Herbst 2010 verglichen (***Abbildung 12*** und ***Abbildung 13***) Dabei zeigte sich neben einer Erfassungsquote der analysierten Kondensstreifen durch Eisübersättigung von ca. 70% auch, dass die Prognosen über 36 h hinaus besser waren, als die Analysen (***Abbildung 14***). Mit dieser Methode können weder die Fälle ermittelt werden, in denen eine Kondensstreifenbildung vorhergesagt wird, die nicht eintritt, noch kann eine Aussage über die Verlässlichkeit der Höhenzuordnung der Kondensstreifenvorhersage gemacht werden, da die Höhe der Kondensstreifen mit den bisherigen Methoden aus Satellitendaten nicht bestimmt werden kann.

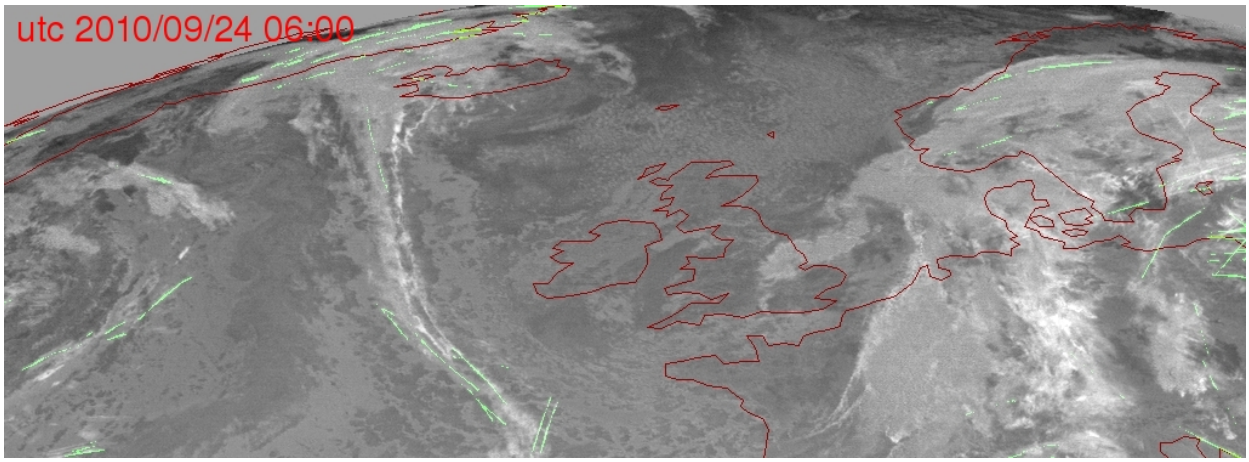


Abbildung 12: Kondensstreifenanalyse aus METEOSAT Daten (grün).

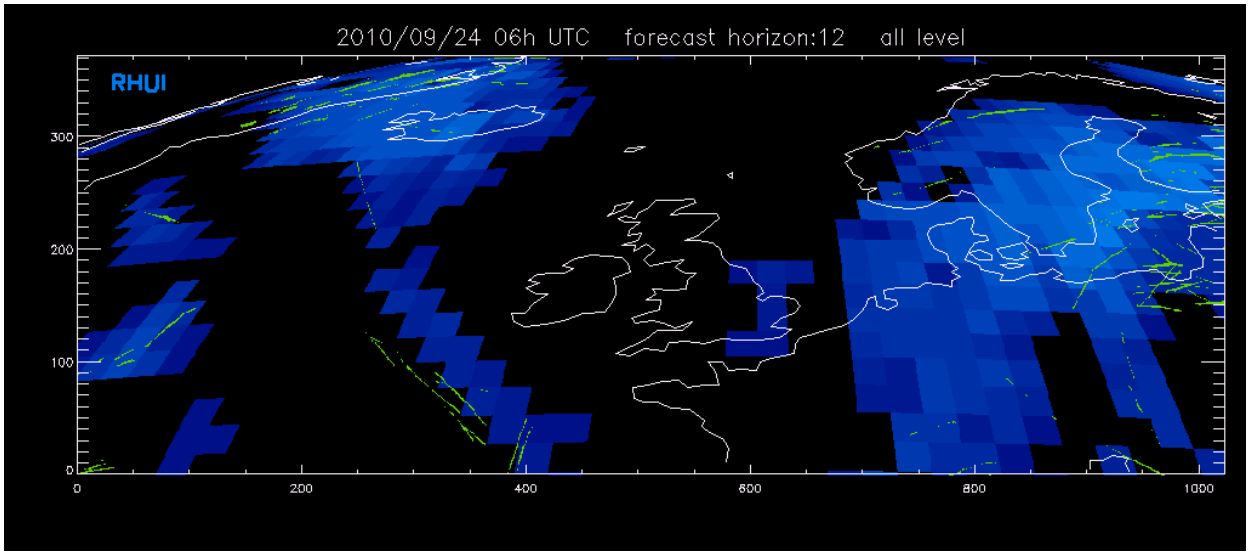


Abbildung 13: Eisübersättigung in mindestens ein Höhenniveau aus dem DWD-GME Modell

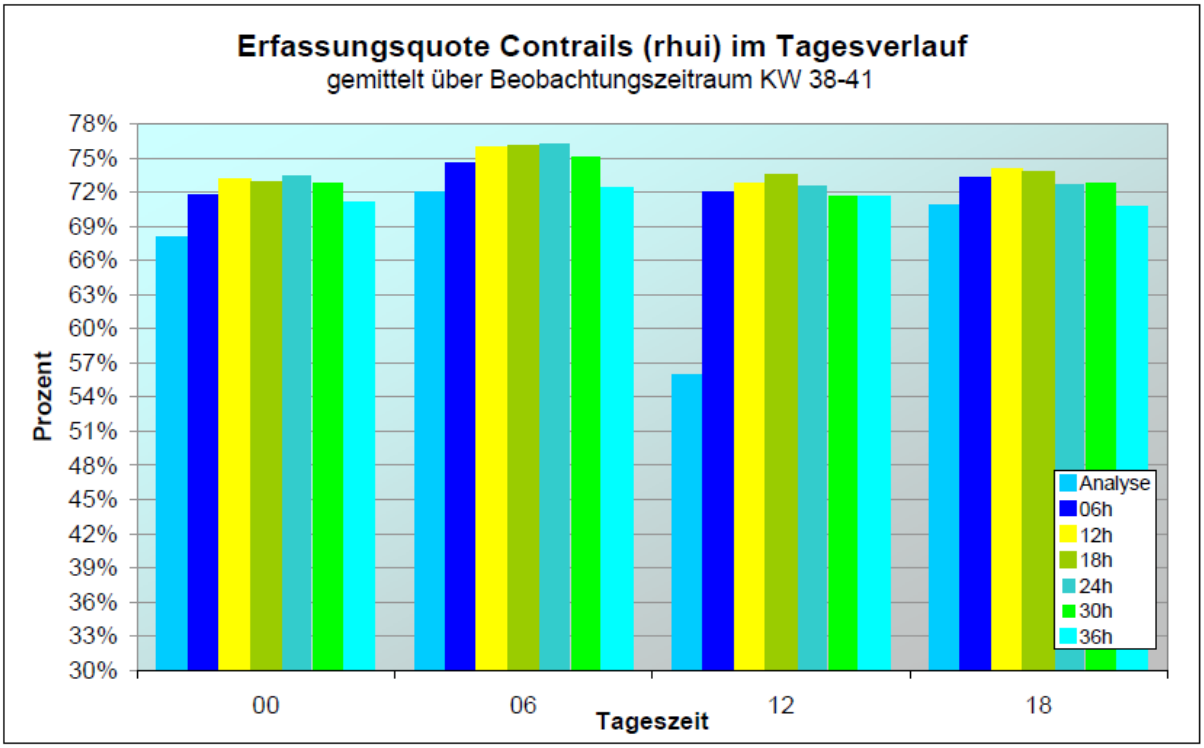


Abbildung 14: Erfassungsquote der aus METEOSAT Daten ermittelten Kondensstreifen (und langestreckter Zirren, siehe Abbildung 13) durch die Analysierten und prognostizierten Feuchtefelder des GME für verschiedene Tageszeiten und Vorhersagehorizonte.

3.2.1.2 Validierung der Vorhersagen mit Hilfe von in-situ Messdaten (MOZAIC)

An Bord von speziell umgerüsteten Passagierflugzeugen der DLH werden täglich Wasserdampfmessungen im Rahmen des Projekts MOZAIC durchgeführt. Die dabei gewonnenen Daten stehen dem vorliegenden Projekt in vollem Umfang zur Validierung und Bewertung der Güte der entwickelten Vorhersagen zur Verfügung.

Die dabei gewonnenen Daten wurden am Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre (ICG-II) am Forschungszentrum Jülich aufbereitet (Herman Smit, pers. Kommunikation). Insgesamt wurden 17 Interkontinentalflüge mit über 100.000 Messdatenpunkten ausgewertet. Die aus den Messdaten ermittelte Eisübersättigung wurde zu Beginn des Projektes mit entsprechend interpolierten Modelldaten verglichen. Die generellen Charakteristika werden von den Modellen getroffen: Hohe Werte im Modell entsprechen hohen Messwerten in der realen Welt. Allerdings sind die Übersättigungen in den Modellen in den meisten Fällen zu niedrig, was sowohl auf ein Verbesserungspotential der Modelle als auch auf die Problematik der Messung der Eisübersättigung hinweist.

Abbildung 15 zeigt Feuchtemessungen (RHice) für einen Flug von Frankfurt nach Vancouver am 7.März 2007. Gezeigt sind im Rahmen von MOZAIC (graue Kurve) gemessene Eisübersättigungen und die entsprechenden Vorhersagen gemäß dem Modell des DWD (blaue Kurve) und eines weiteren Modells (DLR/ECMWF Vorhersage, orange Kurve). Die Abweichung der Modelldaten vom Messwert ΔRHice der Modelldaten vom Messwert wurde wie folgt definiert

$$\Delta RHice = \frac{|\, RHice, Messung - RHice, Modell}{RHice, Messung} * 100\% \,,$$

und lag im oben genannten 36 % (DWD). Eisübersättigung wurde in 43% des Fluges gemessen, 57% des Fluges fand in untersättigter Luft statt. Bei 65% der Messungen wurde Unter- bzw. Übersättigung korrekt vorher gesagt.

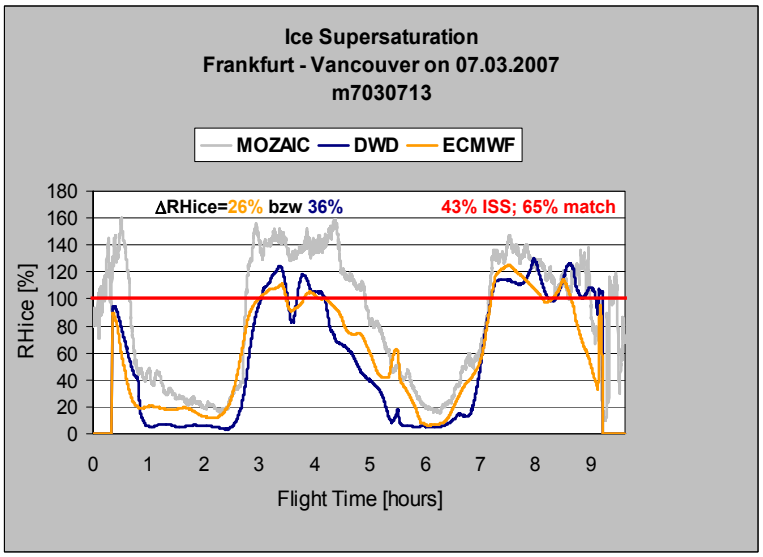


Abbildung 15: : Vergleich von Feuchtemessungen und Modellvorhersagen für den Lufthansa Flug Frankfurt-Vancouver am 7.März 2007.

Eine Analyse von 17 Flügen im März 2007 ergibt eine durchschnittliche prozentuale Abweichung ΔRHice der Modelldaten vom Messwert von 35% (DWD), wobei die Modelldaten systematisch die Übersättigung unterschätzen. Darüber hinaus wurde für diese Stichprobe analysiert, wie häufig Eisübersättigung bzw. –untersättigung richtig prognostiziert wurde. Bei über 80% aller Messpunkte wurde die Übersättigung (RHice>100%) bzw. Untersättigung (RHice<100%) korrekt vorhergesagt. Während Eisuntersättigung bei über 98% aller untersättigten Messwerten korrekt vorhergesagt wird, wird Übersättigung nur in ca. 30% aller übersättigten Messungen korrekt vorhergesagt wird. Dies liegt daran, dass die Amplituden in den Modellen offensichtlich zu niedrig sind. Nur relativ selten (in ca. 2% der Fälle) wird Eisübersättigung prognostiziert, obwohl die Luft untersättigt war. Man kann dies so interpretieren, dass in 2% der Fälle ein Fehlalarm ausgelöst wird, d.h. ein unnötiger Umweg aufgrund falsch prognostizierter Kondensstreifenbildung induziert wird. Auf der anderen Seite wird Eisübersättigung weit seltener vorher gesagt, als sie de Facto in der Atmosphäre auftritt (in ca. 30% der Fälle). Dies bedeutet, dass bei der direkten, nicht angepassten Verwendung der bisherigen Vorhersagemodelle ein Drittel des Klimaeffekts von Kondensstreifen vermieden werden kann.

Das „Matching“ verbessert sich, wenn man den Grenzwert für Kondensstreifenentstehung im Modell herab setzt, z.B. auf 80% des notwendigen Sättigungsgrenzwertes (thermodynamisch liegt er bei 100%; unter Berücksichtigung der dynamischen Effekte beim Absinken der Wirbelschleppe sogar bei 105-110 % (laut K.Gierens, persönl. Mitteilung, 2008). Eine Reduzierung des Schwellwerts für die Kondensstreifenentstehung führt allerdings zu einer größeren vertikalen Ausdehnung der Übersättigungsgebiete in den Modellen. Dieser Effekt steht allerdings in diametralem Gegensatz zu den Beobachtungen aus den Messungen. Eine gute Übereinstimmung der vertikalen Ausdehnung der

Übersättigungsgebiete mit Messdaten erfordert eher eine Erhöhung des Sättigungsgrenzwertes.

Abbildung 16 zeigt eine relativ gute Übereinstimmung der DWD Prognosen verglichen mit gemessenen vertikalen Übersättigungsstrukturen (Δz<560±610; Spichtinger et al, 2003; Δz<1-2 km; MOZAIC, A.Volz-Thomas, persönliche Kommunikation) für einen Sättigungsgrenzwert von 110%.

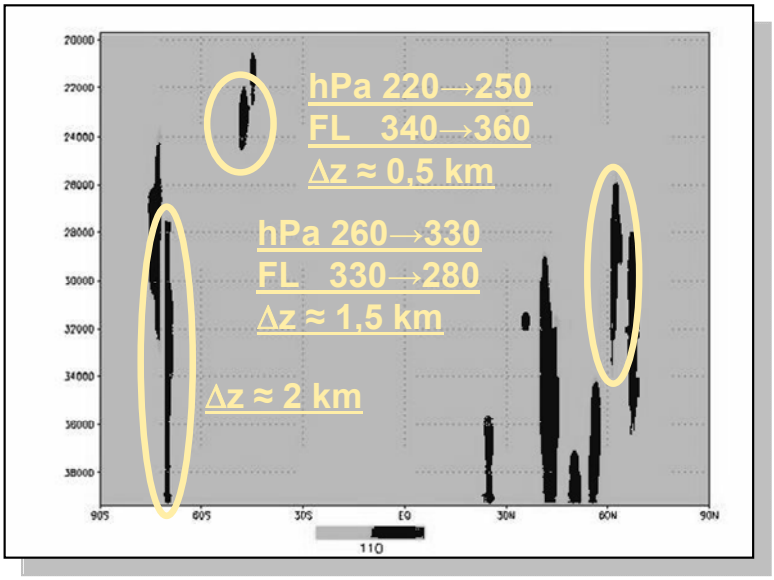


Abbildung **16***: Vertikaler Schnitt von DWD Modelldaten (40°E, 3.März 2008, Mitternacht, 340-260 hPa = FL 280-330 = 8,5-10,1 km - gefiltert mit einem Sättigungsgrenzwert von 110%)*

Für die Entwicklung des Flugroutenoptimierungsalgorithmus bedeutet dies, dass die Wahl des für die Kondensstreifenentstehung geforderten Übersättigungsgrenzwerts flexibel (d.h. frei wählbar) gestaltet wurde, um gegebenenfalls mögliche modellbasierte Abweichungen von den real gemessenen Übersättigungen berücksichtigen zu können.

3.2.2 Validierung der Zirrusparametrisierung

Zur genaueren Betrachtung der Auswirkungen bezüglich der veränderten Zirrusparametrisierung, beschrieben in 3.1.3, wurden unterschiedliche Simulationen durchgeführt. Zunächst wurden idealisierte Simulationen im COSMO Modell mit 1km horizontaler Auflösung gemacht. Die Ergebnisse zu Auswertungen im Vergleich mit INCA Messdaten analog zu Joos et al. 2009 stehen noch aus.
Die Daten des globalen Modells werden mit CloudSat verglichen. In ***Abbildung 17*** ist der Eiswassergehalt in Abhängigkeit von der Temperatur und Höhe dargestellt, wobei GME das operationelle und GME_QNI das veränderte Wolkeneismikrophysik Schema enthält. Anhand der Abbildungen erkennt man, dass der in den CloudSat Daten enthaltene Peak besser mit dem veränderten Eisschema reproduziert werden kann.

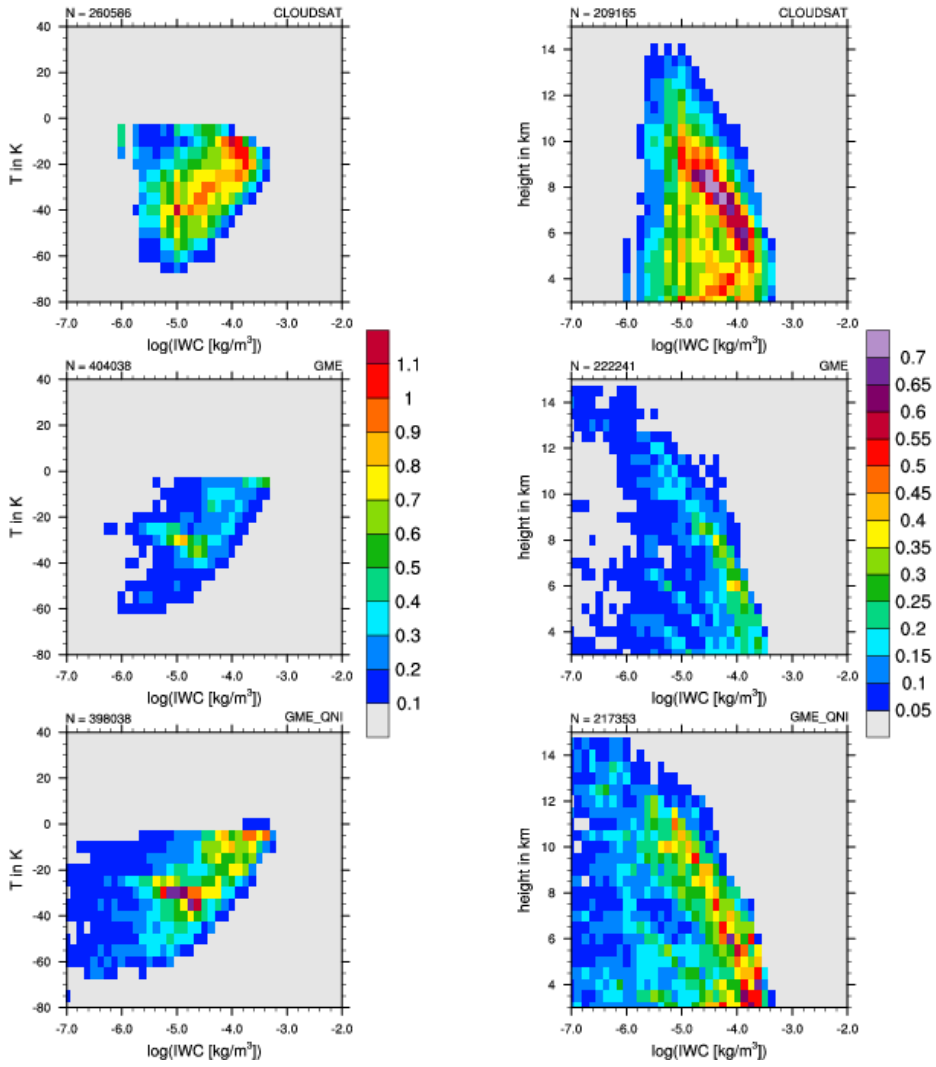


Abbildung 17: Der Eiswassergehalt IWC ist abhängig von der Temperatur und Höhe dargestellt. Verglichen sind hierbei CloudSat Daten mit dem operationellen GME und dem GME mit der neuen Eismikrophysik (GME_QNI).

