



# Spuren am Himmel

DLR-Forscher untersuchen Wirkungen des Luftverkehrs auf das Klima

Von Professor Dr. Joachim Szodrich und  
Professor Dr. habil. Ulrich Schumann

Das Klima der Erdatmosphäre ändert sich momentan stärker als je seit der letzten Eiszeit. In den vergangenen 100 Jahren ist die durchschnittliche Temperatur in Folge der globalen Erderwärmung um etwa 0,7 Grad Celsius gestiegen. Seit Beginn der industriellen Revolution wird die atmosphärische Konzentration von Treibhausgasen stetig erhöht. Für Kohlendioxid stieg diese auf Grund der Verbrennung fossiler Energieträger um etwa ein Drittel.

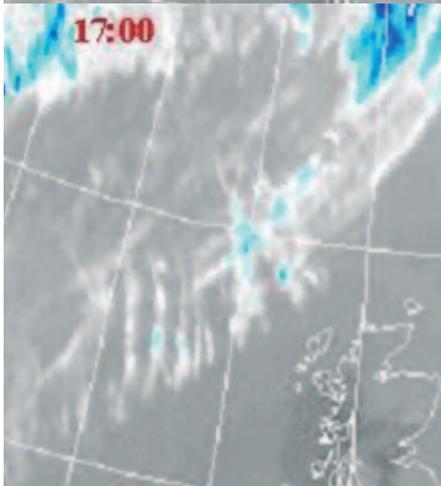
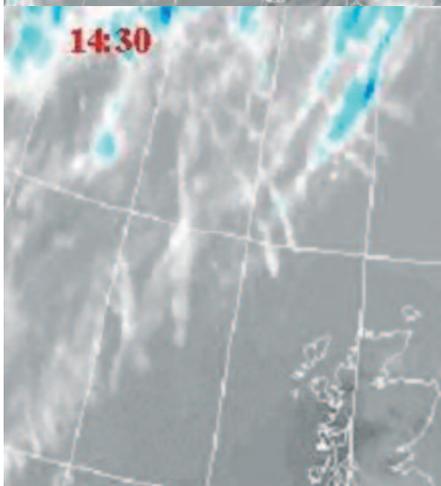
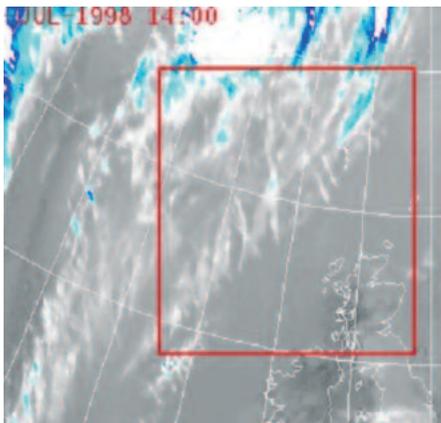
Verkehrsbedingte Emissionen aus Straßenverkehr, Schifffahrt und Luftverkehr tragen einen wesentlichen Teil zum weltweiten anthropogenen, also vom Menschen beeinflussten, Ausstoß von Treibhausgasen wie Kohlendioxid oder chemisch aktiven Substanzen wie Stickoxiden bei. Der relative Anteil des Verkehrs an der Emission von Treibhausgasen ist in den letzten Jahren deutlich angestiegen. Der Straßenverkehr ist dabei der größte Verursacher von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Luft- und Schifffahrt tragen in weitaus geringerem Maße zu den Emissionen bei. Um den klimawirksamen Anteil des Luftverkehrs zur globalen Erderwärmung genau zu erfassen und geeignete Maßnahmen zu seiner Reduktion zu erforschen, sind mehrere unterschiedliche Faktoren zu betrachten.

## **Luftverkehr verursacht drei Prozent aller Treibhausgas-Emissionen**

Neben den Treibhausgasen trägt der Luftverkehr durch Kondensstreifen und

damit einhergehenden Veränderungen der Bewölkung zum Klimawandel bei. Die Beiträge des globalen Luftverkehrs zur globalen Erderwärmung werden im so genannten Strahlungsantrieb zusammengefasst, er ist das Kennzeichen zur Klimawirksamkeit einzelner Treibhausgase. Am genauesten ist der Wert für CO<sub>2</sub> bekannt, während vor allem die Beiträge zu Veränderungen der Bewölkung durch Kondensstreifen und Partikel noch intensiver Forschungsaktivitäten bedürfen. Unter Berücksichtigung des heutigen Standes der Wissenschaft trug der globale Luftverkehr zum Strahlungsantrieb bis zum Jahr 2000 in Höhe von circa 0,05 Watt pro Quadratmeter (W/m<sup>2</sup>) bei. Das entspricht etwa drei Prozent des gesamten anthropogenen Strahlungsantriebs von etwa 1,6 W/m<sup>2</sup>.

