Flugverkehr und Klimaschutz

Ein Überblick über die Erfassung und Regulierung der Klimawirkungen des Flugverkehrs

Der internationale Flugverkehr war bisher von Klimaschutzverpflichtungen ausgenommen. Dies hängt mit zwei methodischen Schwierigkeiten zusammen: Zum einen ist die Abschätzung gewisser klimarelevanter Auswirkungen des Flugverkehrs nach wie vor mit großen Unsicherheiten verbunden. Zum anderen ist es schwierig, die Emissionen internationaler Flüge einzelnen Ländern zuzuordnen. Mit der Einbettung in ihr Emissionshandelssystem zeigt die EU einen Weg auf, um den internationalen Flugverkehr in Klimaschutzzielen zu berücksichtigen.

Andreas Marc Fischer, Robert Sausen, Dominik Brunner,
Johannes Staehelin, Ulrich Schumann

Aviation and Climate Protection

GAIA 18/1 (2009): 32 – 40

Abstract

International air traffic is not yet embedded in international frameworks to reduce anthropogenic greenhouse gas emissions, apart from the EU emission trading system. This paper reviews the state of knowledge on the climate effects due to aviation. Recent findings reveal a much smaller radiative forcing of line-shaped contrails than previously estimated. The greatest uncertainties regarding aviation's climate effects revolve around changes in cirrus cloud properties. The paper addresses issues on how to include aviation in international frameworks on climate protection. Today's proposed methods to cover non-CO₂ effects from air traffic (Radiative Forcing Index and Emission Weighting Factor) are shown to include significant shortcomings that prohibit their application in policy relevant measures. More elaborate techniques are under development. Then, different approaches are presented to exemplify how emissions from international aviation can be allocated to national territories. For Switzerland an estimate based on the residence approach is explained in more detail. Finally, the paper elucidates the measures taken by the European Union to include the aviation sector into its emission trading scheme.

Keywords

air traffic growth, aircraft emissions, aviation, climate impact, emission trading scheme, Emission Weighting Factor, Radiative Forcing Index

Seit den ersten Flügen Otto Lilienthals im Jahr 1891 und der Erfindung des Motorflugzeugs durch Gustav Weißkopf (1901) sowie Wilbur und Orville Wright (1903) hat sich der Flugverkehr derart entwickelt, dass er aus dem heutigen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Leben nicht mehr wegzudenken ist. Kaum ein Wirtschaftszweig existiert, der nicht in irgendeiner Weise mit dem Flugverkehr in Verbindung steht und somit von den Errungenschaften der damaligen Pioniere profitiert hat.

Trotz gelegentlicher politisch und wirtschaftlich bedingter Rückschläge (zum Beispiel der Ölkrise und der Golfkriege) ist die Luftfahrt über die letzten Jahrzehnte kontinuierlich gewachsen (Abbildung 1). Über den Zeitraum von 2002 bis 2007 lag die gemittelte jährliche Wachstumsrate bei 5,8 Prozent. Zwar weisen die Daten und Prognosen der Internationalen Zivilluftfahrtbehörde (International Civil Aviation Organization, ICAO) aufgrund der momentanen globalen Wirtschaftskrise ein deutlich geringeres Verkehrswachstum für die Jahre 2008 und 2009 aus. Bereits für 2010 wird jedoch erwartet, dass der Flugverkehr auf den Wachstumspfad von 2002 bis 2007 zurückkehrt (ICAO 2008). In der Vergangenheit hat sich gezeigt, dass das Wachstum des Flugverkehrs eng mit dem Wachstum des Bruttoinlandsprodukts korreliert; dabei wächst der Flugverkehr etwa doppelt so schnell wie das Bruttoinlandsprodukt (Abbildung 2). Angetrieben durch das prognostizierte langfristige globale Wirtschaftswachstum, insbesondere durch die schnellen Veränderungen im asiatisch-pazifischen Raum (vor allem in China und Indien), soll der weltweite Flugverkehr gemäß Prognosen der ICAO bis 2025 (ICAO 2007) auf lange Sicht weiter anwachsen.

Kontakt: Dr. Andreas Marc Fischer | ETH Zürich | Institut für Atmosphäre und Klima | Universitätstr. 16 | 8092 Zürich | Schweiz | Tel.: +41 44 6327975 | E-Mail: andreas.fischer@env.ethz.ch

Prof. Dr. Robert Sausen | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) | Institut für Physik der Atmosphäre | Oberpfaffenhofen | Deutschland | E-Mail: robert.sausen@dlr.de

Dr. Dominik Brunner | Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa) | Dübendorf | Schweiz | E-Mail: dominik.brunner@empa.ch

Prof. Dr. Johannes Staehelin | ETH Zürich | Institut für Atmosphäre und Klima | Zürich | Schweiz | E-Mail: johannes.staehelin@env.ethz.ch

Prof. Dr. Ulrich Schumann | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) | Institut für Physik der Atmosphäre | Oberpfaffenhofen | Deutschland | E-Mail: ulrich.schumann@dlr.de

ABBILDUNG 1: Entwicklung des weltweiten Flugverkehrs, gemessen in Milliarden Tonnenkilometer. Dargestellt ist die Summe der Transportleistungen aus Passagier-, Fracht- und Postverkehr. Zusätzlich wurden die durchschnittlichen jährlichen Wachstumsraten in einzelnen Zeitabschnitten bestimmt. Datenquelle: ICAO (verschiedene Jahre).

Die technologischen und operationellen Entwicklungen beim Luftverkehr führten dazu, dass in der Vergangenheit der Treibstoffverbrauch und damit die Kohlendioxid-(CO₂)-Emissionen langsamer anstiegen als das Transportvolumen. Diese Verbesserungen reichten aber nicht aus, um das Wachstum der Emissionen auf null zu reduzieren. Nach Angaben der Internationalen Energie-Agentur (IEA 2007, S. II.11) stieg der Treibstoffverbrauch des Flugverkehrs von 1990 bis 2005 um den Faktor 1,34. Für die Zukunft wird ein Wachstum von zwei bis vier Prozent pro Jahr vorausgesagt, womit der Verbrauch im Jahr 2020 um einen Faktor 1,7 bis 2,4 höher liegen dürfte als 1990. Diese erwartete Entwicklung steht im Gegensatz zu den Bestrebungen der internationalen Staatengemeinschaft zur Lösung des Klimaproblems: Die EU fordert, die globalen Treibhausgasemissionen bis 2020 zu stabilisieren und bis 2050 auf die Hälfte des Stands von 1990 zu reduzieren (Council of the European Union 2007). Auch die G8-Staaten bekräftigten bei ihrem Gipfeltreffen 2008 in Japan ihr Ziel, bis Mitte dieses Jahrhunderts die Treibhausgasemissionen global um 50 Prozent zu senken, jedoch ohne Nennung eines Referenzjahrs (G8 Hokkaido Toyako Summit 2008). Der EU-Raum will seine Emissionen an Treibhausgasen bis 2020 um 20 Prozent gegenüber 1990 verringern; schließen sich andere entwickelte Staaten an, sogar um 30 Prozent (Council of the European Union 2007).

Trotz des prognostizierten Wachstums seiner CO₂-Emissionen wurde der internationale Flugverkehr bisher nicht in internationale Klimaschutzziele eingebunden. Entsprechend wurden seine Klimabeiträge auch nicht zur Gesamtsumme der jährlich zu berichtenden Treibhausgasemissionen gemäß Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (*United Nations Framework Convention on Climate Change*, UNFCCC) addiert. Für einen Einbezug des Flugverkehrs in internationale Klimaschutzmaßnahmen ergeben sich grundsätzlich zwei Umsetzungsprobleme:

1. Der Flugverkehr nimmt mit seiner Klimawirkung eine Sonderrolle ein, da neben dem langlebigen Treibhausgas CO₂ weitere Beiträge zum Klimawandel betrachtet werden müssen (beispielsweise flugverkehrsbedingte Bewölkung), die

nicht im Rahmen der UNFCCC berücksichtigt werden. Die Frage stellt sich also, ob und allenfalls auf welche Weise diese zusätzlichen Größen in internationale Regelwerke Eingang finden sollten. Ob die Nicht-CO₂-Effekte in der gemäß UNFCCC für Treibhausgase anzuwendenden Metrik – der CO₂-Äquivalente auf der Basis des Treibhauspotenzials (*Global Warming Potential*, GWP) – bemessen werden können oder ob sich pragmatischere Lösungen für die Politik ergeben, ist Teil dieser Fragestellung.