3.3 AP3: Erstellung eines Verfahrens zur Flugroutenoptimierung und Bewertung

3.3.1 Flugroutenoptimierung im LIDO System

3.3.1.1 Definition der Schnittstelle zur Einbindung zusätzlicher Information über Ort und Zeit von eisübersättigten Gebieten

Zum Zeitpunkt der Implementierung der Flugroutenoptimierung in das Lido/Flight System stand die Trajektorienmethode (später CoCiP, siehe Abschnitt 3.1.2) noch nicht bereit. Um die Operationalität des Datentransfers vom DWD zum Lido System zu gewährleisten wurde der bereits zum Datentransfer des Windfeldes eingeführte Weg (inclusive räumliche und zeitliche Auflösung) beibehalten und nur um Werte für die Eisübersättigung und das potentielle forcing eines entstehenden Kondensstreifens (siehe Abschnitt 3.1.1.4) ergänzt.

Während die räumlich/zeitliche Lokalisierung der eisübersättigten Gebiete und auch des potentiellen forcings als ausreichend zu bezeichnen ist – siehe 3.2.1.1 -, ist die Vertikalverteilung (3.2.1.2) und die quantitative Bestimmung des potentiellen forcings bzw. der Maßzahl für einen operationellen Einsatz ungenügend. Sie reicht jedoch aus, um die Methodik zu testen und zu bewerten.

Aus in-situ Ballonmessungen weiß man, dass eisübersättigte Gebiete (potentielle Kondensstreifenentstehungsgebiete) in einer Höhe von 200 – 450 hPa vorkommen mit einer durchschnittlichen vertikale Ausdehnung kleiner als 1-2 km (Spichtinger et al., 2003; A.Volz-Thomas, pers.Mitteilung) und einer lateralen Ausdehnung von 150±250 km (Gierens und Spichtinger, 2000). Unter Berücksichtigung der realen Ausdehnung von Kondensstreifenentstehungsgebieten wurde zwischen den Projektpartnern folgende Abdeckung und Auflösung der Prognosedaten vereinbart (Vertikal: FL240-FL410 in Zehnerschritten, lateral: 1,25°x1,25°; zeitlich: 3h)

Um eine möglichst große Flexibilität zu gewährleisten, wurden mehrere Schnittstellenoptionen entwickelt, zwischen denen der Anwender wählen kann (online-Prognosedaten zu Wassergehalt und Temperatur der Atmosphäre via DWD; online-Prognosedaten zur Klimawirkung von potentiellen Kondensstreifen basierend auf der vom DLR entwickelten Schätzverfahren, offline Information zur globalen Verteilung von Eisübersättigungsgebieten und damit verbundenem potentiellen integralen Strahlungsantrieb).

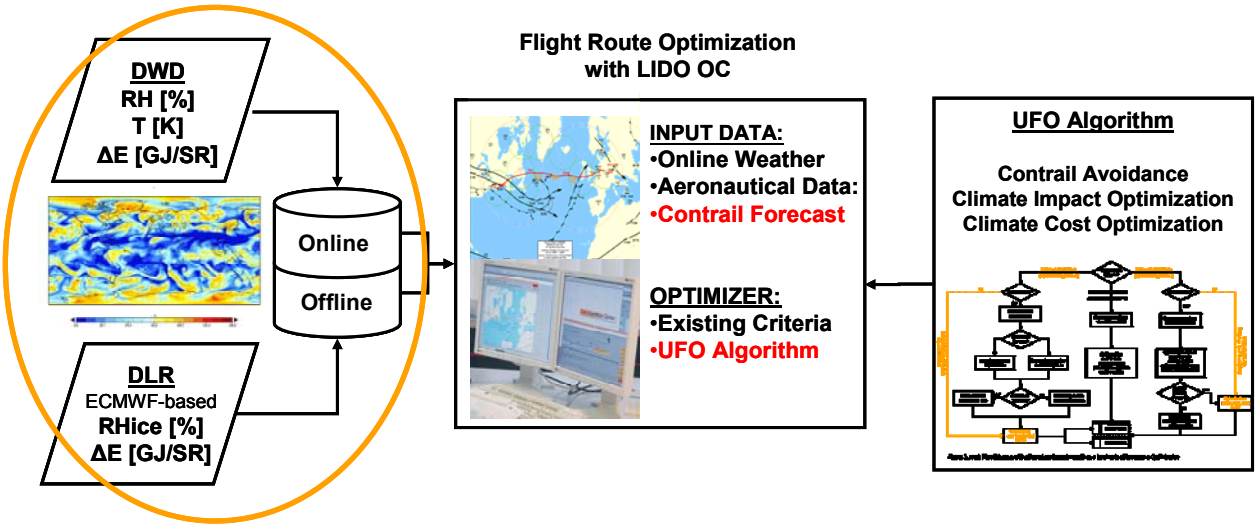


Abbildung 18: Flußdiagramm zur Einbindung der Prognosedaten

3.3.1.2 Weiterentwicklung eines Flugroutenoptimierungsalgorithmus, d.h. einer Software hinsichtlich der Einbindung zusätzlicher Randbedingungen

In Lido/Flight wurde ein neuer neue Flugroutenoptimierungsalgorithmus implementiert, der Kondensstreifenentstehungsgebiete berücksichtigt und deren potentielle Klimawirksamkeit bei der Flugroutenplanung.

Wegen verschiedener Unsicherheiten im Bezug auf die Inputdatenlage (Lokalisierung der Eisübersättigungsgebiete und Abschätzung der Klimawirkung mittels einer Maßzahl) wurde der Algorithmus in dieser Hinsicht möglichst flexibel gestaltet. Der Algorithmus enthält sowohl

Optionen, die nur auf Informationen über Temperatur und Feuchte als Input angewiesen sind, als auch Optionen, die auf globaler Information über die Klimawirkung von potentieller Kondensstreifenbildung (Maßzahl) basieren. **Dies ermöglicht auf unterschiedliche Entwicklungen und Erkenntnisse im Bezug auf die Qualität der Inputdaten flexibel reagieren zu können.** Insgesamt wurden drei verschiedene Optionen in Lido/Flight realisiert, (siehe in ***Abbildung 19***):

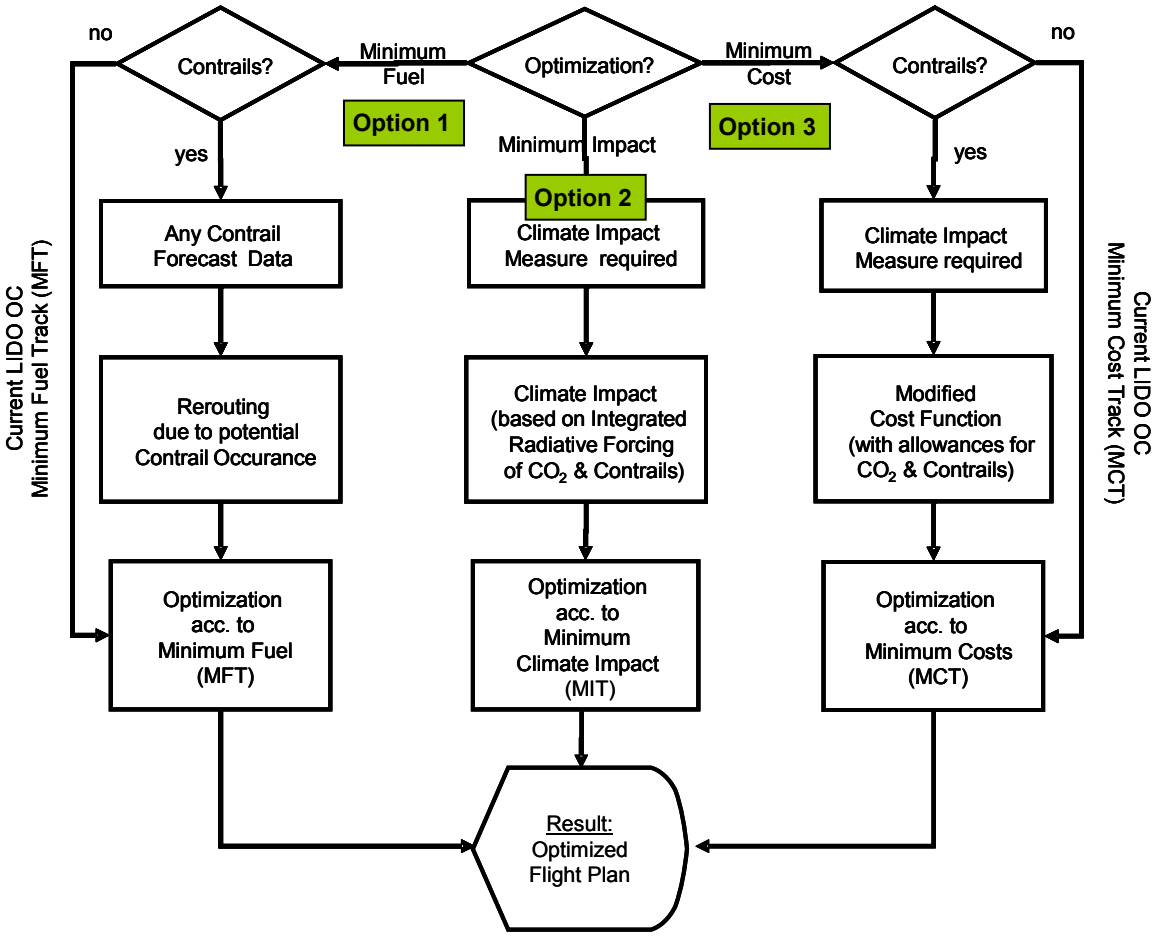


Abbildung 19: Flußdiagram für die Umweltorientierte Flugroutenoptimierung

Option 1 beinhaltet ein Umleiten von Verkehrsströmen aufgrund von potentieller Kondensstreifenentstehung, In dieser Option werden die Flugrouten im Hinblick auf den Kerosinverbrauch optimiert, was äquivalent zu einer Optimierung des emittierten CO_2 ist. Dabei werden Gebiete, die von Kondensstreifenentstehung betroffen sind entweder geschlossen, wenn eine erwärmende Wirkung der Kondensstreifen zu erwarten ist, oder die Flugzeuge werden gezwungen, in solche Gebiete hinein zu fliegen, wenn eine kühlende Wirkung zu erwarten ist.

Eine zweite Option ermöglicht eine klimaorientierte Flugroutenoptimierung, die die Route mit dem geringsten flugzeuginduzierten integrierten Strahlungsantrieb sucht, wobei dieser sich aus der Klimawirksamkeit der Flugzeuginduzierten CO_2 Emissionen und dem Strahlungseffekt potentieller Kondensstreifen zusammensetzt (siehe hierzu auch AP3.2).

Eine dritte Option bindet CO_2 Emissionen und Kondensstreifen in die in Lido/Flight vorhandene Kostenfunktion als konfigurierbare Emissionshandelskosten ein und optimiert die Flugroute gemäß dieser Kostenfunktion (siehe hierzu auch AP3.2).

Option 1: Umleiten von Verkehrsströmen:

Ziel dieser Optimierungsoption ist es, erwärmende Kondensstreifen zu vermeiden und/oder kühlende Kondensstreifen bewusst zu erzeugen, um so deren Klimawirkung zu optimieren. Unter Berücksichtigung dieser Randbedingung wird die Flugroute mit der geringsten CO_2 Emission gesucht. Hierbei wird eine erhöhte Emission von CO_2 im Vergleich zu einer Optimierung, die Kondensstreifen unberücksichtigt lässt, bewusst in Kauf genommen, unter der Annahme, dass der Minderungseffekt durch die Berücksichtigung der Kondensstreifen die zusätzlichen CO_2 Emissionen aufwiegt - eine Annahme, deren Verifizierung von der zum Vergleich genutzten Maßzahl zur Bewertung der Klimawirksamkeit abhängt.

Insgesamt ergeben sich vier Möglichkeiten für die Umleitung von Verkehrsströmen aufgrund potentieller Kondensstreifenbildung, wie sie in Lido/Flight realisiert wurden (siehe Erweiterung des „Restriction Frame“ in ***Abbildung 20***).

1. Alle Klimawirksamen Gebiete werden geschlossen
2. Alle erwärmenden Gebiete werden geschlossen
3. Es ist vorgeschrieben, durch kühlende Gebiete zu fliegen.
4. Erwärmende Gebiete werden geschlossen, es ist vorgeschrieben, durch kühlende Gebiete zu fliegen.

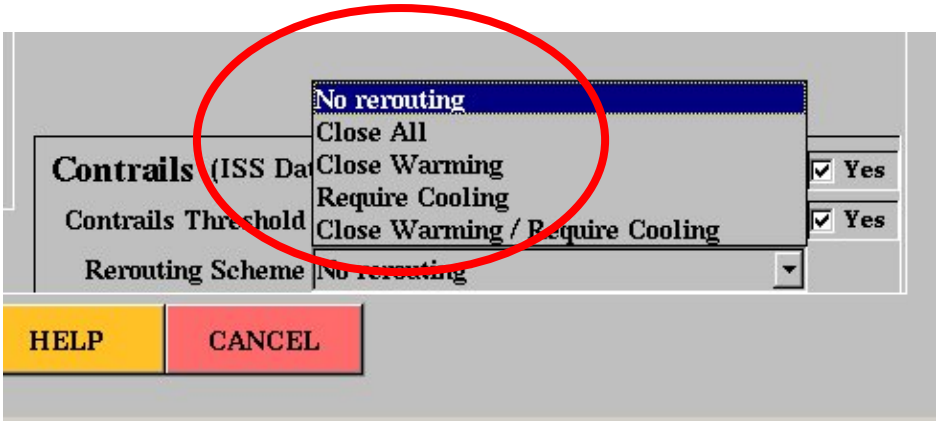


Abbildung 20: Ausschnitt „Restriction Frame“ von Lido/Flight mit Contrail-Erweiterung.

Die Abbildungen ***Abbildung 20Abbildung 21*** illustrieren Möglichkeit 2 und 3: Die Schließung klimawirksamer Segmente bzw. vorgeschriebene Nutzung kühlender Segmente. Generell werden Segmente nur im „Cruise“ geschlossen bzw. ihre Nutzung vorgeschrieben, nicht aber während Sink- und Steigflug. Auch werden Segmente nur dann geschlossen, bzw. ihre Nutzung vorgeschrieben, wenn mehr als ein gewisser Anteil (default 50%) des Segments klimawirksam ist. Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen wird eine CO_2 optimierte Flugroute berechnet.

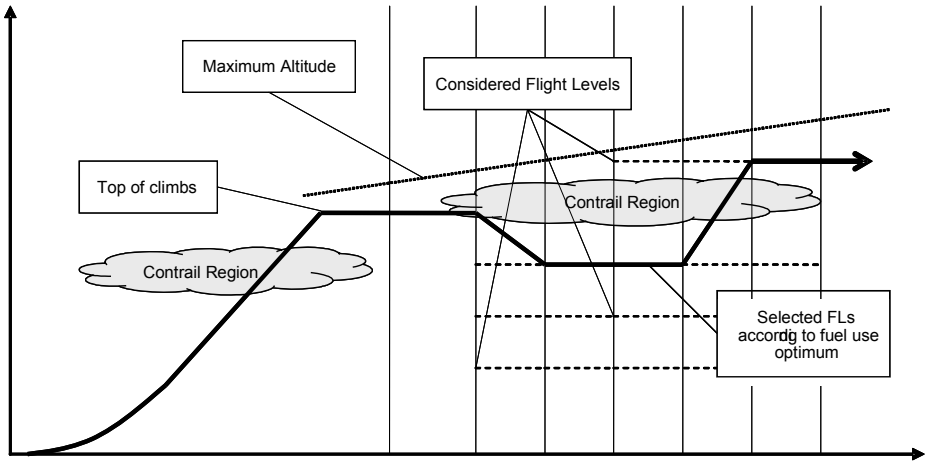


Abbildung 21: Schematische Darstellung der Bestimmung des Flugniveaus für ein Segment während der Bestimmung des Vertikalprofils (Schließen eisübersättigter Gebiete während „Cruise“).

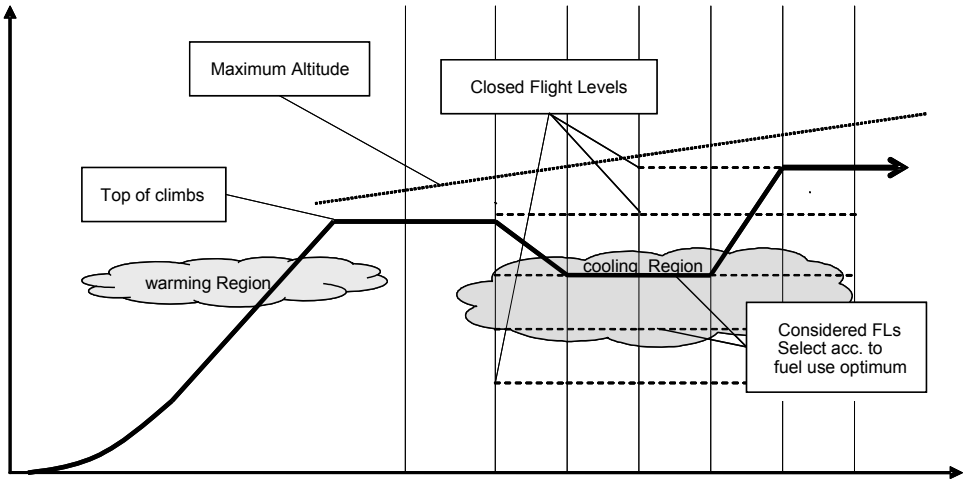


Abbildung 22: Schematische Darstellung der Bestimmung des Flugniveaus für ein Segment während der Bestimmung des Vertikalprofils (Vorgeschriebene Nutzung betroffener Gebiete während „Cruise“).

Voraussetzung für die Anwendbarkeit dieses Algorithmus ist eine gute Vorhersagequalität des lokalen und zeitlichen Vorkommens von Eisübersättigungsgebieten (siehe hierzu AP3.1). Bei der verwendeten Maßzahl ist v.a. das Vorzeichen und weniger der exakte numerische Werte relevant.

Die folgenden „Screenshots“ des Lido/Flight MAPS Frames illustrieren das in ***Abbildung 22*** dargestellte Szenario für einen Flug von Frankfurt nach Oslo am 19.Mai 2009. ***Abbildung 23*** zeigt die optimale Flugroute ohne Berücksichtigung von Kondensstreifen und die Route bei einer gezielten Produktion kühlender Kondensstreifen. Im gezeigten Beispiel wird dies

insbesondere durch eine Veränderung des Flugprofils (Absenkung der Flughöhe um mehrere „Flightlevel“) erzeugt.

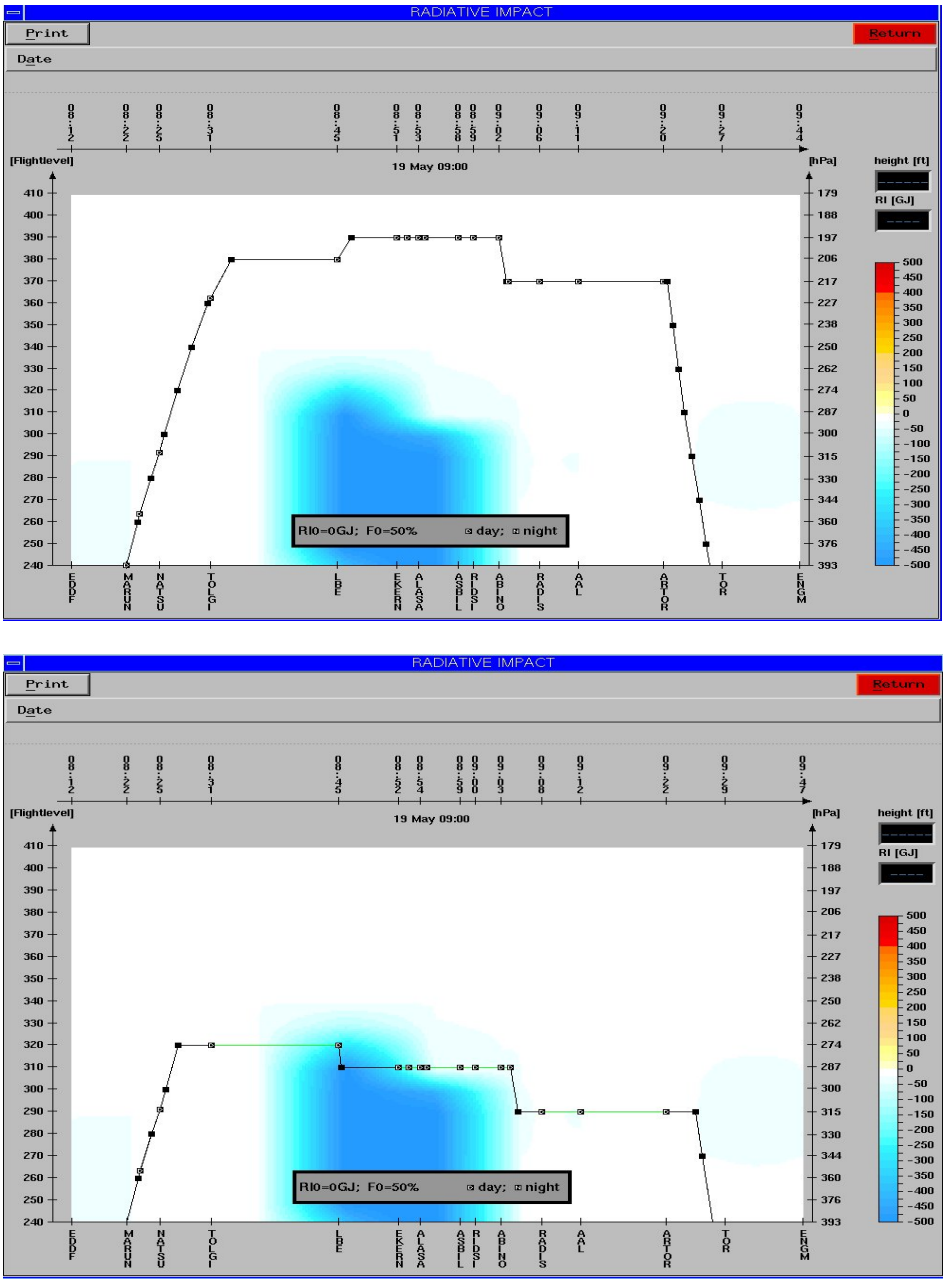


Abbildung 23: Ausschnitt „MAPS Contrail Frame“ von Lido/Flight. Gezeigt sind die Vertikalprofile der Flugrouten für einen Flug von Frankfurt nach Oslo mit einem A320 für den 19.Mai 2009. Oben die Optimierung nach einem minimalen Kerosinverbrauch (minimale CO2 Emissionen) und unten die Optimierung unter der Randbedingung, dass kühlende Kondensstreifen erzeugt werden sollen. Man sieht deutlich die Absenkung um mehrere Flugniveaus.

