

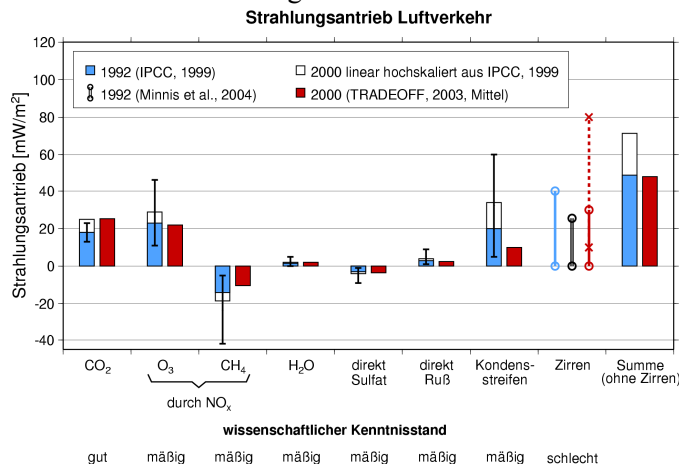
Klimaauswirkungen des Luftverkehrs

U. Burkhardt¹, C. Fichter¹, V. Grewe¹, J. Hendricks¹, B. Kärcher¹, S. Pechtl², M. Ponater¹, R. Sausen¹ und A. Stenke¹

¹Institut für Physik der Atmosphäre, DLR Oberpfaffenhofen, ulrike.burkhardt@dlr.de

²Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg

Flugverkehr verursacht Klimaänderungen. Der diesen Klimaänderungen zu Grunde liegende Strahlungsantrieb (Abb.1) beträgt zurzeit ~3.5 % des Strahlungsantriebs aller anthropogenen Klimaänderungen. Neben der Emission von CO₂ beeinflusst der Flugverkehr die Strahlungsbilanz und damit das Klima durch die Bildung linearer Kondensstreifen, die Veränderung der Zirrusbewölkung durch Kondensstreifen-Verbreiterung und indirekte Effekte sowie durch Änderungen der Ozon-, Aerosol- und Wasserdampfkonzentrationen..



Die Klimawirksamkeit der verschiedenen Komponenten ist teilweise nur unzureichend quantifiziert (Abb. 1). Durch Veränderungen z.B. der Flughöhe, Reisegeschwindigkeit und Treibstoffart kann auf die Klimawirksamkeit des Flugverkehrs Einfluss genommen werden (Mitigation). Studien mit dem Klimamodell ECHAM zur verbesserten Abschätzung des Strahlungsantriebs aufgrund von Änderungen der Ozon-, Wasserdampf- und Aerosolkonzentrationen, der Kondensstreifen- und Zirrenbedeckung sowie Ergebnisse aus Mitigationsstudien mit unterschiedlichen Flughöhen werden vorgestellt.

Abb.1: Strahlungsantrieb des Luftverkehrs aufgrund von Änderungen in Spurengasen, Aerosolen und Wolken (Sausen et al., 2005).

Ozon und Wasserdampf

Im Vergleich zur Gesamtmenge (~50 TgN/Jahr) aller Stickoxidemissionen ist der Beitrag des Luftverkehrs (~0.7 TgN im Jahr 2000) zwar relativ gering, jedoch erfolgt er in einem sensitiven Höhenbereich (9-13 km). Dort ist die dynamische und chemische Lebenszeit vieler Spurenstoffe erheblich höher als in Bodennähe und ihre Treibhauswirkung größer. Die Oxidationskapazität der Atmosphäre besitzt dort ein Minimum. Dies führt zu einer stärkeren Stickoxidanreicherung. Folge ist eine Erhöhung der Ozonproduktion, die eine Reduktion von Peroxidradikalen und somit eine Reduktion des Ozonabbaus im Bereich des Flugniveaus nach sich zieht. Beide Effekte führen zu einer Erhöhung der Ozonkonzentration um etwa 3% in 1992 (Abb. 2) und etwa 5% in 2000 (Grewe et al., 2002).