2. Es ist nicht offensichtlich, wie man Emissionen und andere Klimabeiträge über internationalem Territorium (beispielsweise den Ozeanen) erfassen und einzelnen Staaten zuordnen sollte. Letzteres ist aber nötig, um griffige Klimaschutzmaßnahmen treffen beziehungsweise überprüfen zu können.

Der erste Teil dieser Arbeit fasst den derzeitigen Wissensstand zur Klimarelevanz des Flugverkehrs zusammen. Neben der Bemessung der flugverkehrsbedingten Klimabelastungen erläutert der zweite Teil Methoden zur länderspezifischen Erfassung von Flugemissionen sowie Maßnahmen zur Einbeziehung des Flugverkehrs in den Klimaschutz. Unser Beitrag bezieht sich auf die naturwissenschaftlichen Grundlagen eines politisch aktuellen Problems.

Klimarelevanz des Flugverkehrs

Bei jeder Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehen die Treibhausgase Kohlendioxid (CO₂) und Wasserdampf (H₂O). Daneben werden, je nach Vollständigkeit der Verbrennung und Betriebsbedingungen, weitere Stoffe gebildet. Bei der Verbrennung von Kerosin in Flugzeugtriebwerken sind dies aufgrund der hohen Temperaturen und Drücke in der Brennkammer vor allem Stickoxide (NO_x), aber auch Schwefeloxide (abhängig vom Schwefelgehalt des Treibstoffs) und Rußpartikel. Dagegen werden infolge der (im Gegensatz zu Straßenfahrzeugmotoren) effizienten

ABBILDUNG 2: Vergleich des weltweiten jährlichen Flugverkehrswachstums (basierend auf den Daten von Abbildung 1) mit dem weltweiten jährlichen Wirtschaftswachstum (Bruttoinlandsprodukt, BIP). Das jährliche BIP jedes Landes wird zu Marktpreisen in konstanter lokaler Währung berechnet. Der globale Wert wird über den Dollarkurs im Bezugsjahr 2000 bestimmt.

Datenquelle: Weltbank: <http://ddp-ext.worldbank.org/ext/DDPQQ/member.do?method=getMembers&userid=1&queryId=135> (abgerufen 19.02.2009).

und gleichmäßigen Verbrennung nur geringe Mengen an Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffen ausgestoßen. Zusätzlich zu diesen direkten Emissionen bilden sich im Abgasstrahl von Flugzeugen Kondensstreifen, aus denen sich unter geeigneten meteorologischen Bedingungen großflächige Zirren (Eiswolken) entwickeln, die einerseits einen Teil der Sonnenstrahlung reflektieren und andererseits die Wärmestrahlung der Erde zurückhalten. Im Mittel tragen diese zusätzlichen Wolken vermutlich zur Erwärmung an der Erdoberfläche bei.

Der größte Teil der Emissionen erfolgt auf Reiseflughöhe, die beim heutigen Flugverkehr neun bis zwölf Kilometer über dem Meeresspiegel liegt. Dieser Bereich ist in mittleren und hohen Breiten nahe der Tropopause, welche die Troposphäre von der darüberliegenden Stratosphäre trennt. Weil die Luft in dieser Höhe im Vergleich zum Erdboden besonders kalt und damit die Temperaturdifferenz zum Erdboden besonders groß ist, können hier im langwelligen Bereich strahlungsaktive Substanzen das Klima stärker beeinflussen als in anderen Höhen.

Der Strahlungsantrieb (englisch *radiative forcing*), welcher in der Einheit Watt pro Quadratmeter (W/m^2) angegeben wird, beschreibt die Änderung der Energiebilanz des Systems Erde – Atmosphäre aufgrund einer Störung der atmosphärischen Zusammensetzung. Positive Werte führen zu einer Erwärmung an der Erdoberfläche, negative Werte zur Abkühlung. Die Änderung der Konzentration einer Substanz (Treibhausgase, Aerosole) in der Atmosphäre oder die Änderung von Wolken hängt nicht nur von der Menge der Emissionen beziehungsweise den Bildungsbedingungen ab, sondern auch von der Lebensdauer der Substanz beziehungsweise der Wolken in der Atmosphäre. Daher wird der Strahlungsantrieb als rückblickendes, kumulatives Maß für die Wirksamkeit der gesamten Emissionen von der Vergangenheit (ab einem gewählten Zeitpunkt, in der Regel vor Beginn der Industrialisierung) bis zu einem Referenzjahr (beispielsweise der Gegenwart) bestimmt. Mit diesem Maß lässt sich erfassen, in welchem Umfang der Flugverkehr bisher zur Klimaänderung beigetragen hat. Konsistente Studien über die Klimawirksamkeit des Flugverkehrs liegen bislang nur bis zum Jahr 2000 vor, worauf wir uns auch in diesem Artikel beziehen. Seitdem haben der Flugverkehr und seine Emissionen aber deutlich zugenommen (mehr als 35 Prozent beim Transportvolumen, Abbildung 1).

Verschiedene internationale Studien haben die Auswirkungen des globalen Flugverkehrs auf das Klima beschrieben. Der *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Special Report Aviation and the Global Atmosphere* (IPCC 1999) ist eine umfassende Bestandsaufnahme des Wissens. Diesem Bericht folgten im Jahr 2001 eine Beurteilung der Europäischen Kommission (Schumann und Ström 2001) und das EU-Projekt *TRADEOFF* (Sausen et al. 2005), dessen Ergebnisse auch in den jüngsten (vierten) Sachstandsbericht des IPCC (IPCC 2007a, b) eingeflossen sind. Im Folgenden erläutern wir den gegenwärtigen Wissensstand und vergleichen die neuesten Ergebnisse mit denen früherer Studien.

Die unterschiedlichen Beiträge des Flugverkehrs zum Strahlungsantrieb wurden erstmals umfassend in IPCC (1999) für das

Jahr 1992 abgeschätzt (hellgrüne Balken in Abbildung 3) und für das Jahr 2015 prognostiziert. In Sausen et al. (2005) wurden daraus Werte für das Jahr 2000 interpoliert (Summe aus weißen und hellgrünen Balken); diese Werte stellen somit das Resultat dar, das sich auf Basis des Wissensstandes von 1998 für das Jahr 2000 ergibt. Zudem wurden in Sausen et al. (2005) neuere Resultate aus umfassenden Modellstudien und Analysen von Satellitenmessungen zusammengefasst, die für das Jahr 2000 neu berechnet wurden (dunkelgrüne Balken in Abbildung 3).

Die wichtigsten quantifizierbaren Einzelbeiträge stammen von CO_2 , Ozon (O_3), Methan (CH_4) und Kondensstreifen. Unsicherheiten der abgeschätzten Einzelbeiträge wurden in IPCC (1999) mit Hilfe eines statistischen Maßes, des sogenannten Zweidrittel-Konfidenzintervalls, quantifiziert (schwarze Linien in Abbildung 3), das heißt, der tatsächliche Wert liegt mit einer Wahrscheinlichkeit von 67 Prozent innerhalb dieses Bereichs. Die größten quantifizierten statistischen Unsicherheiten waren bei Kondensstreifen zu finden. Mit noch größeren Unsicherheiten ist der Beitrag flugverkehrsbedingter Zirren behaftet, so dass anstelle eines Konfidenzintervalls nur der Streubereich bisheriger Studien angegeben werden kann und dieser Beitrag nicht in der Berechnung des gesamten Strahlungsantriebs eingeschlossen wurde. Die Attribute unterhalb der Abbildung beschreiben auf einer Skala von „gut“, „mäßig“ und „schlecht“ die subjektive Einschätzung der Autoren über das wissenschaftliche Verständnis der jeweiligen zugrundeliegenden atmosphärischen Prozesse.