3.3.1.3 Übernahme der Maßzahl für den integrierten Strahlungsantrieb und Einbindung in eine Kostenfunktion für die Optimierung von Flugrouten

Übernahme der Maßzahl für den integrierten Strahlungsantrieb

Voraussetzung für die Anwendbarkeit von Algorithmen Option 2 und 3 sind präzise Daten für den Strahlungseinfluss sowohl von Kondensstreifen als auch von flugzeuginduziertem CO_2. Dies wiederum setzt die Existenz einer validen Maßzahl für die Klimawirkung beider Phänomene voraus. An einer geeigneten Maßzahl wird derzeit intensiv geforscht, u.a. im Rahmen des EU FP6 Projektes QUANTIFY (http://www.pa.op.dlr.de/quantify/). Da es bisher keine eindeutigen Empfehlung der Wissenschaft für die Verwendung einer bestimmte Maßzahl gibt, wurde sich im Rahmen des Projektes darauf verständigt, zunächst den integrierten Strahlungsantrieb als Maßzahl für die Klimawirkung zu verwenden. Für CO_2 wurde im Rahmen der Optimierungsentwicklung in Kooperation mit dem DLR der Energieeintrag von CO_2 laut Modellaussagen mit Messwerten der letzten 100 Jahre verglichen. Da hier verschiedene Methoden und Modelle zu ähnlichen Aussagen kommen, wird der Wissensstand und Datenqualität im Bezug auf CO_2 als ausreichend angenommen. Eine Validierung der globalen Matrix für den integrierten Strahlungsantrieb aufgrund von Kondensstreifenbildung steht noch aus.

Integrierter Strahlungsantrieb durch die Emission von CO_2 :

Zusammen mit dem Projektpartner DLR wurde die Maßzahl für den integrierten Strahlungsantrieb aufgrund von CO_2 Emissionen folgendermaßen hergeleitet:

Es existieren verschiedene Wege, die Klimawirkung von CO_2 zu bestimmen. Im Rahmen des Projektes wurde das „absolute global warming potential (*AGWP*)" zur Herleitung des spezifischen integralen Strahlungsantriebs (ei_{CO2} [GJ/kg fuel]) verwendet. Dieser errechnet sich aus der Störung der globalen Energiebilanz ΔE_{CO2} aufgrund der anthropogenen CO_2 Emissionen, wobei

$$\Delta E_{CO2} = A_{earth} \cdot AGWP_{CO2} = A_{earth} \cdot \eta_{CO2} \int_{t0}^{t1} [CO_2](t)dt = A_{earth} \cdot \eta_{CO2} \int_{t0}^{t1} \Delta CO_2 \cdot g(t)dt$$

mit Erdoberfläche A_{earth} und "radiative efficiency" η_{CO2} (radiative forcing pro Masseneinheit zusätzlichem atmosphärischem CO_2).

Bei diesem Ansatz wird davon ausgegangen, dass die CO_2 Emissionen eines einzelnen Fluges eine kleine Störung der derzeitigen Hintergrundkonzentration darstellt. Laut IPCC-AR4-WG1 (2007) ist die "radiative efficiency" für solche kleinen Störungen

η_{CO2}*=1,413 x 10*$^{-2}$ Wm^{-2}ppm^{-1}

Es wurden zwei Wege zur Ableitung der Response Function (*g(t)*) berücksichtigt: Zum einen wurde auf die in IPCC-AR4-WG1 veröffentlichte "response function" zurückgegriffen, die an das "Bern-Model" gefittet wurde (umfassendes Klimamodel, das den terrestrischen Kohlenstoffzyklus beschreibt, siehe IPCC-AR4-WG1, S.213). Unter der Annahme einer Zeitskala von 100 Jahren, findet man ein spezifisches "abslolute global warming potential" AGWP von (IPCC-AR4-WG1, p.211) von 8,69x 10^{-14} Wm^{-2}yr/kgCO_2 und damit einen spezifischen integrierten Strahlungsantrieb von

ei_{CO2}*(Bern Model)*$|_{tl=100yrs}$ = 4,4 GJ/kg Fuel (with ±15% uncertainty).

Zum anderen wurde eine gefittete Responsefunction verwendet. Diese basiert auf CO_2-Konzentrationsmessungen (Eisbohrkernmessungen für 1832-1959 von Etheridge et al. (1998) und den Mauna Loa Messungen für 1959-2004 von Keeling and Whorf (2004)) und CO_2 Emissionsberichten (Marland et al., 2007). Die so gefundene „response function" ist exponentiell abfallend mit einer Zeitkonstanten ("e-folding time") von 46,7 Jahren: g(t)=exp(-t/(46,7yrs). Mit dieser Abschätzung können wegen der begrenzten Zeitskala von 170 Jahren nur die kurzen Zeitskalen erfasst werden, ein konstantes Glied, wie es sich aus dem Bern-CO_2 Modell ergibt, erscheint dabei nicht (Hermann Mannstein). Diese "response function"

ergibt für eine Zeitskala von 100 Jahre (und unendlich) folgenden spezifischen Strahlungsimpact:

$ei_{CO2}(Data\ Fit)|_{tl=100yrs}$ = 3,8 GJ/kg Fuel; $ei_{CO2}(Data\ Fit)|_{tl=\infty}$ = 4,3 GJ/kg Fuel

Unter Berücksichtigung beider Ansätze und der damit verbundenen Unsicherheiten, wird im Rahmen der Optimierung von folgender spezifischen integrierten Strahlungswirkung (Maßzahl) für CO_2 ausgegangen:

ei_{CO2}=4 GJ/kg Fuel .

Integrierter Strahlungsantrieb durch die Emission von CO_2 :

Via Schnittstelle erhält Lido/Flight Informationen über Zeit und Ort potentieller Kondensstreifenentstehungsgebiete zusammen mit dem zu erwartenden spezifischen integrierten Strahlungsantrieb im Falle von Kondensstreifenbildung. Die vom DLR entwickelte Parametrisierung für eine entsprechende Maßzahl geht u.a. von einer durchschnittlichen spezifischen Reichweite eines Flugzeugs von 200 m/kg Fuel aus. (*Contrail_Input_Data* [GJ/0,2 km]). Die gelieferten Daten werden in Lido/Flight bzgl. der aktuellen spezifischen Reichweite (*SR* [km/kg fuel]) korrigiert. Hieraus erhält man einen spezifischen integrierten Strahlungswirkung (Maßzahl) für potentielle Kondensstreifen von

$ei_{Contrail}$=*Contrail_Input_Data * 0,2/SR* GJ/kg fuel.

Option 2: Minimierung des flugzeuginduzierten Klimaeffekts

Ziel dieser Optimierungsoption ist es, die Flugroute nach dem Kriterium der Gesamtklimawirkung von Kondensstreifen und CO_2-Emissionen zu optimieren. Aufgrund der Wahl der Maßzahl wird der flugzeuginduzierte Klimaeffekt zunächst in Lido/Flight als integrierte Strahlungswirkung aufgrund von CO_2 Emissionen und Kondensstreifenentstehung quantifiziert:

$$Climate_Impact = \int_A^B \left(ei_{CO2} + ei_{Contrail} \right) dFuel \ .$$

Da diese Funktion negative Werte annehmen kann (im Falle kühlender Kondensstreifen) und der ursprüngliche Algorithmus von Lido/Flight auf der Annahme positiver Kantengewichte basiert, musste der Optimierungsalgorithmus von Lido/Flight entsprechend angepasst werden. Diese Modifikation ist mit einer Verringerung der Performance aufgrund erhöhter Rechenzeit verbunden, die noch zu quantifizieren ist.

Die folgende Abbildung zeigt einen Ausschnitt aus dem modifizierten Lido/Flight Options Frame, der im Rahmen dieses Projektes um eine neue Optimierungsoption „Minimum Impact Track (MIT)“ erweitert wurde.

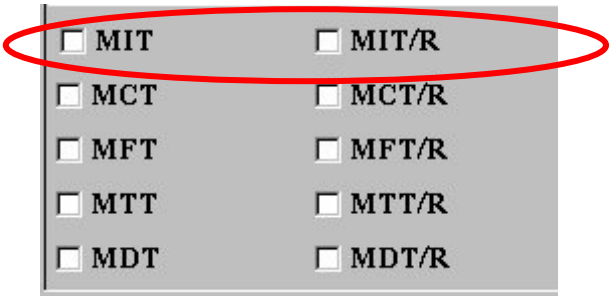


Abbildung 24:Ausschnitt aus dem Lido/Flight Options Frame mit der Möglichkeit umweltorientierter Flugroutenoptimierung.

Option 3: Minimierung einer modifizierten Kostenfunktion

Ab 2012 ist der europäische Flugverkehr Teil des EU Emissionshandelssystems. Hierbei werden zunächst allerdings lediglich CO_2 Emissionen berücksichtigt (Richtlinie 2008/101 EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19.November 2008 (vgl. http://ec.europa.eu/environment/climat/ aviation_en.htm). In dieser Richtlinie findet man die Aussage: *‚Ziel der Änderungen der Richtlinie 2003/87/EG durch diese Richtlinie ist es, die dem Luftverkehr zurechenbaren Klimaauswirkungen durch Einbeziehung der Emissionen aus dem Luftverkehr in das Gemeinschaftssystem zu verringern'* bzw. *‚Die Forschung bezüglich der Bildung von Kondensstreifen und Zirruswolken sowie bezüglich wirksamer Eindämmungsmaßnahmen, einschließlich technischer und betriebstechnischer Maßnahmen, sollte gefördert werden'*

Vor diesem Hintergrund wurde die derzeitige Kostenfunktion von Lido/Flight (*Cost*) um einen Klimakostenterm (*Cost_climate*) im Sinne eines Emissionshandelssystems (ETS) erweitert und eine neue Optimierungsgröße (*Cost_tot*) eingeführt:

Cost_tot=Cost + Cost_climate

Der Term für die Klimakosten orientiert sich an den Konzepten des EU Emissionshandelssystems (vgl. http://www.dehst.de/cln_027/nn_76192/DE/Emissionshandel/emissionshandelNode.html__nnn=true), in dem die Klimakosten als marktbasierter Preis für Emissionszertifikate dargestellt werden. Im Rahmen des Projektes haben wir daher die Mehrkosten als zusätzliche Kosten für den Erwerb von Emissionszertifikaten für CO_2 und für Kondensstreifen dargestellt:

Cost_climate=Cost_*CO_2+Cost_Contrail*

Die Kosten für die CO_2 Emissionenen setzten sich zusammen aus dem aktuellen Zertifikatspreis (P_{CO2} in [€/t CO_2] [1]) und der Menge an emittiertem CO_2. Letztere ermittelt sich aus dem Kerosinverbrauch (*Fuel* [t]) und einem konfigurierbaren Emissionsfaktor EI_{CO2} (default: EI_{CO2}=3,15 t CO_2/t Kerosin):

$$Cost_CO_2 = \int_A^B \left(EI_{CO2} \cdot P_{CO2} \right) dFuel$$

[1] Internetseiten von Handelsbörsen und Preisindices für Emissionshandelszertifikate:
http://www.europeanclimateexchange.com/default_flash.asp
http://www.eex.com/en/
http://www.eurexchange.com/market/quotes/CO2/ EUA_en.html
http://www.bluenext.eu/;
http://www.co2-handel.de/article102_0.html

Die Kosten für die Kondenstreifen werden aus einem künstlichen Zertifikatspreis für Kondenstreifen ($P_{contrail}$) bestimmt. In Anlehnung das Kyotoprotokoll, dass es ermöglicht verschiedene Substanzen gemäß ihrer Klimawirksamkeit gegeneinander zu verrechnet (so können z.B. CO_2 Emissionen durch Einsparungen bei der CH_4 Emission ausgeglichen werden), bestimmen wir hier den Zertifikatspreis für Kondensstreifen aus dem Zertifikatspreis für CO_2 gewichtet nach der jeweiligen Klimawirksamkeit von Kondensstreifen und CO_2, die durch das Verhältnis der spezifischen Wirkungen entlang der Flugstrecke ($ei_{Contrail}/ei_{CO2}$) bestimmt ist: $P_{Contrail}=(ei_{Contrail}/ei_{CO2})\cdot P_{CO2}$

$$Cost_Contrail = \int_A^B \left(EI_{CO2} \cdot P_{Contrail}\right) dFuel = \int_A^B EI_{CO2} \cdot P_{CO2} \left(\frac{ei_{Contrail}}{ei_{CO2}}\right) dFuel\,.$$

Die Idee hinter diesem Ansatz ist die Vorstellung, dass sich die Kosten von Emissionen nicht an den emittierten Massen, sondern an der verursachten Klimawirksamkeit orientieren sollten. Dabei soll jede Klimawirkungseinheit gleichviel kostet, unabhängig von der Ursache der betrachten Klimawirkung.

Da Kondensstreifen nicht generell eine erwärmende Wirkung haben, sondern – insbesondere am Tag über dunklen Oberflächen – auch kühlend wirken können, kann *Cost_Contrail* auch negativ werden. Bei niedrigen Zertifikatspreisen, führt dies zu einer Reduktion der Gesamtkostenfunktion. Im Falle hoher Zertifikatspreise können allerdings auch Gewinne realisiert werden (negative Werte der Gesamtkostenfunktion). Da der bisherige Optimierungsalgorithmus von Lido/Flight auf der Annahme positiver Kantengewichte beruht, musste der Algorithmus entsprechend modifiziert werden, um eine Optimierung mit negativen Kantengewichten zu ermöglichen (siehe hierzu auch Option 2).

Die folgende Abbildung zeigt die im Rahmen dieses Projektes realisierten Zusatzoptionen im Optimization Frame von Lido/Flight. Man kann den Emissionsindex von CO_2 (in [t CO_2/t Fuel) bestimmen und Emissionszertifikatspreise für CO_2 bzw. Kondensstreifen, die im Regelfall gleich sein sollten.

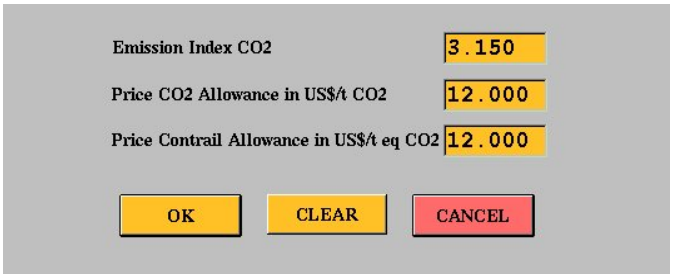
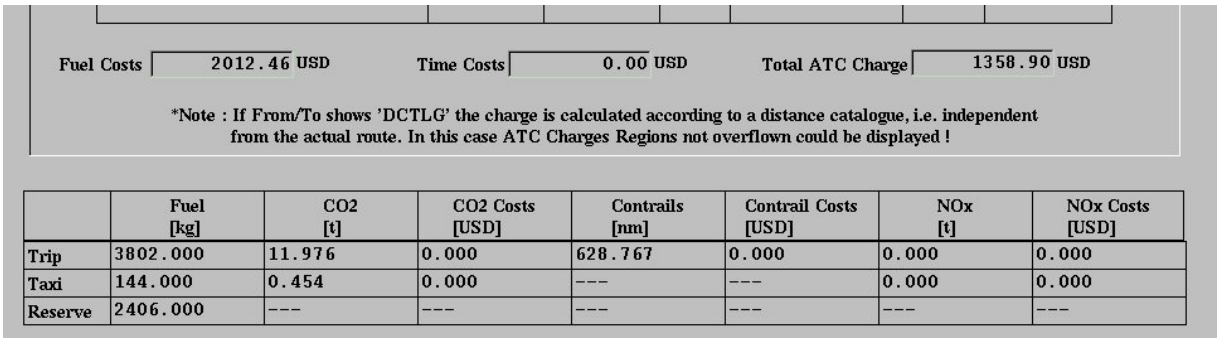


Abbildung 25: Ausschnitt aus dem Lido/Flight Optimization Frame mit der Möglichkeit umweltorientierter Flugroutenoptimierung

Darüber hinaus wurde zum Zweck einer Kostenanalyse der Lido/Flight Cost Viewer Frame um die entsprechenden Emissionszertifikatskosten erweitert. Folgende Abbildung zeigt dies für einen typischen innereuropäischen Flug:



Fuel Costs 2012.46 USD Time Costs 0.00 USD Total ATC Charge 1358.90 USD

*Note : If From/To shows 'DCTLG' the charge is calculated according to a distance catalogue, i.e. independent from the actual route. In this case ATC Charges Regions not overflown could be displayed !

	Fuel [kg]	CO2 [t]	CO2 Costs [USD]	Contrails [nm]	Contrail Costs [USD]	NOx [t]	NOx Costs [USD]
Trip	3802.000	11.976	0.000	628.767	0.000	0.000	0.000
Taxi	144.000	0.454	0.000	---	---	0.000	0.000
Reserve	2406.000	---	---	---	---	---	---

Abbildung 26: Ausschnitt aus dem Lido/Flight Cost Viewer Frame mit der Möglichkeit umweltorientierter Flugroutenoptimierung

3.3.2 Ergebnisse der Optimierung

3.3.2.1 Anwendung der neu entwickelten Flugroutenoptimierungssoftware auf ausgewählte Testfälle

Auf der Basis eines Testszenarios wurden nach weiteren umfangreichen Tests und Qualitätssicherungsmaßnahmen für den Okt/Nov und den Nov/Dez insgesamt 40.805 Flugpläne berechnet und ausgewertet. Diese liefern das Datenmaterial für eine statistische Auswertung im Sinne einer Kosten-Nutzen-Analyse.

Testszenario

Das Testszenario basiert auf realen operativen Daten. Zugrunde gelegt wurde der Lufthansa Sommerflugplan 2008 (Standardwoche) mit dessen Destinationen und Abflugzeiten, sowie dessen tatsächliche Operation (Flugzeugmuster, Auslastung) auf den ausgewählten Strecken.

Dafür wurde recherchiert, welches Flugzeugmuster auf den ausgewählten Strecken am häufigsten eingesetzt wurde und wie hoch die tatsächlichen durchschnittlichen Zeitkosten, für das jeweilige Muster sind. Darüber hinaus wurde die reale mittlere Beladung der Maschinen ermittelt. Damit konnte sichergestellt werden, dass die Flugpläne für die ausgewählten Strecken unter möglichst realistischen Randbedingungen berechnet werden konnten.

Prinzipiell werden drei Verkehrsgebiete unterschieden: Innerdeutsch, innereuropäisch und transatlantisch. Für jedes der drei Gebiete wurde nun ein repräsentatives Set von Städtepaaren herausgefiltert. Wesentliches Auswahlkriterium war eine möglichst gleichmäßige Verteilung der geographischen Lage der Zielorte. Insgesamt werden 17 typische Strecken mit 224 Verbindungen berücksichtigt. Die folgenden Bilder illustrieren die berücksichtigten Strecken, die Anzahl der berücksichtigten Hin- bzw. Rückflüge sowie die auf den Strecken am häufigsten genutzten Flugzeugmuster.

