

UMWELTGERECHTE FLUGROUTENOPTIMIERUNG

Dr. Hermann Mannstein

1 Stand des Wissens

1.1 Klimawirkung des Luftverkehrs

Die Klimawirkung des Luftverkehrs ist laut dem IPCC-Bericht "Aviation and the global atmosphere" (Fahey et al., 1999) vor allem verursacht durch Emission von CO_2 und NO_x , durch die Entstehung von Kondensstreifen sowie durch die Emission von Aerosolen, die die natürlichen Bedingungen der Entstehung von Zirren ändern und deren Eigenschaften modifizieren.

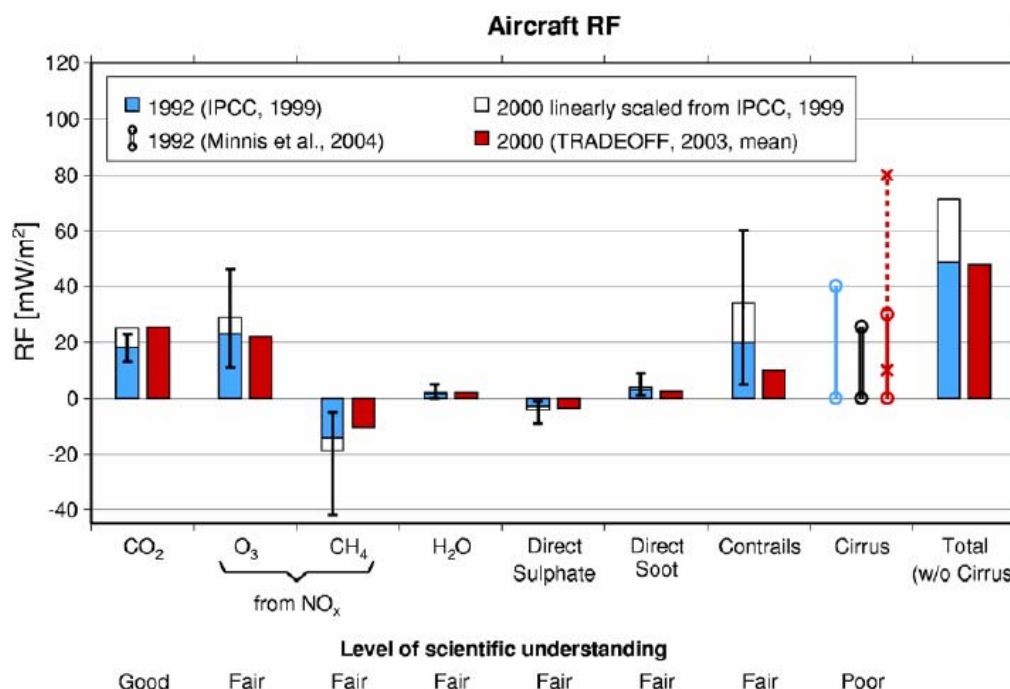


Abbildung 1: Neue Abschätzung (rote Balken) des globalen Strahlungsantriebes durch den Flugverkehr über verschiedene Wirkungspfade für das Jahr 2000. Aus: Sausen, R. et al. 2005

Gut bekannt ist der Einfluss von CO_2 , da sich dieses Treibhausgas wegen der langen Lebensdauer in der Atmosphäre gut durchmischt und somit seine Wirkung nicht vom Ort und Zeitpunkt der Emission abhängt und da sich über den Verbrauch an Treibstoff die Emissionen sehr gut erfassen lassen. Die Stickoxidemissionen dagegen wirken sich auf die Ozonbildung und den Methanhaushalt aus. Für ihre Gesamtwirkung auf den Strahlungshaushalt ist der Ort und Zeitpunkt der Emission entscheidend. Ihre Lebensdauer in der Atmosphäre liegt im Bereich von Tagen.