Der gesamte Strahlungsantrieb (ohne Zirren) für das Jahr 2000 beträgt in Sausen et al. (2005) etwa gleich viel wie in IPCC (1999) für das Jahr 1992, ist aber tiefer als der interpolierte Wert für 2000.

Kohlendioxid

Die CO_2 -Emissionen des weltweiten Flugverkehrs betrugen im Jahr 2000 etwa 480 Millionen Tonnen CO_2 , was etwa zwei Prozent aller anthropogenen CO_2 -Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe und der Zementproduktion entspricht (Barker et al. 2007). Betrachtet man nur die Emissionen aus dem Transportsektor, liegt der Anteil bei ungefähr 13 Prozent. CO_2 hat eine außerordentlich lange atmosphärische Aufenthaltszeit (dabei verschwindet ein emittierter Puls mit einer ganzen Reihe von Zeitskalen, von wenigen Jahren bis Jahrtausenden, aus dem System) und verteilt sich dementsprechend gleichmäßig in der Atmosphäre. CO_2 aus dem Flugverkehr wirkt nicht anders auf das Klima als CO_2 aus anderen Quellen. Da die Emissionen direkt proportional zum weltweiten Kerosinverbrauch sind und diese Zahlen gut dokumentiert sind, ist der wissenschaftliche Kenntnisstand bei CO_2 weit besser als bei den anderen Beiträgen. Der Strahlungsantrieb für 2000 weist in Sausen et al. (2005) beinahe denselben Betrag auf wie in der Interpolation aus IPCC (1999).

Ozon und Methan (durch Stickoxidemissionen)

In der Vergangenheit sind die Stickoxidemissionen des Flugverkehrs um etwa einen Prozentpunkt pro Jahr stärker angestiegen als der Gesamttreibstoffverbrauch (IPCC 1999). Dies ist auf die

ABBILDUNG 3: Neu berechneter Strahlungsantrieb des Flugverkehrs für das Jahr 2000 (dunkelgrüne Säulen; die Werte basieren im Wesentlichen auf Ergebnissen aus dem EU-Projekt TRADEOFF). Zum Vergleich Werte für die Jahre 1992 (hellgrüne Säulen) und interpolierte Werte für 2000 (weiße Säulen mit schwarzem Rand; die lineare Interpolation basiert auf Ergebnissen für 1992 und 2015 aus IPCC 1999). Die schwarzen Linien stellen Zweidrittel-Konfidenzintervalle dar. Für Zirren werden nur die Werte dreier bisheriger Studien angegeben (hellgrün: IPCC 1999; schwarz: Minnis et al. 2004; dunkelgrün: Stordal et al. 2005); da die zugrundeliegenden Arbeiten nur auf Korrelationsanalysen beruhen und keine eindeutige Kausalkette besteht, sind diese Werte mit großer Unsicherheit behaftet. Die dunkelgrün gestrichelte Linie stellt die Spannweite vorhandener Schätzungen dar. Quelle: Sausen et al. (2005, S. 556).

immer höhere Effizienz der Triebwerke durch höhere Betriebsdrücke und -temperaturen zurückzuführen. Für die Periode von 2002 bis 2025 nimmt die Luftfahrtindustrie an, dass der Stickoxidausstoß deutlich geringer (um den Faktor 1,6) ansteigen wird als der Treibstoffverbrauch (Faktor 2,1), was die technischen Maßnahmen zur Stickoxidreduktion etwa durch fortschrittliche Brennkammerkonzepte widerspiegelt (Eyers et al. 2004).

Da Stickoxide als Katalysator die photochemische Bildung troposphärischen Ozons ermöglichen, führen sie zu einer Erhöhung der Ozonkonzentration in der Troposphäre und untersten Stratosphäre. In dieser Höhe wirkt Ozon als starkes Treibhausgas. Die höhere Ozonkonzentration führt zu einem Konzentrationsanstieg des Hydroxylradikals ($\bullet\text{OH}$), des wichtigsten Reinigungsmittels der Atmosphäre, und damit zu einem vermehrten Abbau des bedeutsamen Treibhausgases Methan. Die positiven und negativen Strahlungsantriebe durch die Ozonerhöhung beziehungsweise die Methanreduktion kompensieren sich auf globaler Skala zu einem gewissen Grad. Regional konzentriert sich der positive Antrieb durch zusätzliches Ozon aber auf die nördlichen Außertropen, wo der überwiegende Teil des Flugverkehrs stattfindet, während sich die Wirkung des Methans – und auch dessen Reduktion – wegen der langen Lebensdauer (etwa neun Jahre) relativ gleichmäßig über den Globus verteilt (ähnlich wie bei CO₂). Neuere Modellstudien deuten sowohl bei Ozon als auch bei Methan auf einen weniger starken Stickoxideinfluss hin als in IPCC (1999) angegeben. Die besten Schätzungen aus Sausen et al. (2005) liegen jedoch noch innerhalb der Konfidenzintervalle von IPCC (1999). Eine Abnahme von Methan hat eine langfristige sekundäre Reduktion von Ozon zur Folge¹, was den kurzfristigen Ozonanstieg infolge von Stickoxiden geringfügig reduziert (zum Beispiel Grewe und Stenke 2008).

Direkte Effekte von Wasserdampf

Wasserdampf ist das wichtigste natürliche Treibhausgas. Emissionen durch den heutigen Flugverkehr tragen jedoch nur in verschwindend kleinem Ausmaß zum Wasserhaushalt der Atmosphäre bei. Obwohl ein erheblicher Anteil der Emissionen in der trockenen untersten Stratosphäre erfolgt, ist die Verweildauer dort wegen Luftmassenaustauschs mit der Troposphäre zu kurz, um einen nennenswerten Beitrag zum Wassergehalt zu leisten. Aus diesem Grund ist der Strahlungsantrieb von Wasser aus dem Flugverkehr zwar positiv, jedoch im Betrag nur sehr gering (siehe Abbildung 3). Einzig eine Flotte kommerzieller Überschallflugzeuge könnte die Wasserdampfkonzentration weiter oben in der Stratosphäre wegen der dort längeren Lebensdauer nennenswert erhöhen und den Strahlungsantrieb damit deutlich verstärken (Grewe und Stenke 2008).

Direkte Effekte von Sulfat- und Rußpartikeln (Aerosolen)

Aerosolemissionen aus dem Flugverkehr sind im Vergleich zu denen aus anderen Quellen an der Erdoberfläche klein. Die direkten Strahlungsantriebe von Sulfataerosolen, die primär solare Strahlung streuen, und Rußpartikeln, die primär solare Strahlung absorbieren, sind daher relativ gesehen unbedeutend (siehe Abbildung 3), haben unterschiedliche Vorzeichen und ungefähr den gleichen Betrag, wodurch sie einander nahezu aufheben.