Streckenpaar	126 Flüge/Tag	Muster	Karte
Frankfurt Berlin	2x13	A321	
Frankfurt – Düsseldorf	2x8	A319	
Frankfurt – Hamburg	2x13	A321	
Frankfurt – München	2x12	A321	
München - Hamburg	2x17	A320	

Streckenpaar	12 Flüge/Tag	Muster	Karte
Frankfurt Boston	2x2	A340-300	
Frankfurt – Mexiko	2x1	B747	
Frankfurt – Sao Paulo	2x1	B747	
Frankfurt – SanFrancisco	2x1	B747	
Frankfurt - Vancouver	2x1	A340-600	

Streckenpaar	86 Flüge/Tag	Muster	Karte
Frankfurt - Istanbul	2x3	A321	
Frankfurt - London	2x10	A321	
Frankfurt – Madrid	2x3	A321	
Frankfurt – Moskau	2x5	A319	
Frankfurt – Oslo	2x4	A320	
Frankfurt – Paris	2x12	B737-300	
Frankfurt - Rom	2x6	A321	

Tabelle 1: Für das Testszenario ausgewählte Städtepaare und Anzahl der im Sommerflugplan 2008 angebotenen Flüge auf den jeweiligen Strecken und den am häufigsten eingesetzten Flugzeugmustern.

Für jede der ausgewählten Verbindungen wurden ein Basisszenario (konventionell Flugroute) und sieben umweltoptimierte Flugrouten berechnet:

Basisszenario:

- Optimierung der Gesamtkostenfunktion ohne Emissionszertifikate (Minimum Cost Track)

Umweltoptimierte Flugrouten:

- Optimierung der CO2 Emissionen (Minimum Fuel Track ohne Rerouting)
- Kondensstreifenabhängiges Umleiten von Verkehrsströmen (UFO-Option 1; 4 Szenarien)
- Minimierung der Klimawirkung (UFO-Option 2)
- Minimierung der Gesamtkostenfunktion unter Berücksichtigung von CO_2 Kosten und Kondensstreifen (UFO-Option 3) mit 7 US$ pro t CO2 Äquivalent

Flugsimulationen und Datenverarbeitung

Ein Datensatz, der für alle berücksichtigten Verbindungen alle acht Optimierungsszenarien genau einmal enthält, besteht damit aus 1.792 Flugplänen. Für jede Strecke wurden mehrere solcher Datensätze erzeugt, so dass pro AIRAC um die zwanzigtausend Flugpläne erzeugt werden konnten. Nach weiteren Tests und Qualitätssicherungsmaßnahmen wurden für den Okt/Nov und den Nov/Dez AIRAC insgesamt 40.805 Flugpläne ausgewertet (19.499 für Okt/Nov und für 21.306 Nov/Dez). Der Datensatz setzt aus 20.978 innerdeutschen Flugplänen (9.035 Okt/Nov und 11.943 Nov/Dez), 17.496 innereuropäischen Flugplänen (9.613 Okt/Nov und 7.883 Nov/Dez) und 2.331 transatlantischen Flugplänen (851 Okt/Nov und 1.480 Nov/Dez) zusammen. Die riesigen Datenmengen werden automatisiert verarbeitet. Mit Hilfe einer Excel-basierten statistischen Analyse werden Kosten, Umwege und Treihauseffektminderungspotentiale berechnet und die Ergebnisse der sieben umweltgerechten Flugrouten jeweils dem zugehörigen Basisszenario (Minimum Cost Track ohne ETS Gebühren) gegenübergestellt.

An dieser Stelle muss auf zwei Sachverhalte hingewiesen werden

1. **Die Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Analyse sind nicht verallgemeinerbar, sondern beziehen sich lediglich auf die betrachteten Zeiträume mit deren Großwetterlagen über den betrachteten Gebieten. Insbesondere ist eine starke Abhängigkeit der Albedo von der flächendeckenden hohen Bewölkung und der Schneebedeckung in den Spätherbst- und Wintermonaten auf der Nordhalbkugel deutlich sichtbar.**
2. **Die Ergebnisse sind nicht verallgemeinerbar, weil sie sich auf die Begebenheiten einer einzelnen Flugesellschaft beziehen und kein Gesamtverkehrsverkehrsszenario betrachten.**

Im Folgenden werden die Wichtigsten Ergebnisse unserer Analysen vorgestellt. Dabei wird - differenziert nach den drei Regionen und den beiden betrachteten Zeitperioden - analysiert, wie groß die mittleren kondensstreifenbedingten horizontalen und vertikalen Umwege und die damit verbundenen Mehrkosten sind. Darüber hinaus wird - auf der Basis der (bisher leider weder dokumentierten noch evaluierten) Maßzahl – das Treibhauseffektminderungspotential abgeschätzt und hieraus eine Kosten-Nutzen-Analyse abgeleitet.

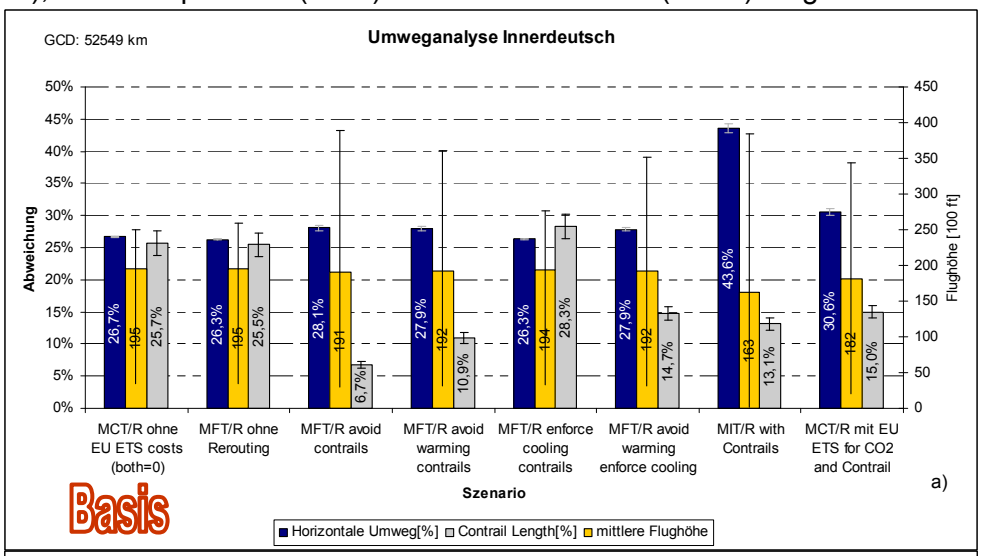
3.3.2.2 Bewertung der Treihauseffektminderung und der damit verbundenen Kosten (Kosten-Nutzen-Analyse)

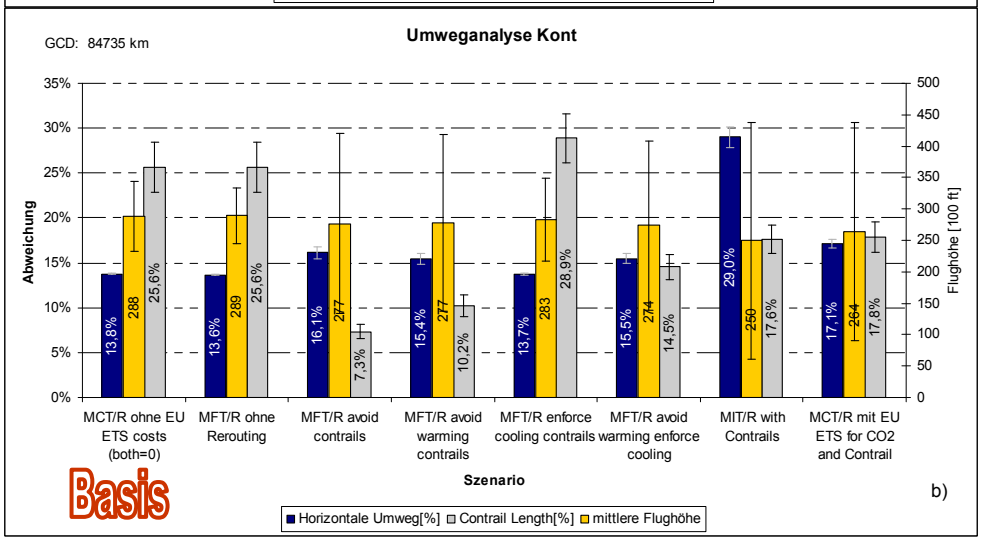
Umweganalyse

Um zu bewerten, welchen Einfluss eine umweltorientierte Flugroutenplanung auf die Flugrouten hat, wurde zunächst analysiert, wie stark die horizontale bzw. vertikale Abweichung vom Basisszenario ist.

Abbildung 27 zeigt differenziert für alle 8 Szenarien die mittlere horizontale Abweichung der realen Flugwege von den Großkreisdistanzen für alle Verbindungen des Testszenarios (dunkelblau), die mittlere Flughöhe (gelb) und der Anteil an Kondensstreifen auf dem

Flugweg (grau). Gezeigt werden die Ergebnisse für den Okt/Nov AIRAC für innerdeutsche (oben), innereuropäische (Mitte) und transatlantische (unten) Flüge.





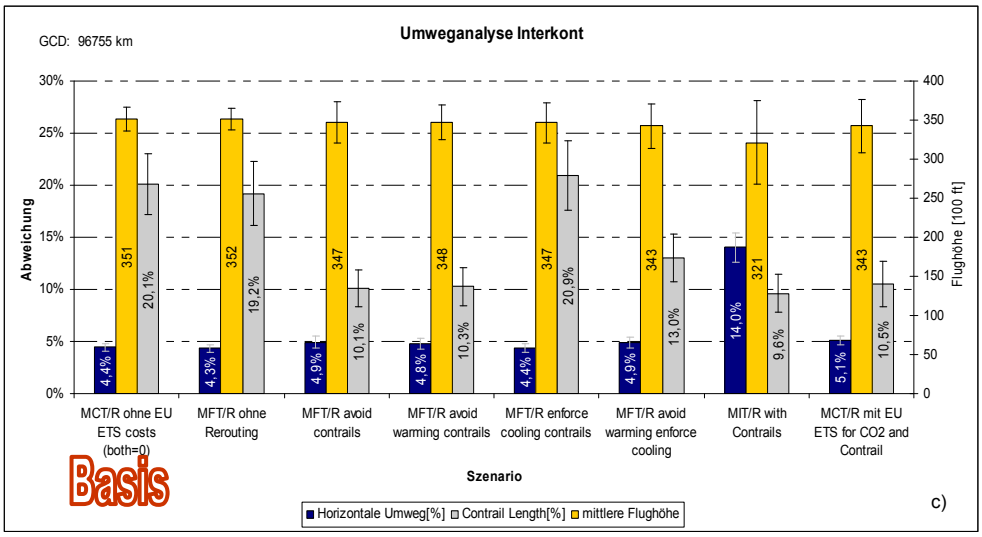


Abbildung 27: Umweganalyse für den Okt/Nov AIRAC getrennt nach innerdeutschen (oben); innereuropäischen (Mitte) und transatlantischen (unten) Flügen. Die dunkelblauen Balken zeigen die mittlere Abweichung von der GesamtGCD aller

Verbindungen (mit Streuung), gelb sind die mittlere Flughöhe in 100 Fuß und die grauen Balken zeigen den mittleren Anteil an Kondensstreifen bezogen auf die realen Flugwege.

Im Folgenden wird beispielhaft ***Abbildung 27***b erläutert, d.h. das Ergebnis für das innereuropäische Szenario im Okt/Nov AIRAC. Hier weicht für das Basisszenario der mittlere horizontale Gesamtflugweg im Mittel um 13,8% von der Großkreisentfernung zwischen Sart und Ziel ab. Diese Abweichung ist auf die Berücksichtigung der Winde, der Luftraumstruktur und –nutzungsgebühren zurückzuführen. Vernachlässigt man rein ökonomische Überlegungen und optimiert den Kerosinverbrauch und damit die CO_2 Emissionen (MFT/R ohne Rerouting), so wird der horizontale Umweg um 0,2 Prozentpunkte im Vergleich zum Basisszenario reduziert. Die verbleibende Abweichung von der Großkreisdistanz von 13,6 % kommt aufgrund der optimalen Ausnutzung der Winde und vor allem durch die Luftraumstruktur zustande. Die Differenz zum Basisszenario verdeutlicht, dass ein geringer Teil des „Horizontalen Umwegs" der Minimierung der Nutzungsgebühren für den Luftraum geschuldet ist. Der gelbe Balken in ***Abbildung 27***b zeigt für den Basisfall ein mittleres Flugniveau von FL288 bzw. von FL289 im Falle der Kerosin-bzw. Emissionsoptimierung. In beiden Fällen werden Kondensstreifen bei der Flugroutenplanung nicht berücksichtigt. Die Flugweganalyse zeigt, dass unter diesen Umständen auf ca. einem Viertel der Flugstrecke Kondensstreifen gebildet werden (grauer Balken).

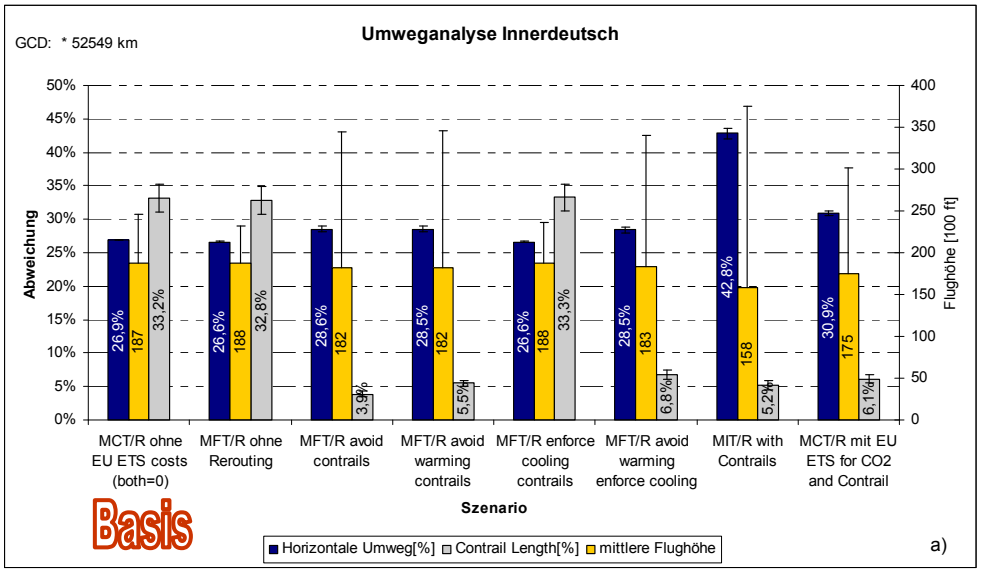
Schließt man nun im „Cruise" alle Segmente, die zu über 50% in Gebieten liegen, in denen sich Kondensstreifen bilden können (MFT/R avoid contrails), so erhöht sich der horizontale Umweg um 2,3 Prozentpunkte und das mittlere Flugniveau senkt sich um 1200 Fuß. Damit erreicht man eine Reduktion des Kondensstreifenanteils auf der Flugstrecke um 6,5 Prozentpunkte auf 7,3%. Der verbleibende Anteil an Kondensstreifen ergibt sich dadurch, dass im Steig- und Sinkflug und auf gering betroffenen Segmenten (Anteil <50%) die Kondensstreifenbildung unberücksichtigt bleiben.

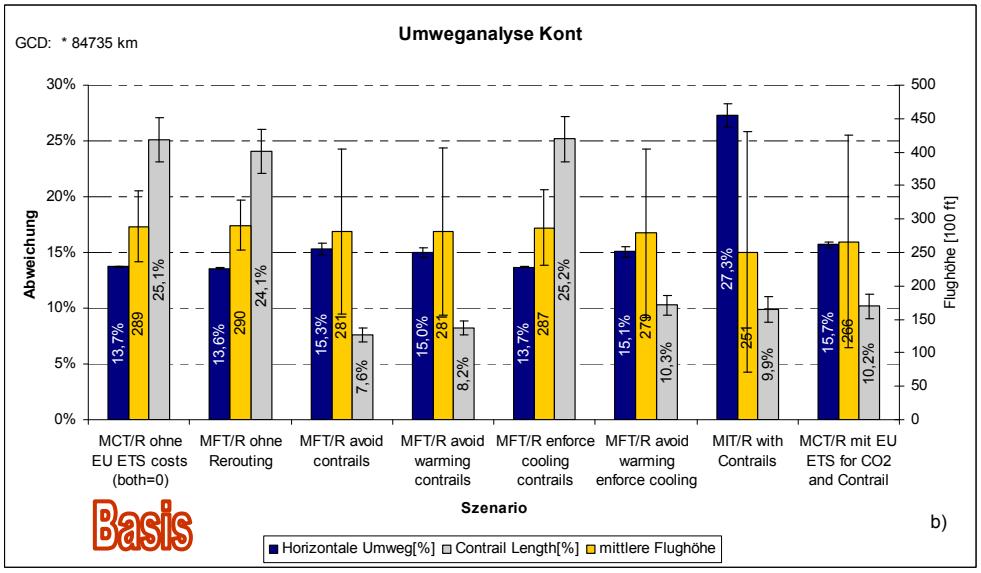
Schränkt man die geschlossenen Segmente auf Gebiete ein, in denen sich erwärmende Kondensstreifen bilden können (MFT/R avoid warming contrails), so erhält man eine vergleichbare mittlere Absenkung wie bei der Vermeidung aller Kondensstreifen, aber einen geringeren horizontalen Umweg. Dennoch erhöht sich der horizontale Umweg im Vergleich zum Basisszenario um 1,6 Prozentpunkte. Der Anteil von Kondensstreifen an der Flugstrecke ist 2,9 Prozentpunkte höher als bei der Vermeidung aller Kondendsstreifen, da nun die kühlenden Kondensstreifen ja nicht vermieden werden. Ergänzt man nun das Vermeiden erwärmender Kondensstreifen durch das gezielte Erzeugen kühlender Kondensstreifen (MFT/R avoid warming enforce cooling), so wird der Kondensstreifenanteil der Flugrouten um 4,3 Prozentpunkte erhöht (vgl. mit avoid warming). Im Vergleich zum Basisszenario bedeutet es immer noch eine Reduktion des Kondensstreifenanteils an der Gesamtflugroute um ca. 10 Prozentpunkte. Dafür erhöht sich der Umweg im Vergleich zum Basisszenario in einer ähnlichen Größenordnung wie bei alleinigem Vermeiden erwärmender Kondensstreifen, d.h. die mittlere Abweichung vom Großkreis erhöht sich um ca. 2 Prozentpunkte (vgl. mit Basis) und das mittlere Flugniveau muss um ca. 1500 Fuß abgesenkt werden. Ignoriert man hingegen die erwärmenden Kondensstreifen, und versucht Routen gezielt durch kühlende Gebiete zu planen (MFT/R enforce cooling), so erhöht sich der Kondensstreifenanteil der Strecke im Vergleich zum Basisszenario um 3,3%. Letzteres scheint im Wesentlichen durch eine leichte Absenkung des mittleren Flugniveaus (im Mittel 500 Fuß) erreicht zu werden.

Bei einer Optimierung der Flugroute nach der geringsten Klimawirkung (MIT/R with Contrails) erhöhen sich die dafür in Kauf zu nehmenden horizontalen wie vertikalen Umwege deutlich. Um die Flugroute mit der geringsten Klimawirkung zu fliegen, ist mehr als eine Verdopplung der Abweichung vom Großkreis nötig (29% statt 13,8%) und eine Absenkung des mittleren Flugniveaus von fast 4000 Fuß (FL288 nach FL250) mit einer allerdings sehr großen

Streuung. Das sind wesentlich größere Umwege, als bei der klimaeffektivsten „Rerouting“option (MFT/R avoid warming enforce cooling), wo ein Vermeiden erwärmender Konensstreifen und eine gezielte Produktion kühlender Kondensstreifen horizontale Umwege von 1,7 Prozentpunkten (vgl. mit 14,2 Prozentpunkten) und vertikal eine Absenkung von 1500 Fuß (vgl. mit 4000 Fuß) bedeutet.

Belegt man nun – in Anlehnung an den EU Emissionshandel - die Klimawirkung von CO2 und Kondensstreifen mit Kosten und folgt dabei dem Prinzip gleiche Kosten für gleiche Wirkung (MCT/R for CO2 and Contrail), so reduzieren sich für die auf diese Weise gesamtkostenoptimierten Flüge die Umwege verglichen mit dem Klimaoptimierten Fall (MIT/R with Contrails), ist aber größer als im Fall der klimaeffektivsten „Rerouting“option (MFT/R avoid warming enforce cooling). Im Vergleich zum Basisszenario erhöht sich der horizontale Umweg um 3,3 Prozentpunkte und das mittlere Flugniveau senkt sich um 2400 Fuß.