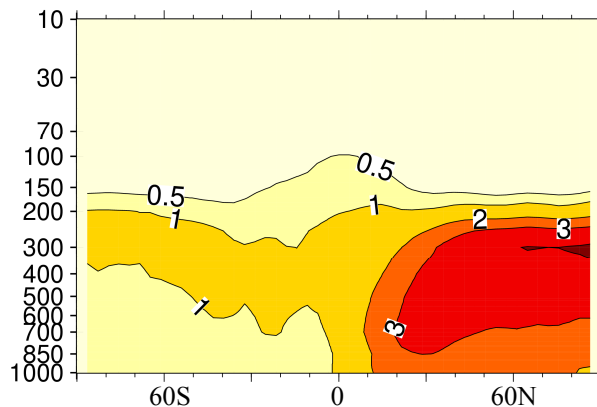


Abb.2: Änderung [%] der Ozonkonzentration durch Stickoxidemissionen des Luftverkehrs (Jahresmittel 1992)

Nur in der unteren Stratosphäre kann sich der von Flugzeugen emittierte Wasserdampf über längere Zeiträume akkumulieren und selbst dort bewirkt er eine Änderung des Wasserdampfgehaltes von deutlich weniger als 1% der Hintergrundkonzentration. Daher verursacht der in den heutigen Flughöhen emittierte Wasserdampf einen geringen Beitrag zum Strahlungsantrieb.

Kondensstreifen

Auf der Basis der thermodynamischen Theorie für die Bildung und Persistenz von Kondensstreifen wurde ein Parameterisierungsschema entwickelt, das den Bedeckungsgrad, die optischen Eigenschaften und den resultierenden Strahlungsantrieb von linearen Kondensstreifen konsistent berechnet (Ponater et al., 2002). Umgebungsbedingungen und Flugverkehrsdichte bestimmen die zeitlich-räumliche Struktur des Kondensstreifenfeldes (Abb. 3). Das Schema muss in einem Referenzgebiet an dem dort

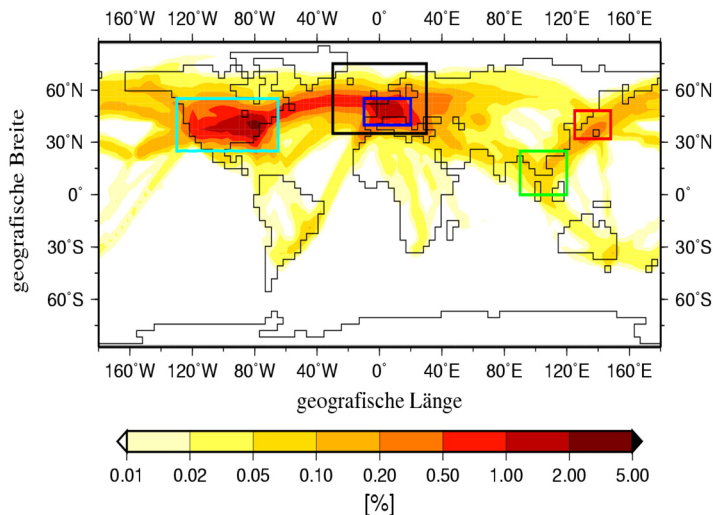


Abb.3: Langzeitliches Jahresmittel des Bedeckungsgrades linearer Kondensstreifen für 1992 (globaler Mittelwert 0.06%). Farbige Rahmen bezeichnen Gebiete mit Evaluierungsmöglichkeiten durch Satellitenbeobachtungen (schwarz: Kalibrierungsgebiet mit beobachtetem Bedeckungsgrad von 0.37%).

würde dann 9.8 mW/m^2 bzw. 19.5 mW/m^2 betragen. Der errechnete Strahlungsantrieb ist niedriger als in anderen Abschätzungen, die regionale Messungen der optischen Dicke als allgemeingültig annehmen. Die simulierte optische Dicke hängt stark von Jahreszeit, Höhe und geographischer Region ab und ist im Mittel geringer als die regional gemessenen Werte.