Kondensstreifen

Kondensstreifen, die für einige Zeit (Sekunden bis Stunden, je nach Wassergehalt der Umgebung) als linienförmige Wolken erkennbar sind, werden durch die Kondensation von Wasserdampf aus dem Flugzeug induziert. Der Wasserdampf kondensiert dabei auf Aerosolpartikeln im Abgasstrahl (beispielsweise auf Rußpartikeln oder H₂SO₄/H₂O-Partikeln) und in der eingemischten Umgebungsluft, die entsprechend als Kondensationskeime bezeichnet werden. Dadurch werden kleine Wassertropfen gebildet, die anschließend durch weitere Wasseraufnahme wachsen,

¹ Methan ist eines der Gase, die für den katalytischen Ozonaufbau gebraucht werden. Mit weniger Methan reduziert sich die Ozonproduktionsrate.

zumeist rasch gefrieren und sich als Eiskristalle weiterentwickeln können (Schumann 2005). Die Eigenschaften der Kondensstreifen hängen von den Eigenschaften der Partikel in der Umgebung und in den Abgasen sowie von den vorherrschenden atmosphärischen Bedingungen ab. Da die obere Troposphäre hinreichend hohe Konzentrationen an Kondensationskeimen aufweist, sind die limitierenden Faktoren für die Kondensstreifenbildung eine hinreichend tiefe Temperatur und eine genügend hohe Luftfeuchtigkeit. Der Strahlungsantrieb von Kondensstreifen hängt von deren optischer Dicke² und vom Bedeckungsgrad des Himmels mit Kondensstreifen ab. Bisherige Abschätzungen dazu sind mit großen Unsicherheiten verbunden. Zur Berechnung müssen die atmosphärischen Bedingungen und die Flugverkehrsmengen entlang der diversen Flugrouten bekannt sein. Bisher wurde die Kondensstreifenbedeckung über einem räumlich begrenzten Gebiet (wie Europa) geschätzt. Diese Schätzwerte dienten dann der Kalibrierung eines Kondensstreifenmoduls in einem globalen Klimamodell, das die Berechnung der globalen Bedeckung und des damit verbundenen Strahlungsantriebs ermöglichen sollte (zum Beispiel Marquart et al. 2003).

Aufgrund neuer Berechnungen wird heute der Strahlungsantrieb von Kondensstreifen gegenüber der Interpolation aus IPCC (1999) um einen Faktor drei bis vier kleiner geschätzt. Die neuen Werte basieren zum einen auf einer Simulation mit einem Klimamodell, das in der Lage ist, die optische Dicke von Kondensstreifen zu berechnen (Marquart et al. 2003), zum anderen auf einer neuen Analyse von Satellitendaten (Meyer et al. 2002), die zeigt, dass die mittlere optische Dicke linienförmiger Kondensstreifen über Europa etwa 0,1 beträgt und damit dreimal kleiner ist als in IPCC (1999) angenommen. Zudem werden wegen der fortschreitenden globalen Erwärmung künftig bei gleichem Verkehr weniger Kondensstreifen entstehen (Marquart et al. 2003).

Zirren

Aus den dünnen Kondensstreifen können sich in eisübersättigter Luft großflächige Zirren bilden, die für Stunden in der Atmosphäre verbleiben. Nach gewisser Zeit können flugverkehrsbedingte Zirren nicht mehr von natürlichen Zirren unterschieden werden. Neuere Modellstudien deuten darauf hin, dass zudem Rußpartikel aus dem Flugverkehr die Beschaffenheit von Zirruswolken generell modifizieren könnten, sofern sie als effiziente Eiskeime wirken (Hendricks et al. 2005). Basierend auf der sta-

tistischen Analyse von Satellitendaten der Jahre 1984 bis 1999 konnte in Flugverkehrsgebieten ein Anstieg der Bedeckung des Himmels durch Zirren von bis zwei Prozent pro Dekade festgestellt werden (Zerefos et al. 2003, Stordal et al. 2005). Mannstein und Schumann (2005) vermuteten, dass die Bedeckung durch flugverkehrsbedingte Zirren in Zentraleuropa möglicherweise zehnmal so groß ist wie diejenige durch Kondensstreifen; in einem Korrigendum wiesen dieselben Autoren (2007) jedoch darauf hin, dass es sich bei diesem Ergebnis um ein statistisches Artefakt handeln könnte (zufällige räumliche Korrelation größerer Flugverkehrsaktivitäten und häufigerer natürlicher Zirren).

Bei der Bestimmung des Strahlungsantriebs der Zirren sind neben diesen Unsicherheiten und den im Abschnitt über Kondensstreifen beschriebenen Problemen weitere Faktoren zu berücksichtigen. So tragen Winde und deren Scherung entlang der Flugrouten zur Ausbreitung der Kondensstreifen zu Zirren bei.

Basierend auf regionalen Trendabschätzungen für die hohe Bewölkung und ihrer Korrelation mit Flugverkehrsdaten schätzten Stordal et al. (2005) mittels einer räumlichen und zeitlichen Extrapolation (zeitlich, um die zeitliche Entwicklung der Flugverkehrsmengen abzudecken) den globalen Strahlungsantrieb für Zirren ab (dunkelgrüne Linie in Abbildung 3). Dies ergibt einen Beitrag von 30 Milliwatt pro Quadratmeter mit einem großen Unsicherheitsbereich von zehn bis 80 Milliwatt pro Quadratmeter (Stordal et al. 2005). Wie bereits in früheren Studien (zum Beispiel Minnis et al. 2004) wurde auch diese Schätzung wegen der methodisch bedingten großen Unsicherheiten nicht als abschließend repräsentativer Durchschnittswert betrachtet und weder in IPCC (1999) noch in Sausen et al. (2005) zum Gesamtbeitrag des Strahlungsantriebs addiert.

Fazit

Trotz markanter Verbesserungen im Wissensstand zur Klimarelevanz des Flugverkehrs über die letzten Jahre sind besonders im Bereich flugverkehrsbedingter Bewölkung weitere Anstrengungen nötig. In nächster Zukunft dürften vor allem das EU-Projekt *QUANTIFY*³ und Messkampagnen mit dem Forschungsflugzeug HALO⁴ zur Weiterentwicklung des wissenschaftlichen Kenntnisstandes beitragen.

Im Vergleich zu anderen klimawirksamen anthropogenen Emissionen ist der Beitrag des heutigen Flugverkehrs verhältnismäßig klein. Der Anteil des Flugverkehrs am gesamten durch den Menschen verursachten Strahlungsantrieb lag im Jahr 2000 bei rund drei Prozent. Bezieht man die diversen Unsicherheiten mit ein, kann der Anteil zwischen zwei und acht Prozent liegen (siehe auch IPCC 2007b). Angesichts des vorausgesagten Wachstums dürfte dieser Prozentsatz jedoch in Zukunft weiter ansteigen (IPCC 1999). Maßnahmen zum Einbezug des Flugverkehrs in internationale Klimaschutzziele sind deshalb nötig.

2 Die optische Dicke ist ein dimensionsloses Maß für die Beeinträchtigung der Strahlungsdurchlässigkeit.

3 <http://ip-quantify.eu>

4 www.halo.dlr.de

Metrik der flugverkehrsbedingten Klimabelastung

Seit einiger Zeit sind Bestrebungen im Gange, den Flugverkehr in internationale Klimaschutzziele einzubinden. Auf welche Weise die Wirkung der Nicht-CO₂-Beiträge in die Regelwerke einzu-beziehen ist, ist jedoch weiterhin strittig. Als vereinfachte Ansätze werden zurzeit unter anderem zwei Indizes diskutiert, die das Verhältnis der Gesamtwirkung zur Wirkung der CO₂-Emissionen alleine abbilden: **1.** der *Radiative Forcing Index (RFI)*, basierend auf dem Strahlungsantrieb, **2.** der Emissionsgewichtungsfaktor (EGF; englisch *Emission Weighting Factor, EWF*), basierend auf dem Treibhauspotenzial (englisch *Global Warming Potential, GWP*; Forster et al. 2006). Die Multiplikation der CO₂-Emissionen mit einem solchen Faktor soll die Klimarelevanz des Flugverkehrs in CO₂-Einheiten illustrieren. Beide Methoden zeigen jedoch konzeptionelle Schwierigkeiten (Grewe und Stenke 2008).