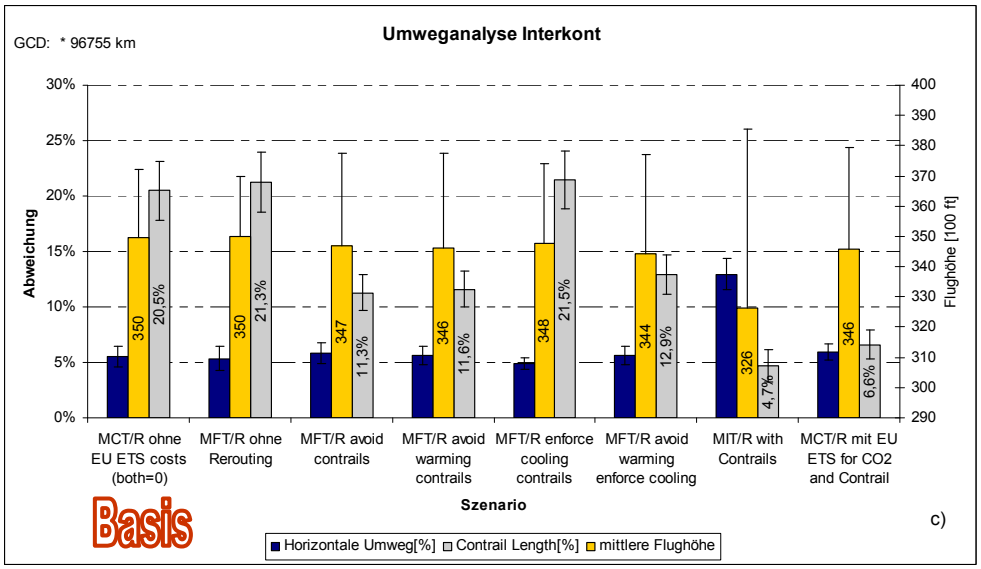


Abbildung 28: Umweganalyse für den Nov/Dez AIRAC (analog zu Abbildung 27)

Eine ähnliche Analyse wurde ebenfalls für die anderen Gebiete durchgeführt. Die ***Abbildung 27*** a (innerdeutsch) und c (transatlantisch) zeigen die Ergebnisse für den Okt/Nov AIRAC. Während bei den innerdeutschen Flügen (***Abbildung 27***a) aufgrund der kurzen Routen generell geringere mittlere Flughöhen und größere horizontale Abweichungen vom Großkreis zu beobachten sind als im innereuropäischen Szenario. Dies bewirkt, dass die umweltorientierten Flugrouten eher durch größere horizontale Umwege und eine geringere Absenkung des mittleren Flugniveaus zustande kommen verglichen mit dem innereuropäischen Szenario. Dabei ist der Anteil an Kondensstreifen auf den Strecken und dessen Veränderung durchaus vergleichbar (bei MIT/R und MCT/R mit EU ETS etwas höher).

Da es sich bei den Transatlantikflügen (***Abbildung 27***c) um Langstreckenflüge handelt, ist die prozentuale mittlere horizontale Abweichung von GCD generell geringer als bei den innereuropäischen und innerdeutschen Flügen und dies bei einem prinzipiell deutlich höheren mittleren Flugniveau. Allerdings ist das Größenverhältnis der Übersättigungsgebiete und der Flugstrecken bei Langstreckenflügen so, dass es leichter ist, die Flugroute diesen Gebieten anzupassen. Dies führt zu geringeren durchschnittlichen Absenkungen der Routen und zu geringeren horizontalen Umwegen verglichen mit den innereuropäischen oder innerdeutschen Routen.

Eine ähnliche Analyse wurde ebenfalls auch für den Nov/Dez AIRAC durchgeführt (

Abbildung 28). Das Gesamtbild der Umweganalyse für die beiden AIRACS ist in ***Tabelle 2*** dargestellt. Die Abweichung von AIRAC zu AIRAC ist im Vergleich zu den Unterschieden zwischen den einzelnen Szenarien gering, so dass davon ausgegangen werden kann, dass der Einfluss der exakten Airway-Struktur in den untersuchten Fällen eher von untergeordneter Bedeutung war.

Umweltorinetierte Flugroutenplanung (vgl. mit Basis)		Rerouting (avoid warming; enforce cooling)			Minimum Climate Impact Track (MIT/R)			Minimum Cost Track mit EU ETS für CO_2 und Contrails		
		Inner-deutsch	Inner-europ.	Trans-atlant.	Inner-deutsch	Inner-europ.	Trans-atlant.	Inner-deutsch	Inner-europ.	Trans-atlant.
Horiz. Umweg [GCD]	Okt/Nov	1%	2%	0,2%	17%	15%	9%	4%	3%	0,7%
	Nov/Dez	2%	1%	0,1%	16%	14%	8%	4%	2%	0,4%
Vertik. Umweg [Fuß]	Okt/Nov	-300	-1.400	-900	-3.200	-3.800	-3.000	-1.300	-2.400	-900
	Nov/Dez	-400	-1.000	-600	-2.900	-3.800	-2.200	-1.200	-2.300	-400

Tabelle 2: Zusammenfassung der Ergebnisse der Umweganalyse für beide AIRACs und alle Gebiete. Verglichen werden das komplexeste Rerouting Verfahren, der Minimum Impact Track und ein Kostenoptimierung unter ETS+ Bedingungen. Dargestellt wird die Verlängerung des Horizontalen Umwegs im Vergleich zum Basisszenario und die Absenkung der mittleren Flughöhe im Vergleich zum Basisszenario.

Kostenanalyse

Da die oben beschriebenen Umwege mit Mehrkosten aufgrund erhöhter Zeit- und Kerosinverbräuche verbunden sind und außerdem mit erhöhten ATC-Gebühren, ist bei der

umweltorientierten Flugroutenplanung mit Mehrkosten im Vergleich zum Basisszenario zu rechnen. Lediglich bei einer **hypothetischen** Einbindung der Klimawirkung in ein Bonus-Malus-Emissionshandelsschema ist es prinzipiell möglich diese zusätzliche Kosten zu kompensieren, nämlich genau dann, wenn die erzeugte Nettoklimawirkung so stark kühlend ist, d.h. genügend kühlende Kondensstreifen erzeugt werden können, so dass die theoretisch generierten Kompensationsgewinne die Zusatzkosten der Umwege übersteigen (MCT/R with EU ETS for CO_2 and Contrails).

Da die Wirkung der Kondensstreifen durchaus jahreszeitliche Abhängigkeiten aufweist, im Projekt jedoch nur die tatsächliche Wettersituation im Zeitraum Oktober bis November 2008 untersucht werden konnte, **sind die Aussagen über Zusatzkosten mit Vorsicht zu betrachten**.

Eine detaillierte Kostenanalyse, die Mehrkosten durch

- erhöhten Kerosinverbrauch (aufgrund von verlängernden Wegstrecken),
- erhöhte Wartungskosten (aufgrund von verlängerten Betriebszeiten)
- erhöhte Personalkosten (aufgrund von verlängerten Betriebszeiten)
- sich ändernde ATC-Gebühren (aufgrund von verlängernden Wegstrecken und sich ändernden Überflugsgebieten)

berücksichtigt, zeigt, dass sich die **Mehrkosten im Bereich von 2 bis 15%** bewegen.

Durch eine Anerkennung kühlender Kondensstreifen als Kompensationsmaßnahme im Rahmen eines theoretischen Emissionshandelsschemas (ETS+), konnte in einem einzigen Szenario (Okt/Nov, innereuropäisch) ein Gewinn von 0,14% realisiert werden. Hierbei ist zu beachten, dass dieses Ergebnis stark von der Wahl der Zertifikatsgebühren abhängt (hier wurden 7 US$/t CO_2-Äquivalent gewählt) sowie starken saisonalen Schwankungen unterliegt. Da die Möglichkeit, kühlende Kondensstreifen zu erzeugen auch von der Albedo und damit von regionalen Parametern, sowie vom Tag- und Nachtanteil der Flüge und damit vom Flugplan abhängt, ist nicht davon auszugehen, dass ein ETS+ System generell zu einem Netto-Gewinn führen würde.

Mehrkosten in Höhe von 2 bis 15% pro Flug sind für eine Airline – auch wenn dies auf den ersten Blick nicht so erscheinen mag – ein gewaltiger Kostenblock. Ein Vergleich mit dem jährlichen operativen Gewinn sollte dies verdeutlichen (siehe ***Abbildung 29***).

Dazu wurden die theoretischen Mehrkosten aufgrund einer sich um 5% verlängerten Wegstrecke abgeschätzt. Basis dafür waren allein der erhöhte Kerosinverbrauch, nicht aber die erhöhten Wartungs- und Personalkosten und auch nicht die sich ändernden ATC-Gebühren, berücksichtigt. D.h. eine insgesamt stark konservative Abschätzung. Für die Berechnung der erhöhten Kerosinkosten wurde die Gesamtmenge an verbrauchtem Kerosin eines Jahres um 5% erhöht und dieser Mehrverbrauch mit der in diesem Jahr tatsächlich gezahlten Preis pro Tonne multipliziert.

Abbildung 29 zeigt das Ergebnis dieser Abschätzung für die letzten 10 Jahre. Während die Mehrkosten für Kerosin einen relativ stetigen (ansteigenden) Verlauf zeigen, ist der operative Gewinn starken Schwankungen von Jahr zu Jahr unterworfen. Der relativ stetige Verlauf der Mehrkosten für Kerosin ist im Wesentlichen der Vergrößerung der Flotte sowie dem generell ansteigenden Verkehrswachstum geschuldet. Der relativ unstete Verlauf des operativen Gewinns ist oft von welt- und geopolitischen äußeren Einflüssen geprägt, wie z.B. Kriege (Golfkriege), Epidemien (SARS), Wirtschafts- und Finanzkrisen, sowie sonstigen Katastrophen (Tsunami, Vulkanausbruch, Fukushima,…).

Im 10-Jahres-Durchschnitt betrügen die Mehrkosten 30% des jeweiligen operativen Gewinns. **In einigen Jahren würden die Mehrkosten sogar zu deutlichen operativen Verlusten führen.**

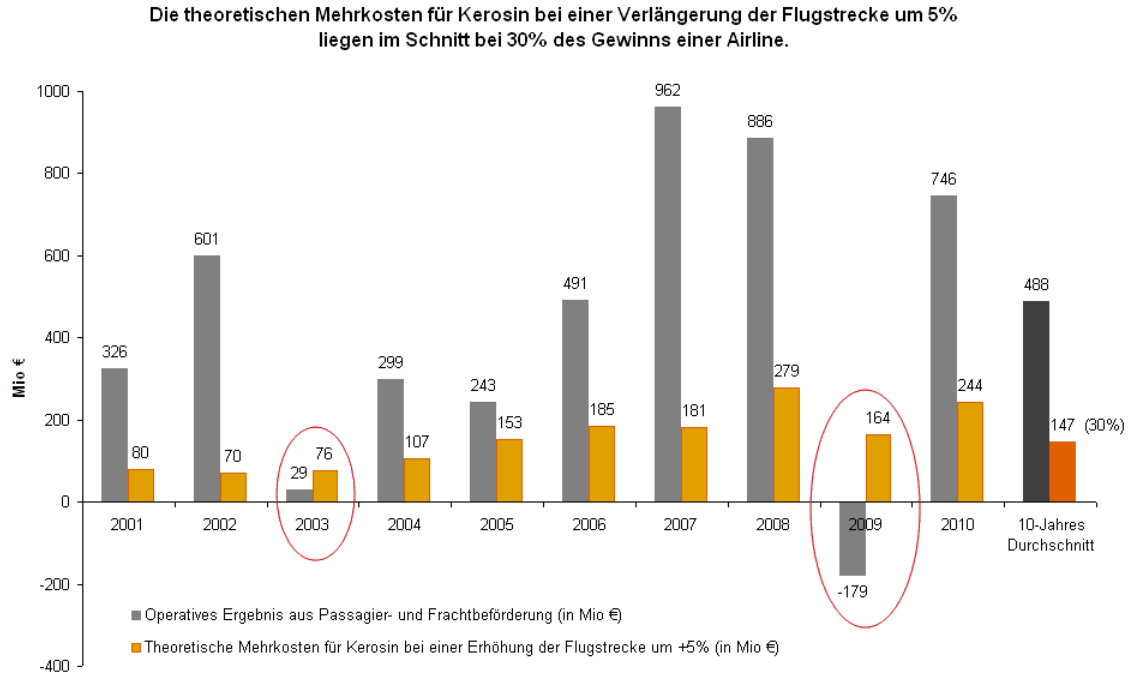


Abbildung 29: Analyse der Mehrkosten für Kerosin bei einer Verlängerung der Flugstrecke um 5%

Impactanalyse

Abbildung 30 zeigt für das bereits oben näher diskutierte innereuropäische Szenario (Okt/Nov AIRAC), daß trotz der erwähnten Einschränkungen, was die Möglichkeiten angeht, kühlende Kondensstreifen zu bilden, die umweltorientierten Flugrouten durchweg eine Reduktion der mittleren Gesamtklimawirkung im Vergleich zum Basisszenario bedeuten (quantifiziert als Integriertes Global Warming auf einer Zeitskala von 100 Jahren [GJ]).
Während das gezielte Vermeiden von erwärmenden und Erzeugen von kühlenden Kondensstreifen (Rerouting) im betrachteten Fall dazu führt, daß der Flug klimaneutral stattfinden kann, erreicht man mit den beiden anderen umweltorientierten Flugplanungalgorithmen sogar eine Nettoklimakühlung. Erwartungsgemäß erreicht man den größten Effekt mit Flugrouten, die nach dem Krieterium der Wirkungsminimierung optimiert wurden (MIT). Hier wurde die Klimawirkung des Basisszenarios sogar um fast 50% überkompensiert. Ähnlich sieht es für den Fall aus, in dem in einem ETS+ System der positive Klimaeffekt auch monetär honoriert wird und die Gesamtkosten optimiert werden (40%). Auch hier wird nicht nur die Klimaerwärmung des Basisszenarios verhindert, sondern darüber hinaus auch noch gekühlt – d.h. hier wird Klimaschutz durch Flugzeuge realisiert.

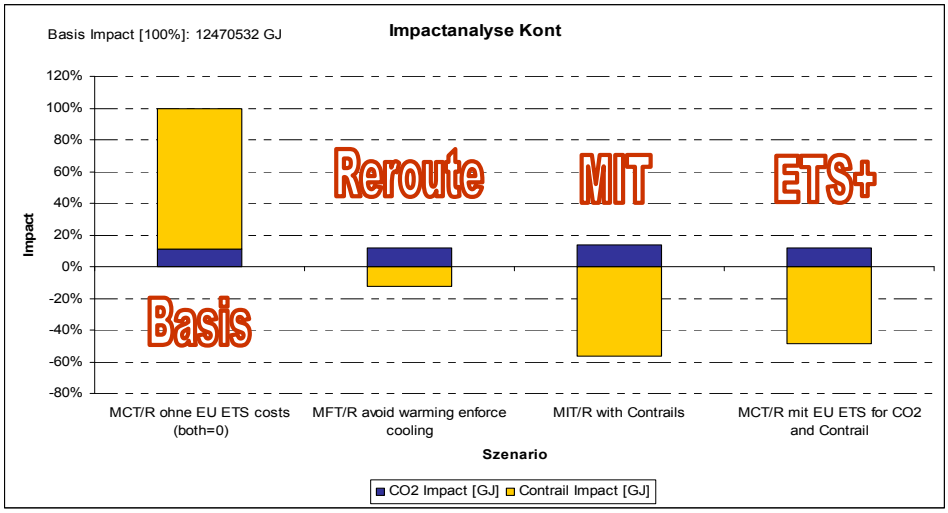
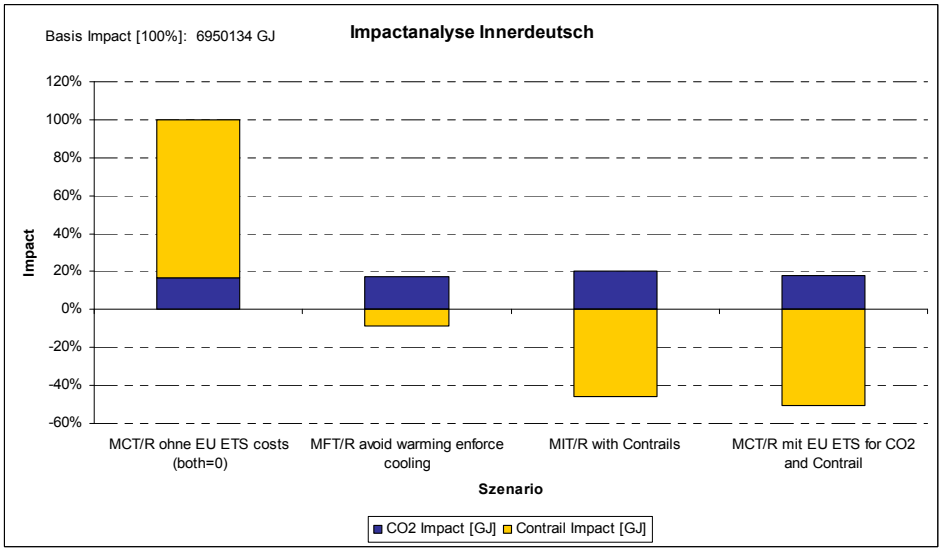
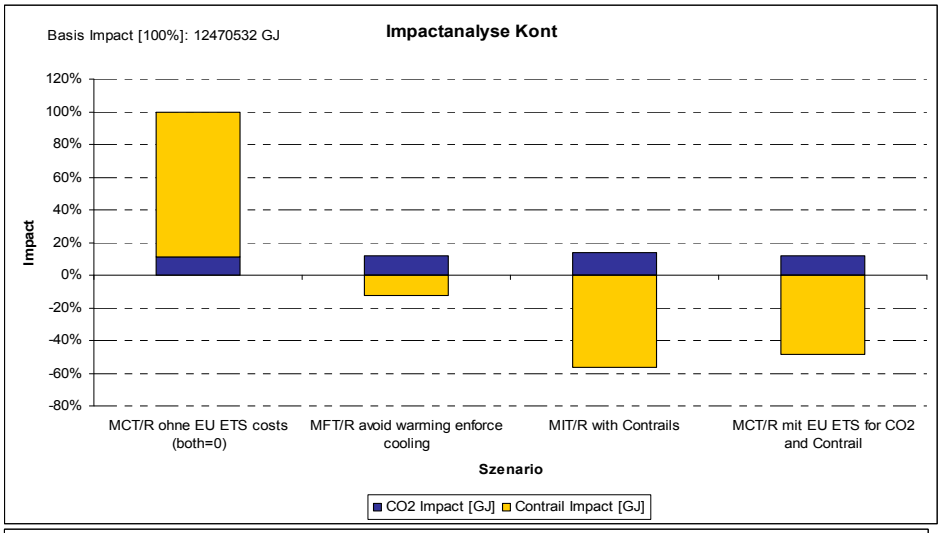


Abbildung 30 Schätzung des Treibhauseffektminderungspotentials für das innereuropäische Testszenario im Okt/Nov AIRAC. Gezeigt wird die prozentuale Impactverteilung bezogen auf die Gesamtwirkung des Basisszenarios: Klimawirkung durch CO2 Emissionen (blau) und durch Kondensstreifen (gelb). Die Klimawirkung von Kondensstreifen, hier bezogen auf den zusätzlichem Energieeintrag, ist mit großen Unsicherheiten behaftet, da die zugrunde gelegte Maßzahl nur eine erste Schätzung ist.

Da die Klimawirkung der Flüge und auch das Reduktionspotential unterliegen jahreszeitlichen Schwankungen und regionalen Unterschieden unterliegt, kann das oben beschriebene Ergebnis nicht verallgemeinert werden. ***Abbildung 31*** und ***Abbildung 32*** zeigen die entsprechenden Ergebnisse der Kostenanalyse für beide AIRACS und alle drei Gebiete.