Ein großer Beitrag zum Strahlungsantrieb kommt von den langlebigen Kondensstreifen, die sich in der Atmosphäre durch Windscherung ausbreiten und im Laufe mehrerer Stunden zu großflächigen Eiswolken heranwachsen können. Der global gemittelte Bedeckungsgrad für junge (linienförmige) Kondensstreifen beträgt ca. 0.1% (mit lokalen Maximalwerten über Europa und USA bis 5%, Mannstein et al. 1999, Meyer et al., 2001, Marquart et al. 2003.). Der Bedeckungsgrad der aus den Kondensstreifen hervorgehenden Wolken kann ein Mehrfaches davon betragen. Eine über grobe Abschätzungen hinausgehende Bestimmung des Anteils dieser Zirren gelang bisher ebenso nicht (Mannstein et al. 2005 und 2007), wie die Bestimmung des Einflusses des ‚soot cirrus‘, also des Einflusses der vom Flugverkehr emittierten Aerosole auf spätere Zirrenbildung. Neue Ergebnisse zum Strahlungsantrieb über den Wirkungspfad ‚Kondensstreifen – Zirren‘ bestätigen die im ‚special report‘ angegebene Größenordnung. Nach dem derzeitigen Stand des Wissens ist der globale Strahlungsantrieb der durch den Flugverkehr verursachten zusätzlichen Bewölkung in etwa gleich hoch wie der durch CO₂ verursachte. Nach dem oben genannten IPCC Bericht waren somit 1992 dem Flugverkehr bei 2% der vom Menschen verursachten CO₂ Emissionen etwa 3,5% des klimawirksamen Strahlungsantriebs zuzurechnen. Im derzeit aktuellen IPCC Bericht (Fourth Assessment Report, AR4, IPCC 2007) wird nur der Anteil der linearen, sowohl im Satellitenbild als auch vom Boden aus eindeutig identifizierbaren Kondensstreifen ausgewiesen (siehe Abb. 2). Weder der sogenannte ‚contrail cirrus‘ noch der ‚soot cirrus‘ wird einbezogen, da hier die Unsicherheiten in der Quantifizierung des Einflusses noch zu groß sind.