Der *Radiative Forcing Index (RFI)* wurde von Prather et al. (1999) eingeführt, um die Bedeutung der Nicht-CO₂-Effekte für den Klimawandel zu illustrieren. Der *RFI* ist das Verhältnis aus der Summe aller Strahlungsantriebe zum CO₂-bedingten Strahlungsantrieb. Mit den von Sausen et al. (2005) bestimmten Strahlungsantrieben liegt der *RFI* des Flugverkehrs für das Jahr 2000 bei 1,9. Der *RFI* zu einem bestimmten Zeitpunkt wird – wie der Strahlungsantrieb bei langlebigen Substanzen – durch die Geschichte der Emissionen mitbestimmt (siehe auch Forster et al. 2006). Bei konstanten Luftverkehrsemissionen verringert sich der *RFI* im Lauf der Zeit, weil das sehr langlebige CO₂ akkumuliert. Zur Veranschaulichung sei hier ein hypothetischer *RFI* mit Beginn im Jahr 2000 bei konstanten Emissionen berechnet: Betrachtet man zunächst nur die Emissionen des Jahres 2000, sind die Strahlungsantriebe von Ozon oder Kondensstreifen zuerst deutlich (mehr als 20-mal) höher als jener des CO₂. In den darauffolgenden Jahren sind die Strahlungsantriebe von Ozon oder Kondensstreifen aus dem Jahr 2000 nicht mehr bedeutsam, während der CO₂-Beitrag aus jenem Jahr nur sehr langsam abnimmt. Verfolgt man die Entwicklung des Strahlungsantriebs bei konstantem Verkehr über eine gewisse Zeitspanne, so bleiben die Ozon- und Kondensstreifen-Beiträge konstant, die Konzentration von CO₂ wächst jedoch weiter, wodurch dessen Strahlungsantrieb bereits nach 20 Jahren dominant wird (ab dem Jahr 2020 wäre der *RFI* kleiner als zwei). Da der *RFI* (als Verhältnis von Strahlungsantrieben) wesentlich von den Emissionen der Vergangenheit bestimmt wird, eignet er sich *nicht* als Grundlage für Regelwerke zum Klimaschutz; denn nicht die vergangenen, sondern nur die zukünftigen Emissionen lassen sich noch regeln.

Das *GWP* eines bestimmten Stoffes ist das Verhältnis des *AGWP* (*Absolute Global Warming Potential*) dieses Stoffes zum *AGWP* von CO₂. Das *AGWP* ist der über einen Zeithorizont τ integrierte Strahlungsantrieb aufgrund einer Einheitsemission eines strahlungsaktiven Stoffes. Damit vergleicht das *GWP* die integrierten zukünftigen Strahlungswirkungen zweier Substanzen. Wegen dieser Eigenschaften fand das *GWP* Eingang in das Kyoto-Proto-

koll (bei einem Zeithorizont von $\tau = 100$ a). Der *Emissionsgewichtungsfaktor EGF* des Flugverkehrs ist definiert als Summe der *AGWP* aller Einzelbeiträge dividiert durch das *AGWP* für CO₂. Für einen Zeithorizont von 100 Jahren fanden Forster et al. (2007) einen *EGF* von 1,2, wenn man neben CO₂ Ozon, Methan sowie Kondensstreifen berücksichtigt.

Der *RFI* und der *EGF* sind zwar beide geeignet, gewisse Aspekte der Nicht-CO₂-Beiträge des Flugverkehrs zur Klimaänderung zu illustrieren. Aber unabhängig davon, ob es sich um eine rückwärts- (*RFI*) oder vorwärtsschauende (*EGF*) Metrik handelt, würde ein Faktor zur Multiplikation der CO₂-Emissionen dazu führen, dass Maßnahmen zur Reduktion der Nicht-CO₂-Beiträge nicht belohnt würden, sondern nur Maßnahmen zur Treibstoffeinsparung. Es ist deshalb wichtig, die Nicht-CO₂-Beiträge einzeln zu gewichten und dann die gewichteten Beiträge zu addieren. (Das ist in Analogie zur Berechnung der CO₂-Äquivalente im Kyoto-Protokoll.)

Bei allen Methoden zur Beurteilung der Nicht-CO₂-Beiträge ist aber die Orts- und Zeitabhängigkeit der Strahlungsantriebe ein Problem. Stickoxidemissionen wirken sich zum Beispiel in verschiedenen Regionen und Jahreszeiten unterschiedlich auf die Ozonbildung aus. Selbst die Angabe mittlerer *GWPs* für Ozon oder Kondensstreifen wäre mit sehr großer Unsicherheit behaftet, da die Resultate noch sehr von Modell zu Modell schwanken (Shine et al. 2005). Der wissenschaftlich korrekte Weg zu einer Berücksichtigung der Nicht-CO₂-Effekte des Luftverkehrs könnte über orts- und zeitabhängige Maßzahlen für Einheitsemissionen führen; dabei könnte neben dem zeitlich integrierten Strahlungsantrieb auch die inkrementale Temperaturänderung bis zu einem vorgegebenen Zeitpunkt betrachtet werden, wie das Grewe und Stenke (2008) tun.

Emissionserfassung und Zuordnung zu Staaten

Zurzeit werden unter der *UNFCCC* die Emissionen des internationalen Luftverkehrs zwar berichtsmäßig erfasst (Maurice et al. 2006), jedoch nicht in die Summe der jährlichen anthropogenen Emissionen einbezogen. Sie sind damit im Gegensatz zu den Beiträgen des Inlandsflugverkehrs nicht Bestandteil des Kyoto-Protokolls. Theoretisch gibt es verschiedene Ansätze unterschied-

>

licher Komplexität, um die Klimabelastungen des Flugverkehrs einzelnen Staaten zuzuordnen und damit in Klimaschutzziele einzubinden. Um die Praxis einheitlicher zu gestalten, schlagen die IPCC-Richtlinien ein Drei-Stufen-Konzept vor: Stufe 1 und 2 sind Top-down-Methoden, die von den verkauften Treibstoffmengen ausgehen (Absatzprinzip), während Stufe 3 (bottom-up) sich auf die tatsächlich verbrauchten Mengen bezieht (Verbrauchsprinzip) (Maurice et al. 2006):

Für **Stufe 1** (englisch *Tier 1*) wird die Menge des in einem Staatsgebiet für den Flugverkehr jährlich bezogenen Treibstoffs mit über alle Flugphasen gemittelten Emissionsfaktoren für mehrere Treibhausgase (CO_2 , CH_4 und N_2O) sowie NO_x multipliziert.

Bei Anwendung von **Stufe 2** werden die verbrauchten Treibstoffmengen zusätzlich nach Start- und Lande- (*Landing/Take-off*, *LTO*-) Zyklen und Cruise-Phasen separiert, um die abhängig von der Flughöhe unterschiedlichen Treibstoffverbräuche und Emissionen entsprechend zu gewichten: Im Gegensatz zur Cruise-Phase werden beim *LTO*-Zyklus neben Emissionen von Treibhausgasen und NO_x auch diejenigen von Kohlenmonoxid, SO_2 und NMVOCs (*non-methane volatile organic compounds*, flüchtige organische Verbindungen außer Methan) berücksichtigt (über je spezifische Emissionsindizes für repräsentative Flugzeugtypen). Die CO_2 -Emissionen der Cruise-Phasen werden über den Treibstoffverbrauch pauschal berechnet, indem das Produkt aus der Anzahl der *LTO*-Zyklen und dem Treibstoffverbrauch pro Zyklus vom Gesamtabsatz subtrahiert wird.

Stufe 3 basiert auf den geflogenen Flugdistanzen. Zwei Methoden werden hierbei unterschieden: **Stufe 3a** (auch als Flugplan-Prinzip bezeichnet) basiert auf den erfassten Flugbewegungsdaten, die Informationen zu Herkunft und Ziel der betrachteten Flugroute sowie zum verwendeten Flugzeugtyp liefern. Diese Methode berücksichtigt damit neben den Flugzeugtypen und den Flugphasen (wie Stufe 2) auch unterschiedliche Emissionsstärken aufgrund unterschiedlicher Flugdistanzen. In **Stufe 3b** wird mit Hilfe von Informationen zur flugzeug- und triebwerksspezifischen Leistung entlang von vollständigen Flugtrajektorien die Menge des verbrauchten Treibstoffs beziehungsweise der Emissionen bestimmt.