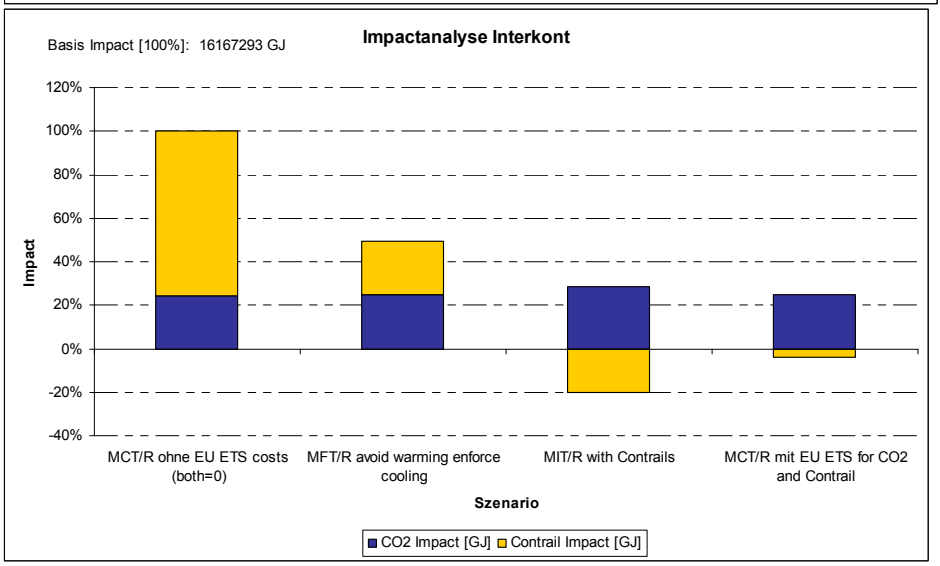
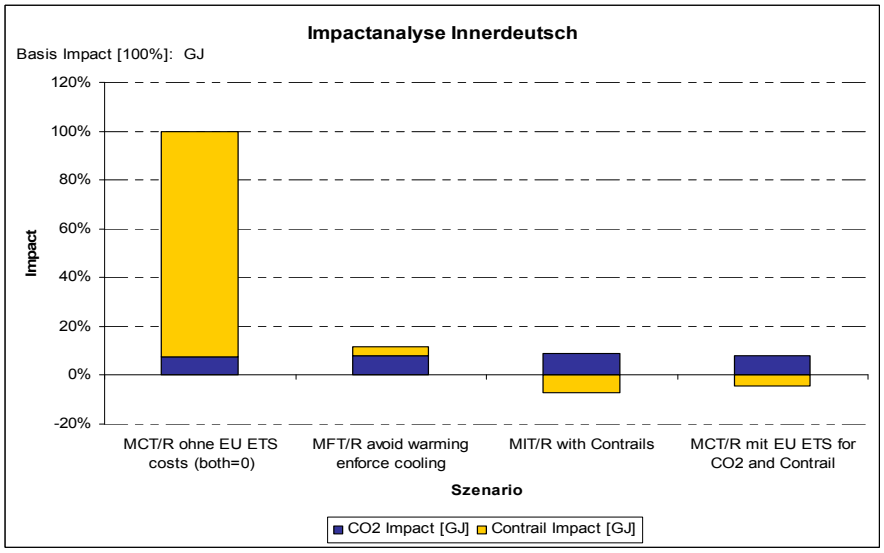
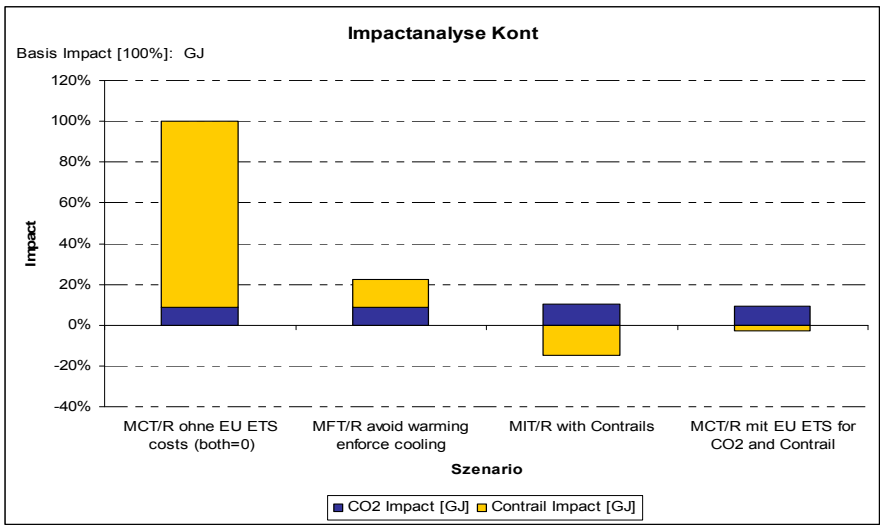


Abbildung 31: Analyse des Treibhauseffektminderungspotentials für den Okt/Nov AIRAC getrennt nach innerdeutschen (oben); innereuropäischen (Mitte) und transatlantischen (unten) Flügen (wie Abbildung 30) . Die Klimawirkung von Kondensstreifen, hier bezogen auf den zusätzlichem Energieeintrag, ist mit großen

Unsicherheiten behaftet, da die zugrunde gelegte Maßzahl nur eine erste Schätzung ist.





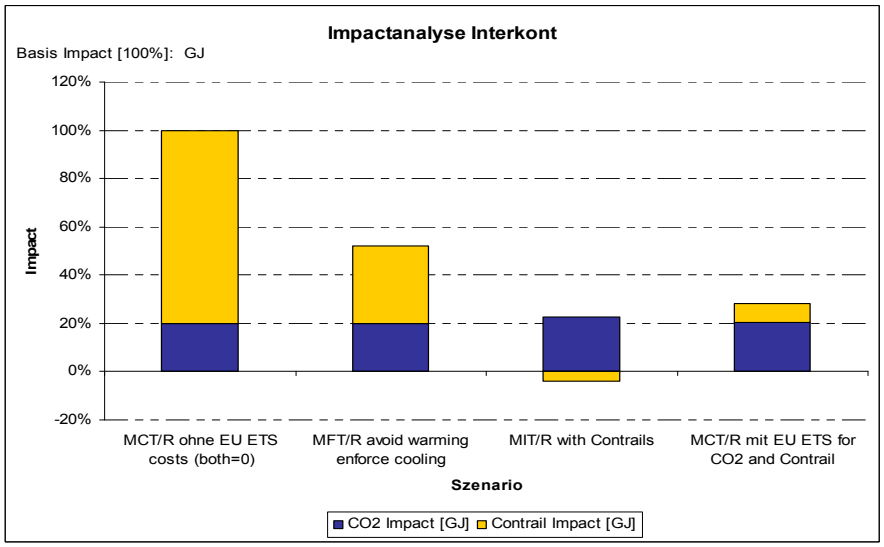


Abbildung 32: Analyse des Treibhauseffektminderungspotentials für den Nov/Dez AIRAC (wie Abbildung 31). Die Klimawirkung von Kondensstreifen, hier bezogen auf

den zusätzlichem Energieeintrag, ist mit großen Unsicherheiten behaftet, da die zugrunde gelegte Maßzahl nur eine erste Schätzung ist.

Tabelle 3 zeigt für alle drei betrachteten Regionen und die beiden untersuchten AIRACS, um wieviel Prozent sich die Klimawirkung des Basisszenarios (MCT/R ohne Contrails) durch umweltorientierte Routenplanung reduzieren läßt. Man sieht deutlich, daß das Reduktionspotential im Okt/Nov AIRAC saisonal bedingt größer war als im Nov/Dez AIRAC. Dies gilt für alle Regionen und Szenarien. Im tiefen Winter (Nov/Dez) war eine klimaneutrale Flugroutenplanung nur noch in einem einzigen Fall möglich (innereuropäisch mit MIT/R), ansonsten führte die umweltorientierte Planung zwar zu einer Reduktion des Klimaeffekts, aber ein erwärmender Nettoeffekt blieb, während im spätherbst (Okt/Nov) durchaus noch Nettoklimaschuzt durch Fliegen möglich war (außer transatlantisch). Das größte Reduktionspotential ergibt sich generell auf den innereuropäischen Strecken, gefolgt von den innerdeutschen Flügen. Das geringste Reduktionspotential findet man auf den im Szenario gewählten Transatlantikstrecken. Dies liegt daran, dass der Anteil der Wegstrecke auf denen Kondensstreifen entstehen hier generell geringer ist und damit die Wirkung der Kondensstreifen im Vergleich zur Wirkung der CO2 Emissionen ebenfalls. Da - saisonal bedingt - die Vermeidung erwärmender Kondensstreifen als Strategie bei allen umweltorientierten Flugplanungsoptionen dominiert, ist der Nettoeffekt dieser Maßnahme begrenzt und führt nicht zu einer (Über)kompensation der erwärmenden Wirkung der vergleichsweise bedeutenden CO2 Emissionen.

Umweltorinetierte Flugroutenplanung (vgl. mit Basis)	Rerouting (avoid warming; enforce cooling)			Minimum Climate Impact Track (MIT/R)			Minimum Cost Track mit EU ETS für CO_2 und Contrails		
	Inner-deutsch	Inner-europ.	Trans-atlant.	Inner-deutsch	Inner-europ.	Trans-atlant.	Inner-deutsch	Inner-europ.	Trans-atlant.
Klimanutzen [% Base]	-92% -88%	-100% -78%	-51% -48%	-126% -98%	-143% -104%	-91% -81%	-133% -96%	-137% -94%	-79% -72%

Tabelle 3: Zusammenfassung der Ergebnisse der Impactanalyse für beide AIRACs und alle Gebiete. Dargestellt wird die Veränderung der Gesamtklimawirkung von CO2 und Kondensstreifen im Vergleich zu der Gesamtwirkung des Basisszenarios. Negative Zahlen bedeuten eine Reduktion des Nettoeffekts, Werte kleinerer als (-100%) bedeuten eine realen Nettokühlung durch den Flugverkehr.

3.3.3 Bewertung der betrieblichen Machbarkeit und der Auswirkungen auf die Luftraumkapazität durch die Flugsicherung

3.3.3.1 Bewertung der operationellen Machbarkeit für einzelne Flüge

Es konnte gezeigt werden, dass sich eine Flugplanung unter Berücksichtigung von Kondensstreifenentstehungs- gebieten für **einzelne** Flüge operativ durchführen lässt. Die Kompatibilität zu den geltenden Richtlinien und Vorschriften kann eingehalten werden und ergibt sich direkt aus der Routenplanung im Rahmen von Lido/Flight. Für den einzelnen Flug ist also keine prinzipielle Einschränkung bei der Durchführbarkeit zu befürchten. Diese Aussage gilt für alle 8 betrachteten Optimierungsszenarien.

Da die DLH die Realisierbarkeit nur für einzelne Flugrouten zeigen kann, nicht aber die operationellen Auswirkungen bezüglich der Luftraumkapazität über Deutschland, wurde Projekt intern entschieden, dass weite Teile des Arbeitspaketes von der DFS bearbeitet werden (siehe 3.3.3.2). Allerdings kann weder von einzelnen Flügen noch vom Luftraum über Deutschland auf die Gesamtheit des weltweiten Luftverkehrs extrapoliert werden. Dies liegt auch außerhalb des vorliegenden Projektauftrags. Die hohe Flugverkehrsdichte über Mitteleuropa ist bei einer globalen Betrachtung der Ausnahmefall.

3.3.3.2 Bewertung der operationellen Machbarkeit für den deutschen Luftraum

3.3.3.2.1 Aufgabenstellung

Nachdem seitens Lufthansa bereits gezeigt werden konnte, dass sich eine Flugplanung unter Berücksichtigung von Kondensstreifenentstehungsgebieten für einzelne Flüge operativ durchführen lässt, sollte seitens der DFS analysiert werden, welche betrieblichen Auswirkungen bezüglich der Gesamt-Luftraumkapazität zu erwarten wären.

Konkret wurden dabei die folgenden Fragestellungen im Vorfeld an die DFS gerichtet:

Die Bewertung der operationellen Machbarkeit einer umweltgerechten Flugroutenführung (eine zentrale Fragestellung des Projekts) kann innerhalb des UFO Verbundprojekts nur seitens des Projektpartners DFS erfolgen.

Dazu bedarf es einer Kapazitätsanalyse für den deutschen Luftraum unter einer zusätzlichen Randbedingungen – nämlich der Vermeidung von Kondensstreifen.

Die Größe und Position solcher Kondensstreifenentstehungsgebiete kann von DWD Vorhersagedaten extrahiert werden. Diese Vorhersagedaten werden in einem 6-Stunden Intervall geliefert und im Projekt bereits als Grundlage für eine umweltgerechte Flugroutenplanung (DLH) benutzt.

Mit dieser zusätzlichen Randbedingung können bereits LIDO OC Flugpläne berechnet werden und diese sind an sich auch genehmigungsfähig (wurde via CFMU gecheckt). Dennoch sagen diese Checks nur etwas über den einzelnen Flugplan aus, nicht aber darüber, welche Rückwirkungen eine generelle Änderung der Flugplanungspraxis auf den Luftraum als Ganzes haben.

Die Analyse der DFS müsste folgende Aspekte untersuchen:

1) basierend auf DWD Vorhersagedaten von Kondensstreifenentstehungsgebieten im deutschen Luftraum (inklusive Aussagen der Wirkung, d.h. erwärmende oder kühlende Kondensstreifen), sollten folgende Fragen beantwortet werden:
   - (A) Gibt es die Kapazität des deutschen Luftraumes her, Entstehungsgebiete erwärmender Kondensstreifen komplett zu schließen? Dabei ist nach Regionen und Tageszeiten zu unterscheiden (erwärmende Contrails entstehen v.a. nachts)
   - (B) Gibt es die Kapazität des deutschen Luftraumes her, den gesamten Flugverkehr in der Nähe eines kühlenden Kondensstreifenentstehungsgebietes so umzuleiten, dass er durch dieses Gebiet hindurch fliegt? Dabei ist nach Regionen und Tageszeiten zu unterscheiden (kühlende Contrails entstehen v.a. tags)
   - (C) Welcher Anteil, des Flugverkehrs, könnte auf einer kondensstreifenfreien Flugroute fliegen, ohne, dass es Kapazitätsprobleme gibt? Auch hier ist nach Tageszeiten und Regionen zu differenzieren. Wie sieht diese Analyse aus, wenn nur erwärmende Kondensstreifen vermieden würden?
   - (D) Welcher Anteil des Flugverkehrs kann so umgeleitet werden, dass er gezielt kühlende Kondensstreifen erzeugt, ohne dass es dabei zu Kapazitätsprobleme gibt? Auch hier ist nach Tageszeiten und Regionen zu differenzieren.

3.3.3.2.2 Übersicht:

Die Analyse der betrieblichen Machbarkeit dieses Forschungsprojektes bezieht sich auftragsgemäß ausschließlich auf die operationellen Auswirkungen bezüglich der Luftraumkapazität; die ebenfalls vorhandenen Auswirkungen auf die militärische Luftfahrt sowie die Flugsicherungsgebühren werden hier ebenso wenig betrachtet wie die Wirtschaftlichkeit für die Luftfahrzeugbetreiber (Airlines).

Um die Kondensstreifenentstehungsgebiete betrieblich realistisch bewerten zu können, erfolgt dies anhand von vergleichbaren Luftraumelementen wie militärische Übungslufträume (Flugbeschränkungsgebiete) oder einzelne Kontrollsektoren.

Die dynamische Bewegung der Kondensstreifenentstehungsgebiete kann zusätzlich mit Gewitterzellen und den dabei gesammelten praktischen Erfahrungen bei der Verkehrsabwicklung verglichen werden.

Im Ergebnis zeigt sich, dass während der "normalen" Tageszeiten der DFS-Kontrollzentralen von 04:30 Uhr bis 01:30 Uhr Ortszeit die Berücksichtigung solcher Lufträume (z.B. Freihalten von Luftfahrzeugen) ohne gravierende Auswirkungen auf die Luftfahrt nicht möglich ist.

Während einiger weniger Nachtstunden (zwischen 01:30 Uhr und 04:30 Uhr Ortszeit) erscheint die Berücksichtigung solcher Kondensstreifenentstehungsgebiete (theoretisch) operationell machbar, sofern die dafür dann erforderlichen Verfahren erarbeitet und der regulative Rahmen definiert werden können.

3.3.3.2.3 Umfang des Prüfauftrages

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde seitens der DFS eine Prüfung der betrieblichen Machbarkeit vor dem Hintergrund der damit verbundenen Auswirkungen auf die Luftraumkapazität erbeten.

Die nachfolgend aufgeführten Aspekte wurden daher nicht näher betrachtet, müssen an dieser Stelle aber ausdrücklich erwähnt werden, da unmittelbare Auswirkungen entstehen:

I) Auswirkungen auf den militärischen Luftverkehr

Gemäß Auftrag des Bundesministeriums der Verteidigung (BMVg) sowie entsprechender internationaler Vereinbarungen nutzen militärische Luftfahrzeuge den deutschen Luftraum. Diese Luftraumnutzung findet überwiegend in speziell ausgewiesenen Flugbeschränkungsgebieten (Temporary Reserved Area – TRA) statt. Auch diese militärischen Luftfahrzeuge tragen zur Kondensstreifenentstehung bei. Inwieweit eine mögliche Einschränkung des militärischen Flugverkehrs (z.B. keine Nutzung eines speziell ausgewiesenen Übungsluftraumes bzw. ein Umfliegen bestimmter Lufträume) seitens der Streitkräfte akzeptiert werden kann, liegt außerhalb des Einflussbereiches der DFS.

Auswirkungen könnten sein:

- Keine oder verschobene Nutzung von militärischen Übungslufträumen
- Störung der militärischen Übungen durch Durchflüge von umgeleiteten zivilen Luftfahrzeugen

Eine Abwägung der Interessen (zivil-militärisch) ist ggf. an anderer Stelle vorzunehmen.

II) Auswirkungen auf Flugsicherungsgebühren

Bei der Ermittlung der für jeden Flug entstehenden Flugsicherungsgebühren fließt die Flugstrecke als unmittelbarer Faktor in die Berechnung mit ein. Abweichungen von den ursprünglich geplanten Flugstrecken führen damit ggf. zu entsprechend höheren Flugsicherungsgebühren.

III) Wirtschaftlichkeit

Aussagen bezüglich der Wirtschaftlichkeit für die einzelnen Flüge bzw. die Akzeptanz von erhöhten Treibstoffkosten aufgrund der Umfliegung von Kondensstreifenentstehungsgebieten) sind durch die Luftfahrzeugbetreiber (Airlines) zu treffen.
Die DFS hat den gesetzlichen Auftrag, den Flugverkehr sicher, geordnet und flüssig abzuwickeln. Dabei sind alle Luftraumnutzer grundsätzlich gleich zu behandeln (first come first served). Eine Bevorzugung / Benachteiligung, die durch eine Umleitung aufgrund von Kondensstreifengebieten erfolgen könnte, kann durch die DFS ohne eine gesetzliche Regelung / Weisung des BMVBS **nicht** erfolgen.

3.3.3.2.4 Analyse-Szenario aus Sicht der Flugsicherung

Eine DFS-Bewertung der betrieblichen Auswirkungen dieses Projektes auf die Gesamt-Luftraumkapazität soll anhand konkreter Fallbeispiele erfolgen. Dabei werden die (wärmenden) Kondensstreifen-Lufträume mit aktiven militärischen TRAs (Flugbeschränkungsgebiete für militärischen Übungsflugbetrieb) verglichen. Die nachfolgende Abbildung 33 zeigt zur Veranschaulichung die gegenwärtig in Deutschland festgelegten TRA-Lufträume (die Untergrenzen beginnen in FL 80 oder FL 100, die Obergrenzen liegen bei FL 350, FL 660 oder UNL).

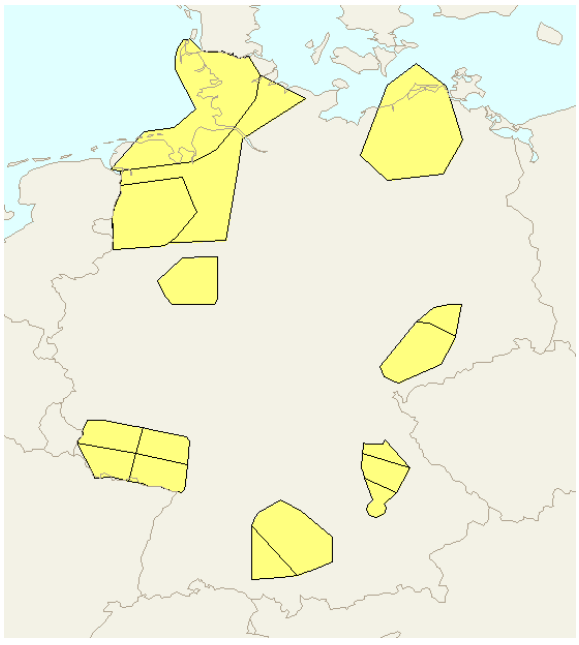


Abbildung 33: TRA-Struktur Deutschland

Abbildung 34: Kontrollsektor Frankfurt (FFM) der DFS NL Upper Karlsruhe

Da die Kondensstreifenentstehungsgebiete eine Ausdehnung von z.B. lateral 150 km bis 250 km und vertikal bis zu 6000 ft haben können, wurde für die flugsicherungsbetriebliche

Betrachtung eine vergleichbare fiktive TRA mit einer solchen Größenordnung gewählt, wobei bei der “Kondensstreifen-TRA“ noch erschwerend die dynamische Bewegung dieses Luftraums in Abhängigkeit von der Wetterlage sowie die relativ kurzfristige Vorlaufzeit (Vorhersagedaten im 6-Stunden Intervall) hinzukommen. Dieses dynamische Verhalten kann am Besten mit der Herausforderung einer großen Gewitterzelle verglichen werden:
Im Sommer, wenn sich große Gewitter bilden, wird in Folge der hohen Komplexität aufgrund des erforderlichen ständigen Koordinierens für jeden Flug die Kapazität eines Sektors um 30% - 50% reduziert. Die Auswirkungen auf die Luftraumnutzer sind hier beträchtlich.
Zur Verdeutlichung können die regelmäßig dokumentierten Verspätungsminuten herangezogen werden: So wurden z.B. für das Jahr 2008 insgesamt 557.629 wetterbedingte Delay-Minuten erfasst (51,5 % des Gesamt-Delays 2008).