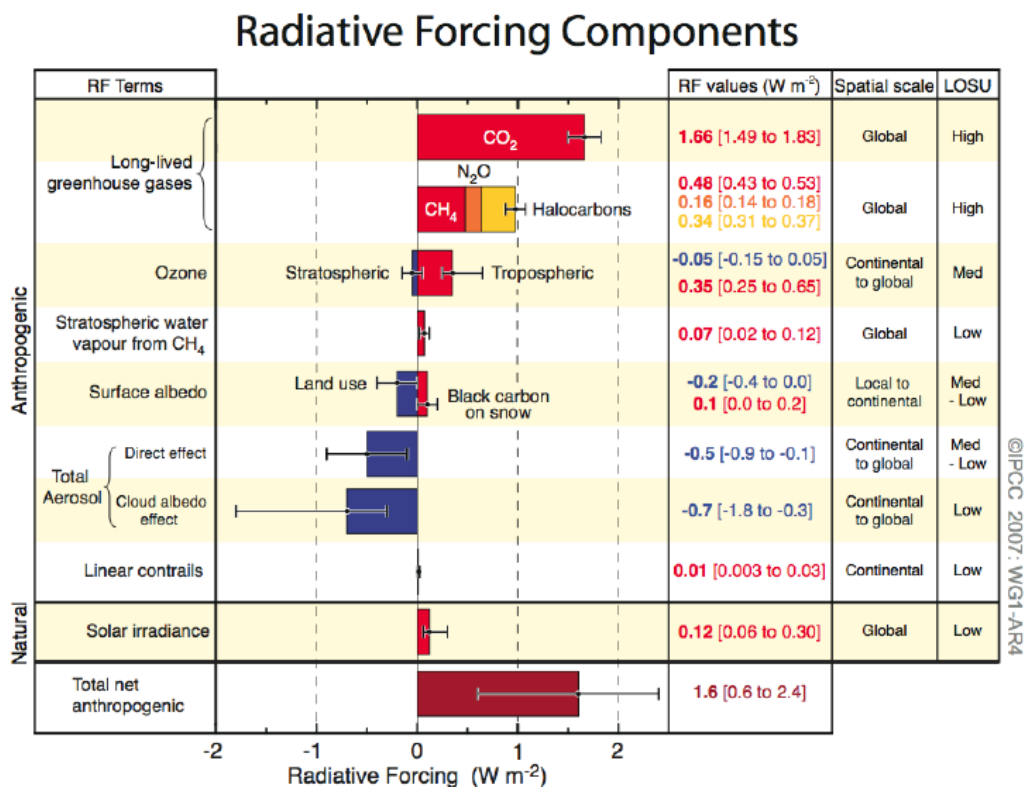


Abbildung 2: Komponenten des vom Menschen verursachten Strahlungsantriebs aus: IPCC, 2007 WG1 Summary for policy makers, http://www.ipcc.ch/WG1_SPM_17Apr07.pdf

1.2 Bildung von Kondensstreifen

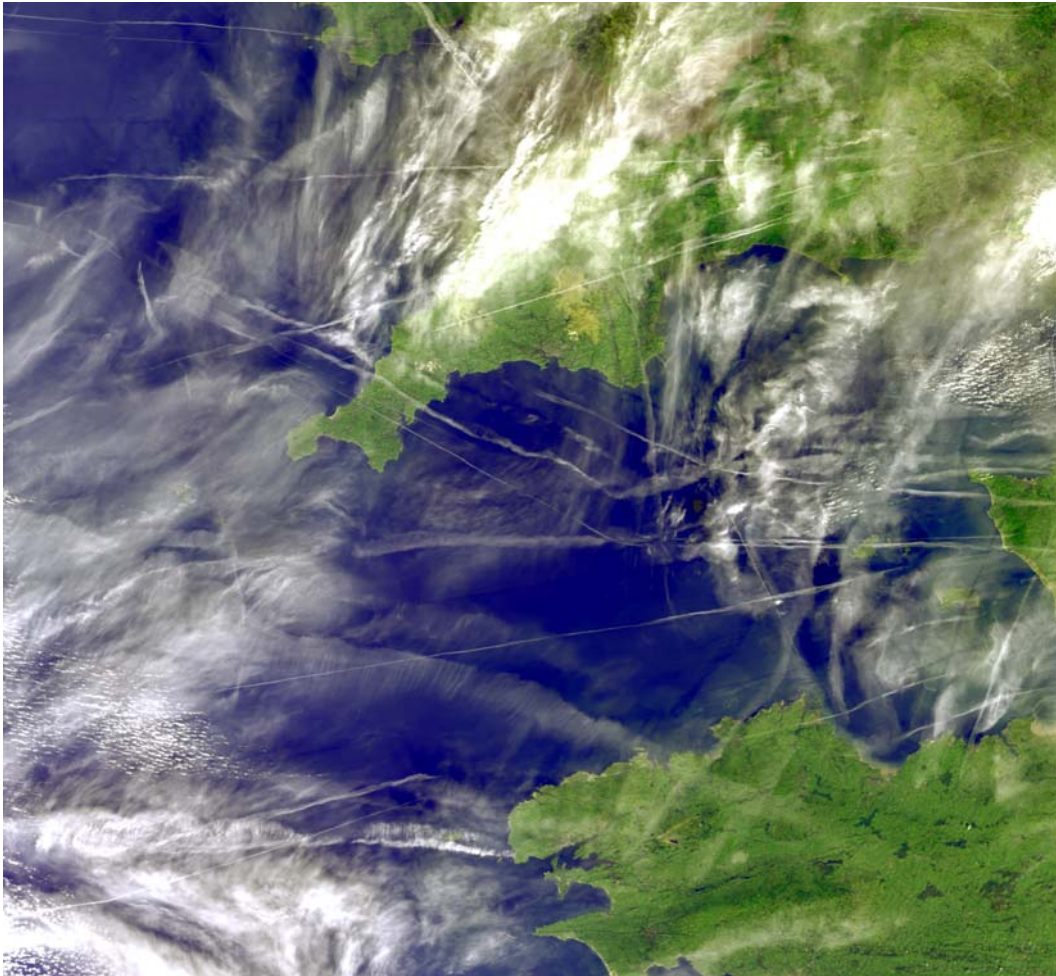


Abbildung 3: Junge und gealterte Kondensstreifen über dem Ärmelkanal. ENVISAT – MERIS, 4. 2. 2007, 10:39 UTC (DLR, ©ESA)