In Europa berechneten bislang die meisten der ehemals 15 EU-Staaten (EU-15) ihre Flugverkehrsemissionen gemäß Stufe 1 oder Stufe 2. Die Schweiz hat ihre Berechnungsweise im Jahr 2004 gewechselt und wendet mit Stufe 3a ein aufwendigeres Verfahren an. Die so bestimmten Daten könnten weiterverwendet werden, um eine Bilanzierung gemäß dem sogenannten Inländer-Prinzip vorzunehmen, für die Schweiz exemplarisch vorgeführt von Kaufmann et al. (2000). Hier werden Flugreisen, die von Inländer(inne)n getätigt werden (sowohl im Inland als auch im Ausland), der nationalen Bilanz zugerechnet. So wird die gesamte geflogene Distanz vom inländischen Flughafen bis zur Enddestination und zurück abgebildet (inklusive Umsteigen). Transfer-

passagiere (Passagiere, die im Inland umsteigen und weiterfliegen) und Ausländer(innen), die das betrachtete Land als Enddestination wählen, beispielsweise Tourist(inn)en, müssen von den Statistiken abgezogen werden. Daten zu Passagierströmen an den einzelnen Flughäfen (unter anderem Inländeranteil, Enddestinationen) werden in der Schweiz vom Bundesamt für Statistik seit 2003 in Quartalsabständen publiziert (BfS 2008). Eine Bilanzierung nach Inländer-Prinzip wäre also in der Schweiz theoretisch durchführbar. Dies gilt jedoch nicht für den Frachtverkehr, da die in- und ausländischen Anteile der transportierten Güter nicht schlüssig bestimmbar sind.

Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen

Durch die Einbeziehung flugverkehrsbedingter Emissionen in die nationalen Treibhausgasinventare wären die Flugemissionen auch in die nationalen Emissionsreduktionsziele integriert. Maßnahmen zur Begrenzung der Emissionen (zum Beispiel ordnungspolitische Maßnahmen oder umweltpolitische Steuern auf Kerosin) obliegen den jeweiligen Staaten.

Ein anderer Ansatz zielt auf die sektorale Betrachtung, bei der eine Zuordnung der Emissionen zu Staaten entfällt. Eine solche Maßnahme ist die Einbindung in ein geschlossenes Emissionshandelssystem. Der angestrebte Gesamtausstoß innerhalb des Sektors (das Reduktionsziel) wird durch Aushändigen von Emissionszertifikaten festgelegt. Abhängig von den Vermeidungskosten der Emissionseinheiten werden die am Handel Teilnehmenden Zertifikate dazukaufen oder verkaufen. Falls das System nur auf CO_2 -Emissionen beschränkt bleibt, kann auch intersektoraler Zertifikathandel in Betracht gezogen werden, da CO_2 aus verschiedenen Sektoren sich nicht unterscheidet.

Weitere Instrumente sind Auslandsinvestitionen mit dem Ziel, Emissionseinsparungen zu geringeren Kosten zu erreichen (Kyoto-Instrumente *Clean Development Mechanism* und *Joint Implementation*). Daneben werden auch freiwillige Maßnahmen diskutiert, die einseitig von der Industrie durchgeführt werden oder im Einvernehmen mit der Regierung erfolgen: beispielsweise operationelle und technische Investitionen, freiwillige Emissionshandelssysteme oder kundenfinanzierte Kompensationsangebote für CO_2 -Emissionen.

Aufgrund der ökonomischen und ökologischen Effizienz schlägt die ICAO als Klimaschutzmaßnahme eine Einbettung des Flugverkehrs in ein Emissionshandelssystem vor (ICAO 2007). Anstelle des Aufbaus eines globalen Systems soll der Flugverkehr in bereits existierende länderspezifische Systeme integriert werden. Die ICAO wirkt hier als beratendes Organ, um den Prozess zu erleichtern.

Bisherige Ansätze – Einbindung in das Europäische Emissionshandelssystem

Gestützt auf die Vorschläge der ICAO hat die EU einseitige Maßnahmen ergriffen, um den internationalen und inländischen Flugverkehr im EU-Raum (wobei auch der aus Drittstaaten ab-

fliegende Flugverkehr enthalten ist) ab Januar 2012 in das bestehende EU-Emissionshandelssystem für stationäre Anlagen (*European Union Emission Trading System, EU-ETS*) aufzunehmen. Der entsprechende Gesetzestext ist seit Februar 2009 rechtsgültig (EU 2009), wobei die Mitgliedstaaten ein Jahr Zeit haben, die Rechts- und Verwaltungsvorschriften umzusetzen. Beim Emissionshandel werden ausschließlich CO₂-Emissionen berücksichtigt. Damit wurde eine zuvor vom EU-Parlament vorgeschlagene Änderung (Multiplikator von zwei basierend auf dem RFI zur zusätzlichen Berücksichtigung der Stickoxidemissionen) nicht übernommen. Stickoxidemissionen sollen durch andere – „von der Kommission im Jahr 2008 vorzuschlagende“ (*sic*, EU 2009, S. 18/6) – Rechtsvorschriften geregelt werden. Außerdem wird festgehalten, dass die Forschung bezüglich der Bildung von Kondensstreifen und Zirruswolken sowie bezüglich wirksamer Eindämmungsmaßnahmen, einschließlich technischer und betriebstechnischer Maßnahmen, gefördert werden sollte.

Die Obergrenze (das *Cap*) der an alle Flugzeugbetreiber auszugebenden Emissionsrechte errechnet sich anhand der durchschnittlichen Luftverkehrsemissionen aller am System teilnehmenden Flugzeugbetreiber im Zeitraum 2004 bis 2006. Das *Cap* wird 2012 auf 97 und in den Jahren ab 2013 auf 95 Prozent dieser Durchschnittswerte begrenzt. Zum Vergleich: Die EU ist gemäß Kyoto-Protokoll dazu verpflichtet, ihre Emissionen (gemittelt über Länder und Sektoren) zwischen 2008 und 2012 um acht Prozent im Vergleich zum Stand von 1990 zu reduzieren. Demgegenüber beziehen sich die Reduktionsvorgaben für den Flugverkehr auf einen höheren Bezugswert (die Luftverkehrsemissionen sind zwischen 1990 und 2004 bis 2006 erheblich gestiegen, siehe Abbildung 1).

Die Zuteilung der Zertifikate an die einzelnen Flugzeugbetreiber erfolgt anhand der durchschnittlichen spezifischen Emissionen des jeweiligen Unternehmens in zurückliegenden Perioden. Die Emissionsrechte sollen ausschließlich im Luftverkehrssektor gültig sein. Ein Zukauf von Emissionsrechten aus anderen Wirtschaftssektoren und von Emissionsrechten im Rahmen des *Joint Implementation* und *Clean Development Mechanism* ist jedoch möglich und wird bei wachsendem Verkehr erforderlich.

Schlussfolgerung

Wegen seiner bedeutsamen Rolle in Wirtschaft und Gesellschaft ist der Flugverkehr ein kontinuierlich wachsender Sektor, der im Gegensatz zu anderen Wirtschaftssektoren bislang ohne Einbindung in internationale Regelwerke zum Klimaschutz steht. Seit dem Erscheinen der ersten umfassenden Studie zum Thema „Klimarelevanz des Flugverkehrs“ (IPCC 1999) hat sich der Kenntnisstand erheblich verbessert. Neue Beobachtungsdaten und Berechnungsmethoden führten zu einer niedrigeren Einschätzung des Beitrags linienförmiger Kondensstreifen. Umgekehrt könnten die vom Flugverkehr erzeugten Zirren das Problem stark verschärfen, wobei die Abschätzung nach wie vor mit sehr großen Unsicherheiten behaftet ist.