Das DLR trägt zur Klimaerforschung mit Flugexperimenten, mit der Entwicklung von Messtechniken zur Erfassung klimarelevanter Parameter der Atmosphäre



Eine Serie von METEOSAT Infrarot-Kanal-Bildern für die Region des nordatlantischen Flugkorridors nordwestlich Schottlands zeigt Wolken unterschiedlicher Temperatur. Die blaue Farbe charakterisiert Temperaturen unter  $-40^{\circ}\text{C}$ . Die Zeiten beziehen sich auf Weltzeit (UTC). Man erkennt den Übergang von Kondensstreifen zu Zirren (H. Mannstein, DLR)

und mit numerischen Simulationen von Klimamodellen maßgeblich bei. Der Luftverkehr beeinflusst das Klima hauptsächlich durch die Emission von  $\text{CO}_2$  aus den Triebwerken.  $\text{CO}_2$  kann länger als 60 Jahre in der Atmosphäre verbleiben. Durch Verbrennung von Kerosin mit dem Sauerstoff der Luft werden pro Kilogramm (kg) Treibstoff circa 3,15 kg  $\text{CO}_2$  emittiert. Im Jahr 2002 wurden global 25.600 Megatonnen Kohlendioxid emittiert, der Anteil des Luftverkehrs betrug etwa zwei Prozent der anthropogenen  $\text{CO}_2$ -Emission. Für die  $\text{CO}_2$ -Emission ist es unerheblich, ob sie am Boden oder in typischen Flughöhen produziert wird, der resultierende Treibhauseffekt ist der gleiche.

#### Stickoxide verstärken in der Höhe die Wirkung des Ozons

Neben dem Kohlendioxid entstehen bei der Verbrennung zusätzlich Stickoxide. Diese fördern in Reiseflughöhe die Bildung von Ozon und verbleiben dort einige Wochen. Das führt dazu, dass der Klimaantrieb hier stärker ist als am Boden. Die globale Verteilung der Stickoxid-Emissionen entspricht im Wesentlichen dem Verkehrsaufkommen und weist Maxima über den USA und Europa auf sowie bei wachsendem Flugverkehr auch in Ostasien.

Aus Modellrechnungen des DLR-Institutes für Physik der Atmosphäre ist bekannt, dass die Stickoxide aus dem Luftverkehr im Reiseflug den Treibhauseffekt im globalen Mittel um  $0,022\text{ W/m}^2$  durch Bildung zusätzlichen Ozons verstärken. Aus jedem Stickoxid-Molekül wird im Reiseflug mehr Ozon gebildet als am Boden. Ozon wirkt im Höhenbereich des Luftverkehrs als Treibhausgas.

#### Aus Kondensstreifen gefrieren Zirruswolken

Wasserdampf aus den Triebwerken verursacht im Reiseflug in kalter und feuchter Luft die häufig vom Boden aus sichtbaren Kondensstreifen. Indem ein Teil des im Abgas enthaltenen Wasserdampfes zu kleinen Wassertropfen kondensiert, können in der kalten Umgebungsluft (unter  $-40^{\circ}\text{C}$ ) die Tropfen rasch zu Eispartikeln gefrieren, die im Falle feuchter Luft weiter anwachsen

und dadurch mehrere Stunden am Himmel verbleiben. In den Bilddaten geostationärer Satelliten ist zu erkennen, wie aus den anfangs linearen Kondensstreifen allmählich künstliche Zirruswolken („Kondensstreifen-Zirren“) entstehen. Zirren vermindern die am Boden ankommende solare Strahlung und die in den Weltraum emittierte terrestrische Strahlung.