Zirren

Der Luftverkehr verändert auch den Bedeckungsgrad und die optischen Eigenschaften der Zirren. Einerseits entwickeln sich aus linienförmigen Kondensstreifen Kondensstreifen-Zirren (engl. contrail cirrus), die einige Stunden bis Tage bestehen können und somit direkt die Strahlungsbilanz beeinflussen. Andererseits haben emittierte Rußpartikel einen Einfluss auf Eigenschaften und Bedeckungsgrad der Zirren und verändern damit die Strahlung indirekt.

Eine neu entwickelte Parameterisierung ermöglicht die Untersuchung des Klimaeffektes von Kondensstreifen-Zirren (Burkhardt et al., 2006). Diese verbreitern sich aufgrund der vertikalen Windscherung und konkurrieren mit den natürlichen Zirren um Kondensat. Es ergibt sich ein deutlicher Anstieg des Bedeckungsgrades aufgrund von Kondensstreifen-Zirren verglichen mit den linienförmigen Kondensstreifen, wie auch aus Beobachtungen zu erwarten ist (Mannstein und Schumann, 2005). Wegen der Advektion kann lokal der Bedeckungsgrad von Kondensstreifen-Zirren groß sein, auch wenn dort nur wenig Flugverkehr stattfindet. Die optische Dicke von Kondensstreifen-Zirren hängt von dem lokal auftretenden Sättigungsüberschuss und von der Windscherung ab.

Als eisbildende Aerosole könnten Rußpartikel aus dem Luftverkehr die Anzahl und Größe von Eiskristallen in Zirren verändern und somit auch deren optische Eigenschaften und deren Einfluss auf das Klima. Der Beitrag des Luftverkehrs zum globalen atmosphärischen Rußhaushalt sowie der mögliche Einfluss des Rußes auf Zirren wurde untersucht (Hendricks et al., 2004, 2005). Der Luftverkehr bewirkt eine signifikante großräumige Erhöhung der Anzahlkonzentration von Rußpartikeln. Wegen großer Unsicherheiten bezüglich der Gefriereigenschaften von Rußpartikeln und anderen eisbildenden

beobachteten mittleren Kondensstreifenbedeckungsgrad kalibriert werden. Mittels Luftverkehrskataster für die Zukunft sind auch Vorhersagen möglich, wobei die Ergebnisse ebenso von zukünftigen Klimaänderungen abhängen. Marquart et al. (2003) berechnen für die Zeitebenen 1992, 2015 und 2050 einen global gemittelten Bedeckungsgrad linienförmiger Kondensstreifen von 0.06, 0.14 bzw. 0.22%, wenn das Hintergrundklima entsprechend dem IPCC-Szenario IS92a verändert wird. Der Strahlungsantrieb würde sich entsprechend von 3.5 mW/m^2 für 1992 über 9.4 mW/m^2 für 2015 auf 14.8 mW/m^2 für 2050 vergrößern. Nur aufgrund der erwarteten Flugverkehrszunahme (ohne Klimaänderung) wäre die Zunahme des Strahlungsantriebes größer, er

Aerosolen wurden Sensitivitätsexperimente mit unterschiedlichen Annahmen zur Eisbildung durchgeführt. Falls Rußpartikel aus Flugzeugen effektiv Eis bilden, zeigen die Simulationen eine deutliche Änderung der Eiskristallzahl in Zirren, insbesondere in mittleren nördlichen Breiten. Im Jahresmittel beträgt diese Änderung 10-60% im Vergleich zu unbeeinflussten Zirren. Es handelt sich hierbei um eine Zu- oder Abnahme der Kristallzahl, je nach Annahmen über den Entstehungsmechanismus (homogenes oder heterogenes Gefrieren) der vom Luftverkehr unbeeinflussten Cirren. Die Änderungen der Kristallzahl sind mit Veränderungen der Kristallgröße und nur sehr geringen Veränderungen des Eisgehaltes verbunden. Durch eine verbesserte Parameterisierung der Konkurrenz zwischen verschiedenen Eisbildungsprozessen soll dieser Effekt in Zukunft genauer bestimmt werden.