Verschiedene Ansätze wurden präsentiert, wie Flugemissionen einzelnen Ländern zugeordnet werden können. Eine Bilanzierung gemäß Inländer-Prinzip erscheint konzeptionell sinnvoll, ist jedoch im Vergleich zu den Berechnungsmethoden des IPCC mit großem administrativen Aufwand verbunden und daher schlecht praktikabel. Für die Umsetzung von Emissionsreduktionen laufen international Bestrebungen, den Flugverkehr in Emissionshandelssysteme einzubinden. Die EU hat mit der Aufnahme des Flugverkehrs in das *EU-ETS* eine Vorreiterrolle übernommen. Weitere Staaten könnten diesem Ansatz folgen.

Zurzeit werden nur die Klimawirkungen der CO₂-Emissionen berücksichtigt. Methoden zur Berücksichtigung der kurzlebigen Nicht-CO₂-Effekte in Klimaschutzmaßnahmen gelten bis heute als zu wenig ausgereift. Der Fokus der Forschung sollte sich deshalb in den nächsten Jahren vermehrt diesem für den Klimaschutz und den Luftverkehr relevanten Thema zuwenden. Insbesondere sollten große Anstrengungen unternommen werden, um die Unsicherheiten im Wissen über die Klimawirkung der flugverkehrsbedingten Bewölkung zu reduzieren.

Literatur

- Barker, T. et al. 2007. Technical summary. In: *Climate change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Herausgegeben von B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 25–93.
- BfS (Bundesamt für Statistik). 2008. *Linien- und Charterverkehr – Quartalsstatistik*. Neuchâtel: BfS. www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/11/07/03/03.html (abgerufen 18.02.2009).
- Council of the European Union. 2007. *Presidency conclusions of the Brussels European Council (8/9 March 2007)*. www.consilium.europa.eu/ueDocs/cms_Data/docs/pressData/en/ec/93135.pdf (abgerufen 18.02.2009).
- EU (Europäische Union). 2009. Richtlinie 2008/101/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008. *Amtsblatt der Europäischen Union* 52/L8: 4–21. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:008:0003:0021:DE:PDF> (abgerufen 18.02.2009).
- Eyres, C. J. et al. 2004. *AERO2k global aviation emissions inventories for 2002 and 2025*. QinetiQ Report 04/01113. Hampshire, UK: QinetiQ.
- Forster, P. M. de F., K. P. Shine, N. Stuber. 2006. It is premature to include non-CO₂ effects of aviation in emission trading schemes. *Atmospheric Environment* 40: 1117–1121.
- Forster, P. M. de F., K. P. Shine, N. Stuber. 2007. Corrigendum to „Forster, P. M. de F. et al.: It is premature to include non-CO₂ effects of aviation in emission trading schemes“ [*Atmospheric Environment* 40 (2006): 1117–1121]. *Atmospheric Environment* 41: 3941.
- G8 Hokkaido Toyako Summit. 2008. *Chair's summary*. Hokkaido Toyako, 9 July 2008. www.mofa.go.jp/policy/economy/summit/2008/doc/doc080709_09_en.html (abgerufen 18.02.2009).
- Grewe, V., A. Stenke. 2008. AirClim: An efficient tool for climate evaluation of aircraft technology. *Atmospheric Chemistry and Physics* 8: 4621–4639.
- Hendricks, J., B. Kärcher, U. Lohmann, M. Ponater. 2005. Do aircraft black carbon emissions affect cirrus clouds on the global scale? *Geophysical Research Letters* 32: L12814, doi:10.1029/2005GL022740.
- ICAO (International Civil Aviation Organization). 2007. *ICAO environmental report 2007*. Montreal, Quebec: ICAO. www.icao.int/icao/en/env/pubs/env_report_07.pdf (abgerufen 18.02.2009).
- ICAO. 2008. *Economic woes impact traffic growth in 2008 – ICAO medium-term forecast points to industry recovery in 2010*. ICAO News Release December 2008. Montreal, Quebec: ICAO. www.icao.int/icao/en/nr/2008/pio200816_e.pdf (abgerufen 18.02.2009).

- ICAO. Verschiedene Jahre. *ICAO Journal*. Verschiedene Bände. www.icao.int/icao/en/jr/jr.cfm (abgerufen 19.02.2009).
- IEA (International Energy Agency). 2007. *Oil information 2007*. SourceOECD Energy, volume 2007, no. 17. Paris: OECD (Organisation for Economic Co-Operation and Development).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 1999. *IPCC special report – Aviation and the global atmosphere*. Herausgegeben von J. E. Penner, D. H. Lister, D. J. Griggs, D. J. Dokken, M. McFarland. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- IPCC. 2007 a. *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Herausgegeben von S. D. Solomon et al. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- IPCC. 2007 b. *Climate change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Herausgegeben von B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Kaufmann, Y., R. Meier, W. Ott. 2000. *Luftverkehr – eine wachsende Herausforderung für die Umwelt: Fakten und Trends für die Schweiz*. Materialienband M25. Bern: NFP 41.
- Mannstein, H., U. Schumann. 2005. Aircraft induced contrail cirrus over Europe. *Meteorologische Zeitschrift* 14/4: 549–554.
- Mannstein, H., U. Schumann. 2007. Corrigendum to „Mannstein, H., U. Schumann: Aircraft induced contrails over Europe“ [*Meteorologische Zeitschrift* 14/4 (2005): 549–554]. *Meteorologische Zeitschrift* 16/1: 131–132.
- Marquart, S., M. Ponater, F. Mager, R. Sausen. 2003. Future development of contrail cover, optical depth and radiative forcing: Impacts of increasing air traffic and climate change. *Journal of Climate* 16: 2890–2904.
- Maurice, L. Q., L. Hockstad, N. Höhne, J. Hupe, D. S. Lee, K. Rypdal. 2006. 3.6 Civil aviation. In: *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Herausgegeben von H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe. Hayama, JP: IGES (Institute for Global Environmental Strategies). Volume 2: Energy. 3.56–3.78.
- Meyer, R., H. Mannstein, R. Meerkötter, U. Schumann, P. Wendling. 2002. Regional radiative forcing by line-shaped contrails derived from satellite data. *Journal of Geophysical Research* 107/D10: 4104: doi:10.1029/2001JD000426.
- Minnis, P., J. K. Ayers, R. Palikonda, D. Phan. 2004. Contrails, cirrus trends, and climate. *Journal of Climate* 17: 1671–1685.
- Prather, M., R. Sausen, A. S. Grossman, J. M. Haywood, D. Rind, B. H. Subbaraya. 1999. Potential climate change from aviation. In: *IPCC special report – Aviation and the global atmosphere*. Herausgegeben von J. E. Penner, D. H. Lister, D. J. Griggs, D. J. Dokken, M. McFarland. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 185–215.
- Sausen, R. et al. 2005. Aviation radiative forcing in 2000: An update on IPCC (1999). *Meteorologische Zeitschrift* 14: 555–561.
- Schumann, U. 2005. Formation, properties and climatic effects of contrails. *Comptes Rendus Physique* 6: 549–565.
- Schumann, U., J. Ström. 2001. Aviation impact on atmospheric composition and climate. In: *European research in the stratosphere 1996–2000: Advances in our understanding of the ozone layer during THESEO*. EUR 19867. Herausgegeben von der Europäischen Kommission. Luxemburg: Office for Official Publications of the European Communities. 257–307.
- Shine, K. P., T. K. Bernsten, J. S. Fuglested, R. Sausen. 2005. Scientific issues in the design of metrics for inclusion of NO_x in global climate agreements. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102: 15768–15773.
- Stordal, F. et al. 2005. Is there a trend in cirrus cloud cover due to aircraft traffic? *Atmospheric Chemistry and Physics* 5: 2155–2162.
- Zerefos, C. S., K. Eleftheratos, D. S. Balis, P. Zanis, G. Tselioudis, C. Meleti. 2003. Evidence of impact of aviation on cirrus cloud formation. *Atmospheric Chemistry and Physics* 3: 1633–1644.