Kondensstreifen bilden sich, wenn sich die heißen und durch das bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen entstehende Wasser feuchten Abgase mit der Umgebungsluft vermischen und dabei der Sättigungsdampfdruck bezogen auf flüssiges Wasser überschritten wird. An Russpartikeln und auch Aerosol aus der Umgebungsluft kondensiert Wasser. Das Schmidt-Appleman Kriterium (Schumann 1996, 2000 und 2005) beschreibt diesen Vorgang. In der kalten Umgebungsluft der oberen Troposphäre bzw. unteren Stratosphäre gefrieren die entstehenden Tröpfchen sofort. Der überwiegende Teil der entstandenen Eiskristalle wird in das sich hinter dem Flugzeug bildende Wirbelpaar eingebunden und sinkt mit ihm in den folgenden Minuten um ca. 200-300 m ab. Dabei verdunsten die Eispartikel, wenn die Umgebungsluft nicht eine deutliche Übersättigung bezogen auf Eis aufweist (Unterstratzer et al., 2006). Wenn dies jedoch der Fall ist, sammeln die Eispartikel bei der Vermischung mit der Umgebungsluft überschüssigen Wasserdampf auf und breiten sich aus. Praktisch das gesamte Eis in einem so entstandenen, persistenten Kondensstreifen stammt aus der Umgebungsluft, das bei der Verbrennung gebildete Wasser trägt nur einen sehr geringen Teil bei.

Dabei nimmt der Kondensstreifen immer mehr die optischen und morphologischen Eigenschaften von natürlich gebildeten Zirren an und ist nicht mehr von ihnen zu unterscheiden.

1.3 Der Einfluss von Kondensstreifen auf die Strahlungsbilanz

Der Strahlungsantrieb durch Zirren und somit auch durch Kondensstreifen ist räumlich und zeitlich stark variabel. Nach Sonnenuntergang ist er praktisch immer positiv, d.h. das System Erde/Atmosphäre wird durch die Absorption der vom Boden und den unteren Atmosphärenschichten ausgehenden thermischen Strahlung erwärmt, während tagsüber durch die zusätzliche Reflexion des Sonnenlichts der erwärmende Effekt zum Teil kompensiert, unter bestimmten Bedingungen, wie zum Beispiel über dunklen Flächen (Wasser oder Wald), sogar überkompensiert wird (Meerkötter et al., 1999, Stuber et al., 2007).

Die Erwärmung wirkt sich hauptsächlich im Kondensstreifenniveau aus, während die Abschattung der direkten Solarstrahlung an der Erdoberfläche eher kühlend wirkt. Der Einfluss des Flugverkehrs auf die Erwärmung an der Erdoberfläche ('global temperature potential') ist somit geringer als der Einfluss auf die gesamte Strahlungsbilanz

2 Methoden zur Vermeidung von Kondensstreifen

Bisher werden Kondensstreifen nur im militärischen Bereich vermieden, da sie die Sichtbarkeit von Flugzeugen erhöhen. Folgende Methoden zur Vermeidung von Kondensstreifen wurden bisher vorgeschlagen bzw. wenn nötig auch praktiziert:

- Erwärmung der Triebwerksabgase: Nachbrenner bzw. ineffiziente Verbrennung im Triebwerk
- Abscheidung des Wassers im Triebwerk: Vorgeschlagen von Noppel et al. 2007, noch nicht realisiert
- Hygrophobe Beschichtung (coating) des Rußes durch Treibstoffadditive: Nach einer Untersuchung von Gierens (2007) nicht wirksam
- Allgemein niedriger fliegen: vorgeschlagen von Williams et al.(2002), führt mit dem derzeitigen Bestand an Flugzeugen zu erheblichem Mehrverbrauch an Treibstoff und schränkt den verfügbaren Luftraum erheblich ein
- Vermeidung übersättigter Atmosphärenschichten (im militärischen Bereich auch Vermeidung der Gebiete, in denen das Schmidt-Appleman Kriterium erfüllt ist