Die Anpassung der Systeme der DFS an sich bewegende Gebiete ist mit hohem Aufwand verbunden, da man nicht auf definierte Gebiete (TRA) zurückgreifen kann. Bei den gegenwärtig festgelegten TRAs sind die Verfahren bei Aktivierung sowohl der Flugsicherung als auch den Luftraumnutzern bekannt. Die Sektor- und Streckenstruktur ist optimiert und durch Veröffentlichungen und Absprachen zwischen den Flugsicherungsdienstleistern festgelegt. Ad hoc Verfahren zum Verändern der Streckenführungen stehen nicht zur Verfügung. Die daraus resultierende Erhöhung der Komplexität führt zu einer Reduzierung der Kapazität, um das erforderliche Sicherheitsniveau zu erreichen. Eine flexible Reaktion auf die Aktivierung eines Kondensstreifenentstehungsgebiets ist daher mit den heutigen Methoden auf Grund der Dynamik der Gebiete und der kurzen Informationsvorläufe nur unter Inkaufnahme erheblicher Auswirkungen auf die Betriebsdurchführung (Kapazität) und damit auf die Luftraumnutzer möglich.

Im Luftraum ist die Aktivierung eines – egal ob 80x80 NM oder 130x130 NM – großen Luftraums zu den normalen Betriebszeiten einer Kontrollzentrale [z.B. Upper Area Control Centre (UAC) Karlsruhe], d.h. Ortszeit 04:30 Uhr bis 01:30 Uhr, ohne gravierende Auswirkungen auf die Luftfahrt nicht möglich. Dies soll konkret am Beispiel des Kontrollsektors Frankfurt (FFM) der DFS NL Upper Karlsruhe verdeutlicht werden. Dieser Sektor (s. Abbildung 34) entspricht in etwa der Größe 90x60 NM und liegt damit noch im unteren Bereich möglicher Dimensionierungen eines Kondensstreifen - Enstehungsgebiets. Der gesamte deutsche Luftraum ist in solche Sektoren aufgeteilt. In Bezug auf Verkehrsmenge und Komplexität ist der Frankfurt Sektor ein Beispiel für eine mittlere bis hohe Ausprägung dieser Merkmale. In diesem Bereich fliegen zu normalen Betriebszeiten bis zu 120 Luftfahrzeuge pro Stunde. Der Sektor ist in bis zu 4 vertikale Sektoren unterteilt. Davon entspricht der “FFM Mid Sektor“ in etwa den vertikalen Ausmaßen, die für ein Kondensstreifenentstehungsgebiet in Frage kommen. ***Abbildung 35***zeigt für einen Tag exemplarisch die konkret stattgefundenen Flüge (mit Anzahl für das jeweilige Streckensegment).

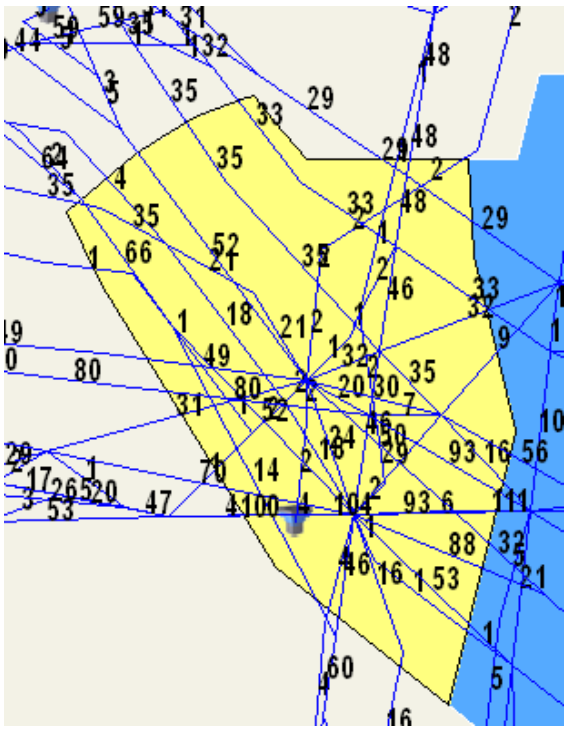


Abbildung 35: NL Flugbewegungen im Sektor Frankfurt (FFM) - Mid der DFS NL Upper Karlsruhe (FL 315 – FL 355). Gesamtzahl der Flüge am 21.04.2009: 570 Pro Stunde fliegen durch diesen Teilsektor bis zu 50 Luftfahrzeuge, die seitens der Flugsicherung mit den vorgeschriebenen Mindestabständen lateral bzw. vertikal voneinander gestaffelt werden müssen. Der für diesen Sektor zuständige Lotse arbeitet dann im Bereich der maximalen Sektorkapazität.

Bei einer Aktivierung eines Luftraums ("Kondensstreifen-TRA"), der nicht durchflogen werden soll, müsste durch die zuständigen Lotsen in den angrenzenden Sektoren dieses Mehr an Luftfahrzeugen unter großem Aufwand mittels Radarvektoren geführt werden. Da jedoch die lateral und vertikal angrenzenden Nachbarkontrollsektoren ein vergleichbares Verkehrsaufkommen zu bearbeiten haben, ist eine solche Luftraumaktivierung nicht möglich. In diesem Fall könnten nicht mehr alle Luftfahrzeuge wie beabsichtigt durch die Sektoren geführt werden. Flüge müssten erhebliche Verspätungen / Umwegstrecken in Kauf nehmen. Die Sicherheit des Luftverkehrs könnte sonst nicht ausreichend gewährleistet werden.

Eine Nutzung während der Nacht (zwischen 01:30 Uhr und 04:30 Uhr Ortszeit) wäre ggf. möglich, da sich zu diesem Zeitpunkt nur eine relativ geringe Anzahl von Luftfahrzeugen im Luftraum befindet.

Die DFS ist verpflichtet, den Personaleinsatz wirtschaftlich zu gestalten. Deshalb wird zu den Zeiten schwacher Nachfrage auch nur eine reduzierte Kapazität (Reduzierung des Personals) angeboten. Die untersuchten Umleitungen führten zu einer Steigerung der Komplexität und somit zu einem erhöhten Personalbedarf in der Nacht.

Bezüglich der Frage nach dem Anteil des Flugverkehrs, der solche TRA-Lufträume umfliegen könnte, ohne die Gesamtluftraumkapazität negativ zu beeinflussen, ist festzustellen, dass im Tagesbetrieb ein Umfliegen solcher Lufträume praktisch kaum durchführbar ist. In geringem Maße wäre es möglich, einzelne Luftfahrzeuge (insbesondere) vertikal von diesen Gebieten fernzuhalten. Da aber hierbei durch das Fliegen auf nicht optimal wirtschaftlichen Flugprofilen Kosten für die Luftfahrzeugbetreiber (Airlines) entstehen, ist für die Flugsicherung rechtlich verbindlich festzulegen, welche Luftfahrzeuge aufgrund welcher Kriterien auf die unwirtschaftlicheren Flugprofile umzuleiten sind.

In Bezug auf die Gesamtklimabilanz ist zu untersuchen, ob der erhöhte Kerosinverbrauch und die damit verbundenen CO_2Emmissionen in einem akzeptablen Verhältnis zu den positiven Kondensstreifeneffekten führen.

Die zweite an die DFS gerichtete Fragestellung bezieht sich auf die Betrachtung von Lufträumen, in denen die Entstehung von kühlenden Kondensstreifen vorhergesagt wird, und eine gezielte Hindurchführung des in der Nähe eines solchen Gebietes befindlichen Luftverkehrs wünschenswert wäre. Grundsätzlich kommen hierbei die gleichen Betrachtungsansätze wie bei den wärmenden Kondensstreifenentstehungsgebieten zum Tragen, was die Kapazitätsobergrenzen der einzelnen Kontrollsektoren betrifft. Auch hierbei ist das Hauptproblem, - wie im Fall von den zu meidenden wärmenden Kondensstreifenentstehungsgebieten -, dass die flexible Reaktion auf sich ändernde Gebiete nur unter erheblicher Reduzierung der angebotenen Kapazität erfolgen könnte. Es gibt unter den Beteiligten standardisierte Anbindungen zur Übergabe von Luftfahrzeugen, die sich im Streckenflug auf bestimmten Routen befinden. Ist eine Ad hoc Koordination erforderlich, haben die getroffenen Absprachen keine Gültigkeit mehr.

So, wie es für die DFS nicht möglich ist (zumindest zu den vorher genannten “Tageszeiten“ von 04:30 Uhr bis 01:30 Uhr) bestimmte Gebiete zu meiden, ist es umgekehrt auch nicht möglich, absichtlich Flieger in bestimmte Gebiete hinein zu zwingen. Der Koordinationsaufwand ist unverhältnismäßig hoch, die Kapazität des Luftraums wird nicht genutzt, bzw. dramatisch eingeschränkt.

An dieser Stelle muss auch noch einmal der bereits im Abschnitt 2 (“Umfang des Prüfauftrages“) aufgeführte Aspekt der Wirtschaftlichkeit ausdrücklich genannt werden: Wenn der Flugsicherungsdienstleister Luftfahrzeuge von der ursprünglich geplanten Strecke umleiten soll, muss dies durch entsprechende regulative Festlegungen seitens des BMVBS bestimmt werden. Dabei entstehen der Airline erhöhte Kosten, der Flugweg verlängert sich entsprechend und Verspätungen werden generiert. Gerade dieser letzte Aspekt hat auch aus Umweltsicht einen höheren Treibstoffverbrauch und damit auch erhöhte Schadstoffemissionen zur Folge. Die Auswirkungen auf Nachbarkontrollzentralen und Flughäfen sind zu berücksichtigen. Es ist eine Klimabilanz zu erstellen, die eine Abwägung zwischen den Kondensstreifen- und CO_2-Effekten berücksichtigt.

3.3.3.2.5 Fazit:

Eine Berücksichtigung von Kondensstreifenentstehungsgebieten in Form von Umfliegen bzw. gezieltem Einfliegen des Flugverkehrs ist während der normalen “Tages-Betriebszeiten“ der DFS-Kontrollzentralen (04:30 Uhr bis 01:30 Uhr Ortszeit) nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand und gravierenden negativen Auswirkungen für die Luftraumnutzer möglich.

Lediglich während einiger weniger Nachtstunden (zwischen 01:30 Uhr und 04:30 Uhr Ortszeit) erscheint die Berücksichtigung solcher Kondenstreifenentstehungsgebiete (theoretisch) operationell machbar, sofern die dafür dann erforderlichen Verfahren erarbeitet und der regulative Rahmen definiert werden können.

Ob jedoch nationale Maßnahmen, die nur in dieser verbleibenden kurzen Zeitspanne (1/8 des ganzen Tages) Anwendung finden können, einen bedeutsamen Beitrag für das Klima leisten, kann von der DFS nicht bewertet werden, zumal dann insbesondere auch die Aspekte der Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und Kosten zum Tragen kommen.

Die DFS ist prinzipiell bereit, nach Abschluss des Forschungsprojektes eine entsprechende Erprobung während dieser Nachtzeiten durchzuführen, sofern die regulativen Vorgaben entsprechend geändert werden und eine allgemeine Akzeptanz der unmittelbar betroffenen Operator (Airlines) vorhanden ist.

3.4 AP4: Konzeption von Messverfahren zur Messung von Feuchte und Kondensstreifenbildung im Flug

3.4.1 Existierende Feuchtemesssysteme

Im Dezember 2008 fand in Hohenkammer bei München ein Workshop zu Kondensstreifen sowie deren Vorhersage und Vermeidung statt, der von K. Gierens (DLR) organisiert wurde. Dabei war auch die Feuchtemessung im Rahmen von AMDAR ein Thema, und Herman Smit (FZ Jülich) wurde eingeladen, darüber vorzutragen. Sein Vortratgstitel lautete: *Hygrometers for use in the UT/LS that can be incorporated into the AMDAR system Or What might be a good humidity sensor for AMDAR*. Die folgenden Ausführungen sind im Wesentlichen diesem Vortrag entnommen.

Ein AMDAR Feuchtemeßgerät muß folgende Anforderungen erfüllen:

a) Kompakt, leicht, niedrige Kosten;
b) Robust;
c) Niedriger Wartungsbedarf;
d) Einfaches Lufteinlasssystem;
e) Genauigkeit über einen weiten Bereich von Wasserdampfkonzentrationen;
f) Langfriststabilität.

Der Punkt (e) bedarf einer zusätzlichen Erläuterung. Die Wasserdampfkonzentration variiert in der Troposphäre vom Boden bis an die Tropopause über einen Bereich von 3 bis 4 Größenordnungen. Diese macht es extrem schwierig, wenn nicht gar unmöglich, diesen Bereich mit einem einzigen Messgerät abzudecken.[2] Es wird deshalb sinnvoll sein, entweder zwei Feuchtemessgeräte in AMDAR zu integrieren, eines für die Gewinnung der Profile und eines für die Messung der Feuchte in Flughöhe. Bei Verwendung von Messgeräten, die auf dem Prinzip der Absorption von Strahlung durch Wasserdampf beruhen, könnte die technische Entwicklung auch dahingehen, dass für die verschiedenen Konzentrationsbereiche verschiedene Spektrallinien zur Verfügung stehen, z.B. eine schwächere für die untere und mittlere Troposphäre und eine starke (die auch bei geringer Wasserdampfkonzentration ein starkes Signal liefert) für die Tropopausenregion.

Bei der Auswahl eines geeigneten Messgeräts hat man nicht nur den Feuchtesensor selbst zu beachten, sondern auch das Lufteinlasssystem. Kritische Aspekte desselben sind:

a) Abtrennung von Tropfen und Eiskristallen aus dem Luftstrom;
b) Aufstauen von Partikeln im Einlass;
c) Verdampfung von Tropfen und Eiskristallen im Einlass;
d) Wandeffekte;
e) Starker Druck- und Temperaturanstieg im Einlass.

Ein bei Forschungsflugzeugen häufig eingesetzter Einlass ist das sog. Rosemount housing , welches einige cm aus der Flugzeughaut hervorragt und damit Luft aus dem freien Luftstrom beprobt. Dieser wird z.B. bei dem MOZAIC Projekt auf Verkehrsflugzeugen eingesetzt. Die oben erwähnte WVSS-II Sonde benutzt hingegen einen Einlass, der flach auf der Flugzeughaut aufliegt. Damit wird Luft aus der Strömungs-Grenzschicht des Flugzeuges beprobt, deren Eigenschaften sich von der frei strömenden Luft ziemlich (und möglicherweise nicht einfach korrigierbar) unterscheidet.

Jeder Einlass führt durch Konversion kinetischer in Wärmeenergie zu einer starken Erwärmung des Luftstroms, für die sorgfältig korrigiert werden muss (ob das für den flachen Einlass möglich ist, ist zu bezweifeln). Es gibt auch optische Messgeräte, die ohne Einlass auskommen (wo die Strahlungsabsorption durch Wasserdampf auf einer offenen Messstrecke gemessen wird). Bei diesen entfällt die Notwendigkeit der o.a. Korrektur; die Unterscheidung von Wasserdampf und Tropfen oder Eiskristallen ist möglich anhand von spektroskopischen Signaturen. Man kann damit also sogar in Wolken die Feuchte messen.

[2] "Hygrometry is a branch of applied physics in which the multitude of techniques is an indication of the complexity of the problem, and of the fact that no one solution will meet all requirements at all times and in all places." [H.P. Penman: *Humidity*. Chapman and Hall, London, 1955]

Es gibt eine ganze Reihe von Messprinzipen, siehe z.B. Rittersma (2002). Für Messungen in der Atmosphärenphysik oder Meteorologie werden z.Zt. folgende eingesetzt:

3.4.1.1 Humicap Sensor

Der Humicap Sensor wird bei MOZAIC eingesetzt. Es handelt sich dabei um einen kapazitiven Sensor, d.h., er besteht aus einem porösen hygroskopischen Material, welches bei Aufnahme von Wasserdampf seine dielektrischen Eigenschaften ändert. Diese können mit Hilfe eines elektrischen Schwingkreises gemessen und in relative Feuchte übersetzt werden. Solcherart Sensoren werden auch auf Radiosonden eingesetzt. Die Antwortzeiten kapazitiver Sensoren sind in der oberen Troposphäre von der Größenordnung 1 min. (Oben ist gesagt worden, dass Radiosonden in der oberen Troposphäre unverlässliche Daten liefern. Für den Einsatz solcher Geräte auf Flugzeugen sind die Probleme wesentlich geringer, da sie lange auf einer bestimmten Höhe fliegen, während Radiosonden ziemlich schnell aufsteigen.) Kapazitive Sensoren sind sehr empfindlich (das Signal ändert sich stark bei geringen Änderungen der Feuchte), aber sie müssen genau kalibriert werden, da ihr Signal i. Allg. nicht-linear von der relativen Feuchte abhängt. Für AMDAR gibt es die Möglichkeit zu automatischer Kalibration während Flugzeiten in der Stratosphäre (Smit et al., 2007).

3.4.1.2 Tunable diode laser (TDL)

Bei dem WVSS-II wird ein TDL eingesetzt, d.h. ein abstimmbarer Diodenlaser. Die Wasserdampfkonzentration wird also spektroskopisch gemessen (Spektrallinie bei 1.37 µm). Die Antwortzeit ist 2 s, jedoch liegt die Nachweisgrenze bei der gegenwärtig benutzten Wellenlänge bei ca. 70 ppmv; Die Konzentrationen in der oberen Troposphäre sind oft geringer. Die Nachweisgrenze lässt sich verringern bei Auswahl einer stärkeren Spektrallinie oder bei Verwendung einer längeren Absorptionszelle. Der bei UPS und an den Lufthansa-maschinen benutzte Einlass sollte durch einen Einlass von Rosemount (o.ä.) ersetzt werden.

3.4.1.3 Surface acoustic wave (SAW)

Wie die kapazitiven Sensoren, arbeiten auch SAW Sensoren mit einem Wasserdampf aufnehmenden Material, auf welchem sich Oberflächen-Wellen ausbreiten, deren Phasengeschwindigkeit von der Menge des absorbierten Wassers abhängt. Man kann SAW Sensoren auch als Taupunktmessgeräte einsetzen[3]. Dabei wird der Sensor soweit abgekühlt, bis sich durch Kondensation ein dünner Wasserfilm bildet; die sich schlagartig ändernde Resonanzfrequenz kann detektiert werden (Rittersma, 2002). Ob SAW auch entsprechend für den Frostpunkt einsetzbar sind, ist mir nicht bekannt. SAW haben Antwortzeiten von 1s, werden aber für Messungen in der Atmosphäre anscheinend nur von einer Gruppe der Universität Cambridge benutzt.

3.4.1.4 Lyman α

Bei dieser Methode werden Wassermoleküle mit UV Strahlung zerlegt, wobei angeregte OH Moleküle entstehen, die teilweise durch Fluoreszenz in ihren Grundzustand zurückgehen. Die Fluoreszenzstrahlung wird gemessen und ist ein Maß für die Konzentration des Wasserdampfs. Das Instrument kann sehr geringe Wasserdampfkonzentrationen (0.5 ppmv) mit einer Antwortzeit von 1 s nachweisen, und ist damit auch für Messungen in der unteren Stratosphäre geeignet.

[3] Der Taupunkt ist ein Maß für die relative Feuchte. Es ist die Temperatur auf die man die Luft bringen muss, damit die relative Feuchte 100% wird. Relative Feuchte und Taupunkt lassen sich mit Hilfe der bekannten Temperaturabhängigkeit des Dampfdrucks ineinander umrechen. Bei Temperaturen unter 0°C wird anstelle des Taupunktes oft der Frostpunkt verwendet, der in die entsprechende relative Feuchte bezüglich Eis umgerechnet werden kann.

Alle diese Geräte wiegen weniger als 10 kg, und kosten um die 20 k€. Bei der Genauigkeit sind alle Geräte im Bereich von 5-10% (für die relative Feuchte bzw. das Mischungsverhältnis). Langzeitstabilität ist nur für den kapazitiven Sensor bewiesen, der seit mehr als 14 Jahren im Rahmen von MOZAIC im Einsatz ist. Das gleiche gilt generell für Erfahrung im Dauereinsatz.

3.4.2 Test des Feuchtesensors auf der Falcon

Das DLR hat einen WVSS-II Sensor, Version 3 angeschafft, im Labor (beim DLR Flugbetrieb und in der Karlsruher AIDA-Wolkenkammer) getestet, kalibriert, und bei ersten Testflügen mit einem Rosemount-Einlass auf der Falcon erprobt. Die Kombination WVSS-II – Rosemount-Einlass wird intern als WARAN bezeichnet.