Minderung der Klimawirkung (Mitigation)

Der Einfluss von Luftverkehrsemissionen auf Kondensstreifen und die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre ist abhängig von der Flughöhe. Daher erscheint es möglich, den Klimaeinfluss durch eine geeignete Wahl der Flughöhe zu verringern. In einer Studie wurde die Reiseflughöhe schrittweise um jeweils zwei Flugniveaus (d.h. um 2000 Fuß) nach oben oder unten verlagert. Eine Absenkung der Flughöhe bewirkt dabei eine Reduzierung des globalen jahresgemittelten Bedeckungsgrades linearer Kondensstreifen (Fichter et al., 2005). Umgekehrt nimmt die Kondensstreifenbedeckung für nach oben verlagerte Flughöhen zu. Regional und saisonal treten große Unterschiede, und sogar gegenläufige Effekte auf.

Um die prinzipielle Bedeutung der Emissionshöhe für die Wirkung auf die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre und das Klima zu veranschaulichen, lassen sich zwei Extremszenarien heranziehen, eine reine Unterschall- und eine gemischte Überschall-Unterschall-Flotte. Beide Flotten erhöhen den troposphärischen Ozongehalt, jedoch führt der Überschall-Flugverkehr zu einer Abnahme des stratosphärischen Ozons und einer Zunahme des stratosphärischen Wasserdampfs. Dies führt dazu, dass mit wachsender Höhe, die Klimawirkung der Wasserdampfemissionen eine immer größere Rolle spielt und bei Flughöhen von 16-17 km sogar dominiert (Grewe et al., 2006).

Ausblick

Zukünftige Arbeiten konzentrieren sich auf eine verbesserte Einschätzung der Klimawirksamkeit von Zirren (direkte und indirekte Effekte) sowie auf eine Neubewertung des Einflusses von Partikelemissionen und Kondensstreifen auf die Chemie der oberen Troposphäre. Bestehende Studien zur Flughöhensensitivität sollen zukünftig auch Änderungen beim Treibstoffverbrauch umfassen.

Referenzen:

- Burkhardt, U., B. Kärcher, M. Ponater und R. Sausen, 2006: A parameterization of contrail cirrus for GCMs. In preparation.
- Fichter, C., S. Marquart, R. Sausen, D.S. Lee, 2005: The impact of cruise altitude on contrails and related radiative forcing. *Meteorol. Z.*, 14, 563-572.
- Grewe, V., M. Dameris, C. Fichter, R. Sausen, 2002: Impact of aircraft NO_x emissions. Part 1: Interactively coupled climate-chemistry simulations and sensitivities to climate-chemistry feedback, lightning and model resolution. *Meteorol. Z.*, 11, 177-186.
- Grewe, V., A. Stenke, M. Ponater, R. Sausen, Pitari, G., D. Iachetti, H. Rogers, O. Dessens, J. Pyle, I. Isaksen, L. Gulstad, C. Marizy, E. Pasquillo, 2006: Climate impact of supersonic air traffic: An approach to optimize a potential future supersonic fleet – Results from the SCENIC EU-project. In preparation
- Hendricks, J., B. Kärcher, A. Döpelheuer, J. Feichter, U. Lohmann, D. Baumgardner, 2004: Simulating the global atmospheric black carbon cycle: a revisit to the contribution of aircraft emissions. *Atmos. Chem. Phys.*, 4, 2521-2541.
- Hendricks, J., B. Kärcher, U. Lohmann, M. Ponater, 2005: Do aircraft black carbon emissions affect cirrus clouds on the global scale?, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L12814, doi:10.1029/2005GL022740.
- Mannstein, H., U. Schumann, 2005: Aircraft induced contrails cirrus over Europe. *Meteorol. Z.*, 14, 549-554.
- 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. *J. Clim.*, 16, 2890-2904.
- Ponater, M., S. Marquart, R. Sausen, 2002: Contrails in a comprehensive climate model: Parameterisation and radiative forcing results. *J. Geophys. Res.*, 107, 4164, doi:10.1029/2001JD000429.
- Sausen R., I. Isaksen, V. Grewe, D. Hauglustaine, D.S. Lee, G. Myhre, M.O. Köhler, G. Pitari, U. Schumann, F. Stordal, C. Zerefos, 2005: Aviation radiative forcing in 2000: An update on IPCC (1999), *Meteorol. Z.*, 14, 555-561.