Eingegangen am 25. April 2008; überarbeitete Fassung
angenommen am 10. Februar 2009.

Andreas Marc Fischer

Geboren 1979 in Winterthur. Studium der Umwelt-naturwissenschaften an der ETH Zürich, Dissertation am Institut für Atmosphäre und Klima der ETH Zürich. Praktikum bei der World Meteorological Organization. Seit 2009 Postdoktorand bei der MeteoSCHWEIZ. Arbeitsschwerpunkte: Chemie-Klima-Modellierung, Klimavariabilität auf verschiedenen Zeitskalen, Klimaszenarien für die Alpenregion.

Robert Sausen

Geboren 1955 in Lissingen, Rheinland-Pfalz. Studium der Physik in Kaiserslautern und Zürich, Promotion und Habilitation in Meteorologie in Darmstadt beziehungsweise Hamburg. Wissenschaftlicher Mitarbeiter am MPI für Meteorologie in Hamburg. Seit 1991 Abteilungsleiter im Institut für Physik der Atmosphäre des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Oberpfaffenhofen und seit 2000 Professor für Meteorologie an der Universität München. Coordinating Lead Author des *IPCC Special Report Aviation and the Global Atmosphere*. Forschungsschwerpunkte: Klimamodellierung, Maßzahlen zur Bewertung von Emissionen.

Dominik Brunner

Geboren 1967 in St. Gallen. Studium der Physik und Promotion zum Dr. sc. nat. an der ETH Zürich. Danach Postdoktorat am Königlich-Niederländischen Meteorologischen Institut. Seit 2006 Leitung der Gruppe „Modellierung und Satellitenbeobachtungen“ in der Abteilung Luftfremdstoffe/Umwelttechnik der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Empa. Dozent am Departement für Umweltingenieure der ETH Zürich. Interessenschwerpunkte: Luftverschmutzung, Langzeittrends, Wechselwirkungen Luftverschmutzung und Klima.

Johannes Staehelin

Geboren 1949 in Basel. Studium der Chemie in Zürich. Dissertation an der Eawag in Dübendorf über den Ozonzerfall in Wasser. Arbeiten im Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences (CIRES) in Boulder, Colorado, in der Landwirtschaftlichen Forschungsanstalt für Obst, Wein und Gartenbau in Wädenswil (FAW) und in der Ciba-Geigy AG in Basel. Seit 1988 Leitung einer Forschungsgruppe im Institut für Atmosphärenphysik (heute Teil des Instituts für Atmosphäre und Klima) an der ETH Zürich. 2001 Titularprofessor. Forschungsschwerpunkte: Langzeittrendanalyse des atmosphärischen Ozons, Prozesse der Troposphäre und unteren Stratosphäre.

Ulrich Schumann

Geboren 1945 in Halle an der Saale. Diplom-Ingenieur, TU Berlin. Dr.-Ing. in Strömungsmechanik, Universität Karlsruhe. Postdoktorand am National Center for Atmospheric Research in Boulder, Colorado. Habilitation in Karlsruhe. Seit 1982 Direktor des Instituts für Physik der Atmosphäre des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Oberpfaffenhofen. Professor für Theoretische Meteorologie an der Universität München. Wissenschaftlicher Koordinator der Atmosphärenforschung im Verbundprogramm *Schadstoffe in der Luftfahrt* des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) und des DLR. Coordinating Lead Author des *IPCC Special Report Aviation and the Global Atmosphere*. Forschungsschwerpunkte: Atmosphärenphysik, Stickoxide aus Blitzen, Kondensstreifen.

- Aktuelles
- **Publikationen**
- Corporate Publishing
- Autoren
- Rights
- Presse
- Über uns

- Impressum
- Newsletter
- GAIA
pages
in
English

Publikationen

- Bücher
- **Zeitschriften**
- Broschüren

- politische ökologie
- **GAIA**
 - Aktuelles Heft
 - Archiv
 - Probeabo
 - Abonnement
 - GAIA online lesen
 - Editorial Board
 - Autorenhinweise
 - Redaktion
 - Transdisziplinarität
 - Mediadaten
- Ökologie & Landbau
- Ökologisches Wirtschaften
- umwelt aktuell
- Der Umweltbeauftragte
- Briefe zur Interdisziplinarität
- 21
- Mediadaten
- Ihre Beilage

GAIA

Ökologische Perspektiven für
Wissenschaft und Gesellschaft ISI-
Zeitschrift

- Artikelsuche
-

UNDISZIPLINIERT! Forschung ohne Fachgrenzen

GAIA ist eine transdisziplinäre Zeitschrift für Wissenschaftler und Wissenschaftsinteressierte, die sich mit Hintergründen, Analysen und Lösungen von Umwelt- und Nachhaltigkeitsproblemen befassen.

Mit dem Jahrgang 14/2005 wurde GAIA in die ISI-Datenbanken aufgenommen. Sie wird im Social Science Citation Index (SSCI) und in Current Contents/Social & Behavioral Science geführt. GAIA's Journal Impact Factor liegt für 2008 bei 0,653.

Umweltprobleme sind keine Probleme für disziplinäre Spezialisten. Sie lassen sich nur durch Fachgrenzen überschreitende Zusammenarbeit lösen. Seit 1991 bietet die Zeitschrift GAIA **transdisziplinärer Forschung** ein Forum – fundiert und handlungsorientiert. Wenn Sie aus erster Hand erfahren wollen, wo die Umweltforschung heute steht und was sie zur Lösung von Umweltproblemen beitragen kann, finden Sie in GAIA, was Sie suchen. Namhafte Herausgeber, Beiräte und Autor(inn)en garantieren die hohe Qualität der Beiträge und ermöglichen einen einzigartigen transdisziplinären Dialog. Und das in einer Sprache, die verständlich ist.

GAIA ist im Volltext online verfügbar:

www.ingentaconnect.com/content/oekom/gaia

In jeder Ausgabe finden Sie:

- In der Rubrik Forschung lesen Sie wissenschaftliche Originalarbeiten aus der Umwelt- und Nachhaltigkeitsforschung. Die Beiträge unterliegen einer doppelt blinden Fachbegutachtung (double-blind peer review) sowie der Prüfung durch eine(n) fachfremde(n) Gegenleser(in).
- Im Forum wird fundierte Meinung und Kontroverses geäußert, bestehendes Wissen in Frage gestellt, es werden neue Problemfelder identifiziert, aktuelle Kontexte hergestellt, Ideen und Zeitfragen öffentlich gemacht und diskutiert. Die Beiträge unterliegen einer doppelt blinden Fachbegutachtung (double-blind peer review).
- Das Magazin informiert Sie über Ereignisse in Umwelt- und Nachhaltigkeitsforschung, Umweltpolitik und Forschungsförderung.
- Die Rubrik Bücher diskutiert und bewertet Neuerscheinungen.
- Die mit GAIA verbundenen Institutionen nutzen die Mitteilungen, um über ihre Aktivitäten zu berichten und ihre Forschungstätigkeit mit anderen Institutionen zu vernetzen.

Auswahl der Beiträge

Die in GAIA veröffentlichten Beiträge werden sowohl unter fachlichen Kriterien als auch unter dem Gesichtspunkt der fachübergreifenden Bedeutung und Verständlichkeit ausgewählt.

Gaia ist ein altgriechischer Name für Erde

Er greift auf einen Mythos zurück, der noch den Anfang von Philosophie und Wissenschaft beeinflusste. „Mutter Erde“ ist eine Formel für Hervorbringen und Empfangen, Geben und Nehmen, Herauf und Hinab. Als Garantin für den Kreislauf des Lebens steht Gaia für die Grundlage jenes Rechts, das den freien Verfügungen der Menschen vorgeordnet ist.

Erscheinungsweise: vier Ausgaben pro Jahr

ISSN: 0940-5550

[Mediadaten \(pdf-Datei\)](#)