Mithilfe von Simulationen lässt sich bestimmen, dass der Luftverkehr zur globalen Erwärmung der Erdoberfläche von circa  $0,7^{\circ}\text{C}$  mit circa  $0,02$  bis  $0,03^{\circ}\text{C}$  beigetragen hat. Die mittlere Temperatur an der Erdoberfläche folgt dem Strahlungsantrieb auf Grund der thermischen Trägheit des Atmosphäre/Ozean-Systems mit einer Verzögerung von circa 40 Jahren, d. h., in Zukunft wird die Erwärmung selbst bei konstanter Emission weiter ansteigen.

Der Treibstoffverbrauch des globalen Luftverkehrs (und damit die  $\text{CO}_2$ -Emission) ist zwischen 1990 und 2004 um circa zwei Prozent pro Jahr angestiegen, während die Transportleistung im Weltluftverkehr seitdem um etwa fünf Prozent pro Jahr gewachsen ist. Durch eine verbesserte Aerodynamik, durch konsequenten Leichtbau und durch Fortschritte in der Triebwerkstechnologie wurde die Effizienz moderner Flugzeuge drastisch gesteigert. Auch eine verbesserte Flugführungskontrolle und ein effizienterer Betrieb durch die Fluggesellschaften haben dazu beigetragen.

#### Mehr Luftfahrt nur mit weniger Schadstoffausstoß

Für die Luftfahrt kann damit auf einen bereits gelungenen Ansatz zur Entkopplung des Wachstums von den Emissionen verwiesen werden. DLR-Forscherinnen und -Forscher haben zu allen Themen bedeutende Beiträge geleistet. Die Zukunft des Luftverkehrs ist eng verknüpft mit der globalen Wirtschaft, dem industriellen Wachstum, dem Wohlstand und sozialen Bedürfnissen, die den Bedarf an Mobilität bestimmen. Alle Prognosen gehen von einem jährlichen Wachstum von mehr als fünf Prozent aus. Das bedeutet eine Verdreifachung der Transportleistung im Luft-



Kondensstreifen hinter einem viermotorigen Strahlflugzeug

verkehr innerhalb der nächsten 20 Jahre. Alle am Lufttransportsystem Beteiligten sind sich deshalb einig: Das Wachstum muss von den Emissionen weiter entkoppelt werden. Nur so kann auf Dauer eine klimaverträgliche Luftfahrt gewährleistet werden.

Der Advisory Council for Aeronautical Research in Europe (ACARE) hat deshalb die Vision 2020 als Zielsetzung für die Luftfahrtbranche formuliert. Diese fordert eine Halbierung des Treibstoffverbrauchs und eine Reduktion der Stickoxidemission um 80 Prozent, damit das heutige Niveau der Luftfahrtemission nicht weiter steigt. Um das zu erreichen, müssen die aktuellen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten kurzfristig in Produkte übergeführt werden. Besondere Aufmerksamkeit ist den Stickoxidemissionen zu widmen, da moderne Triebwerke auf Grund der hohen Verbrennungstemperaturen die Bildung von Stickoxiden fördern.

Über die Verbesserung der Flugzeuge hinaus werden heute „Air-Traffic-

Management“-Systeme erforscht. Die einheitliche Luftverkehrsführung „Single-European-Sky“ verspricht eine Treibstoffeinsparung von bis zu 12 Prozent gegenüber dem heutigen europäischen Luftverkehr.

Die Forschung wird zukünftig weit über die Verbesserung von Flugzeugen hinausgehen und sich auf das Gesamtsystem mit dem Flughafen und dem Air Traffic Management beziehen, um weitere interdisziplinäre Technologiepotenziale zu heben, die auch kurz- und mittelfristig umsetzbar sind. Das DLR hat sich inhaltlich und organisatorisch auf diese Aufgabe eingestellt und im nationalen und europäischen Rahmen hierfür positioniert.

**Autoren:**

Professor Dr. Joachim Szodrach verantwortet im DLR-Vorstand das Geschäftsfeld Luftfahrt, Professor Dr. habil. Ulrich Schumann leitet das Institut für Physik der Atmosphäre im DLR in Oberpfaffenhofen.

**Info:**

Mit den Auswirkungen des Luftverkehrs auf das Klima befasst sich ausführlich eine DLR-Broschüre, die über das DLR kostenfrei bezogen werden kann. Ansprechpartner: Dr.-Ing. M. Meyer, Telefon: 02203-60 13 67 9, E-Mail: matthias.meyer@dlr.de

**Verbrauch/Emissionen des Luft-, Straßen- und Schiffsverkehrs im Jahr/Mio. Tonnen**

(Q: Eyring et al., 2005)