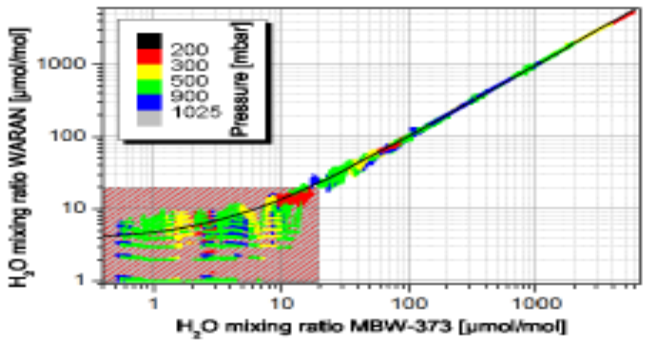


Abbildung 36 Kalibration des WVSS-II Gerätes des DLR. Die schwarze Linie zeigt einen linearen fit zwischen WARAN und einer Referenzmessung. Messungen im roten Bereich werden wegen zu großer Ungenauigkeit verworfen.

Gemeinsame Messflüge mit Falcon und HALO und Vergleich mit dem Wasserdampflidar WALES zeigen, dass der WARAN zuverlässig im Bereich 20 bis 40000 ppmv und bei 200 bis 1020 hPa misst. Er stellt damit einen geeigneten Kandidaten für Feuchtemeldungen im Rahmen von AMDAR dar.

3.5 AP 5: Begleitende Aktivitäten (alle Partner)

3.5.1 Bewertung von Realisierungsmöglichkeiten

Es konnte gezeigt werden, dass sich eine Flugplanung unter Berücksichtigung von Kondensstreifenentstehungsgebieten für einzelne Flüge operativ durchführen lässt. Die Kompatibilität zu den geltenden Richtlinien und Vorschriften kann eingehalten werden und ergibt sich direkt aus der Routenplanung im Rahmen von Lido/Flight. Für den einzelnen Flug ist also keine prinzipielle Einschränkung bei der Durchführbarkeit zu befürchten. Diese Aussage gilt für alle untersuchten Optimierungsszenarien.

Da die DLH die Realisierbarkeit nur für einzelne Flugrouten zeigen kann, nicht aber die operationellen Auswirkungen bezüglich der Luftraumkapazität über Deutschland, wurde Projekt intern entschieden, dass weite Teile des Arbeitspaketes von der DFS bearbeitet werden.

Von der DFS wurden die operationellen Auswirkungen bezüglich der Luftraumkapazität über Deutschland untersucht. Die DFS konnte hierbei zeigen, dass während der “normalen“ Tageszeiten der DFS-Kontrollzentralen von 04:30 Uhr bis 01:30 Uhr Ortszeit die generelle Berücksichtigung solcher Lufträume (z.B. Freihalten von Luftfahrzeugen) ohne gravierende Auswirkungen auf die Luftfahrt nicht möglich ist. Während einiger weniger Nachtstunden (zwischen 01:30 Uhr und 04:30 Uhr Ortszeit) erscheint die Berücksichtigung solcher Kondensstreifenentstehungs- gebiete lt. DFS theoretisch operationell machbar, sofern die

dafür dann erforderlichen Verfahren erarbeitet und der regulative Rahmen definiert werden können.

Eine Extrapolation dieser Aussagen auf die Gesamtheit des weltweiten Luftverkehrs ist allerdings nicht möglich und liegt auch außerhalb des vorliegenden Projektauftrags. Die hohe Flugverkehrsdichte über Mitteleuropa ist bei einer globalen Betrachtung allerdings der Ausnahmefall.

3.5.2 Präsentationen des Projektes auf Veranstaltungen

Name	Inst.	Thema	Veranstaltung	Ort, Termin
Hermann Mannstein	DLR	Umweltgerechte Flugroutenoptimierung	Klima2-Auftaktkonferenz	Berlin, 28.2.-1.3. 2007
Hermann Mannstein	DLR	Contrail cirrus coverage and radiative forcing derived from satellite data	ESA-ENVISAT Symposium	Montreux, 23.-27.April 2007
Hermann Mannstein	DLR	Contrails and Contrail Cirrus	EUMETSAT Met. Sat. Conference &15th Satellite Meteorology & Oceanography Conference of the AMS	Amsterdam, 24.-28. Sep. 2007
U.Burkhardt, B. Kärcher, H.Mannstein, U.Schumann	DLR	Climate impact of contrails and contrail cirrus	ACCRI science meeting	Virginia Beach, 25-27. Feb. 2008
Hermann Mannstein	DLR	Flugverkehr und Klima	Seminar Met. Inst.	Innsbruck, 2.April 2008
Hermann Mannstein	DLR	Umweltgerechte Flugroutenoptimierung	Klima2-Workshop	Köln, 28. Mai 2008
Hermann Mannstein	DLR	Umweltgerechte Flugroutenoptimierung	Klima2-Workshop TU Darmstadt	Darmstadt, 26. Juni 2008
Hermann Mannstein	DLR	Identification of Air Traffic Induced Cirrus Using a new Day- and Night-time MSG Cirrus Detection Algorithm	EUMETSAT Meteorological Satellite Conference	Darmstadt, 8.-12.Sept. 2008
Hermann Mannstein	DLR	Kann man Kondensstreifen und –Zirren vermeiden?	CATS - Workshop	Paterzell, 1.-2. Okt. 2008
Hermann Mannstein	DLR	When can we expect the science to be sufficiently robust to provide an acceptable basis for regulation? – contrail / cirrus	RAeS - Greener by design conference	London, 7. Oktober 2008
Klaus Gierens	DLR	Vortrag zu Kondensstreifen und deren Vermeidung	Workshop "Towards Sustainable Propulsion"	Bristol, 19. Nov. 2008
Klaus Gierens	DLR	Organisation des Workshops mit Beteiligung der UFO Partner	ECATS workshop on contrails, contrail cirrus, their forecasting and mitigation	Hohenkammer, 8-10.Dez. 2008

Stefanie Meilinger	LSY	Contrail Avoidance and Climate Impact Optimization using the LIDO Flight Planning Tool	ECATS workshop on contrails, contrail cirrus, their forecasting and mitigation	Hohenkammer, 8.-10.Dez. 2008
Hermann Mannstein	DLR	Automatic tracking of contrails within MSG data	QUANTIFY conference	Prag, 11. Februar. 2009
Hermann Mannstein	DLR	Umweltgerechte Flugroutenoptimierung	Klimazwei Abschlussworkshop	Berlin, 19. Mai 2009
Hermann Mannstein	DLR	Automatic tracking of contrails	ESA/EUMETSAT METOP RAO workshop	Barcelona, 21. Mai 2009
Hermann Mannstein	DLR	Smart aircraft routing – a possibility for mitigation?	TAC-2 Conference	Aachen/ Maastricht 25. Juni 2009
Ulrich Schumann	DLR	A parametric radiative forcing model for cirrus and contrail cirrus	ESA Atmospheric Science Conference, Special Publication SP-676 (6 pages),	Barcelona, Spain, 7-11 September 2009.
Hermann Mannstein	DLR	Smart aircraft routing – a possibility for mitigation?	AGU Fall Meeting	San Francisco, 18. Dezember .2009
Ulrich Schumann	DLR	A new contrail cirrus prediction tool and its application to estimate thze radiative forcing from aviation	AGU Fall Meeting	San Francisco, 17. Dezember.2009
Hermann Mannstein	DLR	Umweltgerechte Flugroutenoptimierung	DGLR Workshop: „Umweltfreundliches Fliegen“	Braunschweig, 18. Juni. 2010
Ulrich Schumann	DLR	Global contrail cirrus from 2006 air traffic, model CoCiP and observations	ACCRI Symposiumj	Atlanta, 23. Februar 2011
Hermann Mannstein	DLR	Smart aircraft routing – a possibility for mitigation	ACCRI Symposiumj	Atlanta, 24. Februar 2011

3.5.3 BMU-Bericht

2008 wurde das DLR vom BMU beauftragt, eine Studie zum Thema „Möglichkeiten zur Reduzierung des Klimabeitrages einzelner Flüge“ zu erstellen. Auf einem international besuchten Workshop am 4. 3. 2010 in Berlin wurde diese Studie unter dem Titel „Climate optimized routing of flights“ präsentiert. Die Veröffentlichung der Studie und einer gekürzten Fassung davon ist vorgesehen.

3.5.4 EU-FP7 Projekt REACT4C

Das EU-FP7 Forschungsprojekt REACT4C begann am 1. 1. 2010. Über die im Projekt „Umweltgerechte Flugroutenoptimierung“ betrachtete Klimawirkung von CO2 und

Kondensstreifen/Zirren hinausgehend soll in REACT4C (Reducing emissions from aviaotion by changing trajectories for the benefit of climate) auch die Klimawirkung der anderen relevanten Emissionen, also Stickoxide, Schwefeldioxid und Ruß mit ihrer Lebens- und Wirkungsdauer im Bereich von Wochen bis Monaten bei der Optimierung erfasst werden. Da die Lebens- und Wirkungsdauer dieser Emissionen weit über den von Wettervorhersagemodellen abgedeckten Bereich hinausgehen, werden in REACT4C aus der Klima-Chemiemodellierung abgeleitete verfahren angewandt. Ein weiterer Aspekt von REACT4C ist die Optimierung des Flugzeugentwurfs auf die gegebenenfalls veränderten Anforderungen.

4 Gewonnene Erkenntnisse

4.1 Anwendungspotenzial, quantitative Abschätzung der erreichbaren Beiträge zum Ziel der Fördermaßnahme

Dieses Vorhaben bezieht sich auf den Teilaspekt A: „Minderung der Treibhausgasemissionen“ des Förderprogramms „Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkung“ und bezieht sich mit seinem Ziel, die Klimarelevanz der Emissionen des Luftverkehrs mittel- und langfristig zu verringern, auf das Rahmenprogramm „Forschung für Nachhaltigkeit“ des BMBF.

Marquart et al. (2003) berechnen für das Gebiet Mitteleuropa einen mittleren Strahlungsantrieb für linienhafte Kondensstreifen von ca. 0.1 W/m^2. Dieser Wert gilt für den Flugverkehr von 1992. Für das Jahr 2005 ist, bei einer jährlichen Steigerung des Luftverkehrs um 5%, fast von einer Verdoppelung dieses Wertes auszugehen. Berücksichtigt man die aus alternden Kondensstreifen entstandenen Eiswolken mit einem Faktor 10 (Mannstein und Schumann 2005), so ergibt sich für das Jahr 2005 für Mitteleuropa ein mittlerer Strahlungsantrieb von 2 W/m^2. Neuere, noch unveröffentlichte Abschätzungen des Strahlungsantrieb durch Flugverkehr zeigen, dass der Strahlungsantrieb von Kondensstreifen und daraus entstehenden Zirren regional bis zu 3 mal so groß sein kann, wie der Strahlungsantrieb aufgrund von CO_2 Emissionen.

Legt man die bei Lee et al., (2009) veröffentlichten Zahlen zum Einfluss des Flugverkehrs auf das Klima zu Grunde, beträgt der CO_2 Einfluss 1.6% der gesamten vom Menschen verursachten Störung im Strahlungshaushalt, während alle bekannten Wirkungspfade zusammen 4.9% erreichen, d.h. die non-CO_2 Gase und vor allem die vom Flugverkehr verursachten Änderungen in der Bewölkung (Kondensstreifen und daraus entstehende Zirren) tragen einen bedeutenden Anteil zur Gesamtwirkung bei.

Die Bewertung, wie klimarelevant die verschiedenen vom Luftverkehr verursachten klimarelevanten Störungen des Strahlungshaushaltes im Vergleich zueinander sind, hängt allerdings stark von der gewählten Metrik ab. Die Wahl der geeigneten Metrik ist letztlich eine politische Entscheidung. Auf der UNO-Klimakonferenz in Cancun im Dezember 2010 wurde dazu das Ziel, die globale Erwärmung unter 2 Grad zu halten, vereinbart. Aus dieser Definition ergibt sich eine Metrik und ein damit verbundener Zeithorizont und somit eine eindeutige Wichtung zwischen den verschiedenen Komponenten der Klimawirkung des Flugverkehrs, die mit der in diesem Projekt gewählten Metrik kompatibel ist.

Die im Rahmen des Projektes gewonnen Erkenntnisse zeigen, dass eine Reduktion der Gesamtklimawirkung durch eine umweltgerechte Flugroutenoptimierung, d.h. durch die gezielte Berücksichtigung der Klimawirkung von Kondensstreifen erreicht werden kann. Es konnte über Europa sogar ein netto-kühlender Flugverkehr realisiert werden. Hier ist allerdings generell ist zu vermerken, dass die Validität der Ergebnisse stark von der Qualität der verwendeten Maßzahl für den Strahlungsantrieb abhängt. Hier sind weitere Forschungsaktivitäten nötig, um zu einer belastbaren quantitativen Aussage zu kommen.

4.2 Erfolgsaussichten und Umsetzungskonzepte

4.2.1 Potenzial für einen signifikanten Beitrag zu den nationalen Klimaschutzzielen

„Die nationale Klimaschutzpolitik steht im Kontext des Leitbilds einer nachhaltigen Entwicklung und der Agenda 21, denn es liegt auf der Hand, dass Handeln für den Schutz des globalen Klimas auf nationaler, regionaler und lokaler Ebene unbedingt erforderlich ist.

Der Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur muss auf höchstens 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau begrenzt werden, um inakzeptable Folgen und Risiken des Klimawandels zu vermeiden.“
(http://www.bmu.de/klimaschutz/nationale_klimapolitik/doc/5698.php)

Die im Rahmen des Projektes gewonnen Erkenntnisse zeigen, dass eine umweltgerechte Flugroutenoptimierung, prinzipiell einen Beitrag zu diesem nationalen Klimaschutzzielen leisten kann. Es konnte gezeigt werden, dass sich eine Flugplanung unter Berücksichtigung von Kondensstreifenentstehungsgebieten **für einzelne** Flüge operativ durchführen lässt. Die Kompatibilität zu den geltenden Richtlinien und Vorschriften kann eingehalten werden und ergibt sich direkt aus der Routenplanung im Rahmen von Lido/Flight. Für den einzelnen Flug ist also keine prinzipielle Einschränkung bei der Durchführbarkeit zu befürchten.

Eine generell Umsetzung für den gesamten Flugverkehr über Deutschland ist aufgrund der hohen Flugverkehrsdichte über Deutschland nur während einiger weniger Nachtstunden (zwischen 01:30 Uhr und 04:30 Uhr Ortszeit) operationell machbar, sofern die dafür dann erforderlichen Verfahren erarbeitet und der regulative Rahmen definiert werden können. Die hohe Flugverkehrsdichte über Mitteleuropa ist bei einer globalen Betrachtung allerdings der Ausnahmefall. Eine Aussage für die Gesamtheit des weltweiten Luftverkehrs kann daher nicht abgeleitet werden.

4.2.2 Wirtschaftlichkeit und Anwendungsbreite

Die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit von umweltgerechten Flugrouten war ein wesentlicher Bestandteil des vorgeschlagenen Projektes.

Aus wirtschaftlicher Sicht kann man sagen, dass es eine umweltoptimierte Flugroutenplanung nicht zum Nulltarif geben wird, da die umweltbedingten Flugroutenänderungen immer mit Umwegen im Vergleich zu den z. Zt. geplanten Flugwegen verbunden sind. Diese Umwege ziehen erhöhte Zeit- und Kerosinkosten (und in Zukunft auch erhöhte EU Emissionshandelskosten) sowie in der Regel erhöhte ATC-Kosten nach sich. Dabei entstehenden Mehrkosten pro Flug können dabei durchaus im unteren zweistelligen Prozentbereich liegen und erreichen damit durchaus die Größenordnung des operativen Gewinnes einer Airline. Die wirtschaftliche Machbarkeit hängt damit in hohem Maße von einem möglichen finanziellen Anreizsystem zur Minimierung der gesamten Klimawirkung ab.

Die Vermeidung kondensstreifen-trächtiger Gebiete beschränkt den zur Verfügung stehenden Luftraum und führt somit zu einer erhöhten Belastung für die Flugkontrolle. Für den deutschen Luftraum werden die Konsequenzen daraus im Projekt evaluiert. Eine Verallgemeinerung für andere – insbesondere weniger stark belastete – Lufträume lässt sich aus den Erkenntnissen allerdings nicht ableiten und war auch nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

4.2.3 Rückwirkung auf andere Nachhaltigkeitsfaktoren

Einem geringen Anstieg des Treibstoffbedarfs durch suboptimale Flugprofile und eventuelle Höhenänderungen steht eine positive Klimawirkung durch die Vermeidung zusätzlicher Zirren gegenüber. Aufgrund der veränderten Flugprofile ist darüber hinaus eine Verringerung des Einflusses auf die Chemie der Stratosphäre und das stratosphärische Ozon zu erwarten, da klimaoptimierte Flugrouten durchschnittlich tiefer liegen. Eine genaue quantitative Analyse der Rückwirkung auf andere Nachhaltigkeitsfaktoren lag allerdings außerhalb des Skopes dieser Studie.

5 Literatur

Eidhammer, T., P. DeMott und S. Kreidenweis, 2009: A comparison of heterogeneous ice nucleation parameterizations using a parcel model framework. JGS, Vol. 114

Etheridge et al., "Historical CO_2 record derived from a spline fit (20 year cutoff) of the Law Dome DE08 and DE08-2 ice cores", http://cdiac.ornl.gov/ftp/trends/co2/lawdome.smoothed, 1998a

EU FP6 Projektes QUANTIFY, Activity #7 (http://www.pa.op.dlr.de/ quantify/)

Fletcher, N. H., 1962: *The Physics of Raincloud*s. Cambridge University Press, 360 pp

Gierens, K., U. Schumann, M. Helten, H. Smit und A. Marenco, 1999: A distribution law for relative humidity in the upper troposphere and lower stratosphere derived from three years of MOZAIC measurements. Ann. Geophys., Vol. 17, pp 1218-1226

Gierens, K., und P. Spichtinger, 2000: On the distribution of ice-supersaturated regions in the upper troposphere and lowermost stratospher. Ann. Geophys., Vol. 18, pp 499-504

Hoyle, C., B. Luo und T. Peter, 2005:The origin of high ice crystal number densities in cirrus clouds. JAS, Vol. 62, pp 2568-2579

IPCC-AR4-WG1 (Contribution of Working Group 1to the Fourth Assessment Report of the International Panel on Climate Change), "Climate Change 2007 – The Physical Science Basis", Cambridge University Press, Cambridge, 2007

Joos, H., P. Spichtinger, U. Lohmann, J.-F. Gayet und A. Minkin, 2008: Orographic cirrus in the global climate model ECHAM5. JGR, Vol. 113, 13 pp

Joos, H., P. Spichtinger und U. Lohmann, 2009: Orographic cirrus in a future climate. ACP, Vol. 9, pp 7825-7845

Kärcher, B., J. Hendricks und U. Lohmann, 2006: Physically based parameterization of cirrus cloud formation for use in global atmospheric models. JGR, Vol 111

Keeling and Whorf, "Atmospheric CO_2 concentrations (ppmv) derived from in situ air samples collected at Mauna Loa Observatory, Hawaii", http://cdiac.ornl.gov/ftp/ndp001/maunaloa.co2, 2004

Mannstein, H., R. Meyer, und P. Wendling, 1999: Operational Detection of Contrails from NOAA-AVHRR-Data. International Journal of Remote Sensing, Vol 20, 8, pp 1641-1660,

Mannstein, Hermann, Brömser, Andreas und Bugliaro, Luca, 2010: Ground-based observations for the validation of contrails and cirrus detection in satellite imagery. Atmospheric Measurement Techniques, 3, Seiten 655-669. DOI: 10.5194/amt-3-655-2010.

Marland et al., 2007, "CO_2 Emissions from Fossil-Fuel Burning, Cement Manufacture, and Gas Flaring: 1751-2004", http://cdiac.ornl.gov/ftp/ndp030/global.1751_2004.ems, 200

MOZAIC Projekt: http://mozaic.aero.obs-mip.fr/web/

Murphy, D.M and T. Koop, "Review of the vapour pressures of ice and supercooled water from atmospheric applications", Q.J.R. Meteorol.Soc.,2005, 131, 1539-1565

Phillips,V., P. DeMott und C. Andronache, 2008: An Empirical Parameterization of Heterogenous Ice Nucleation for Multiple Chemical Species of Aerosol. JAS,Vol. 65, pp 2757-2783

Sausen, R. and U. Schumann, 2000: Estimates of the climate response to aircraft CO_2 and NO_x emissions scenarios. *Climatic Change 44*, 27-58.

Schumann, U., B. Mayer, K. Graf, H. Mannstein und R. Meerkötter 2009, A parametric radiative forcing model for cirrus and contrail cirrus, paper presented at ESA Atmospheric Science Conference, Special Publication SP-676 (6 pages), Barcelona, Spain, 7-11 September 2009.), http://elib.dlr.de/63058/1/s4_4schu.pdf

Spichtinger, P., K. Gierens, U. Leiterer und Horst Dier, 2003: Ice Supersaturation in the tropopause region over Lindenberg, Germany. Meteorologische Zeitschrift, Vol. 12, No.3, pp 143-156

Sussmann, R., und K. Gierens, 2001: Differences in early contrail evolution of two-engine versus four-engine aircraft: Lidar measurements and numerical simulations. JGR., Vol. 106, pp 4899-4911