Einen breiten Überblick über diese Methoden findet man bei Gierens et al. 2008. Eine Möglichkeit zur Verringerung des Strahlungsantriebes von persistenten Kondensstreifen ergäbe sich bei dichtem Flugverkehr. Häufig erzeugen mehrere Flugzeuge, die in relativ kurzem Abstand hintereinander auf derselben Strecke fliegen mehrere parallele Kondensstreifen. Da bereits vom Kondensstreifen des ersten Flugzeuges die Übersättigung zumindest zum Teil abgebaut wird, könnten die nachfolgenden Flugzeuge entsprechend dem Querwind und dem zeitlichen Abstand leicht versetzt fliegen, um dieselbe Luftmasse zu benutzen und somit das

Anwachsen der weiteren Kondensstreifen zu mindern. Das Potenzial dieser Option wird zur Zeit vom Autor untersucht.

3 Das Projekt ‚Umweltgerechte Flugroutenoptimierung‘

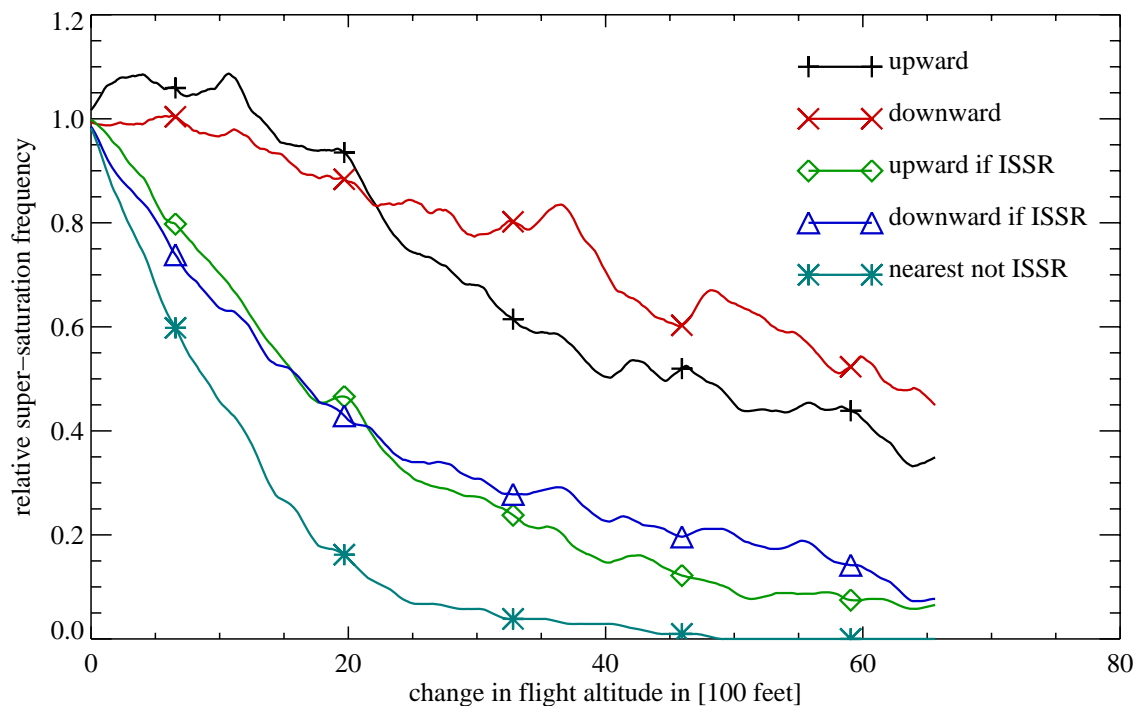


Abbildung 4: Gezeigt ist die relative Häufigkeit, nach Verlassen des Flugniveaus 290 ein eisübersättigtes Gebiet anzutreffen als Funktion der Flughöhenänderung. Hierzu wurden ca. 1600 Radiosondenprofile aus den Jahren 2000 und 2001 über Lindenberg analysiert. Die rote Kurve entspricht einer generellen Flughöhenbeschränkung, wie sie z. B. von Williams, Noland und Toumi (siehe Presseerklärung unter <http://www.imperial.ac.uk/P5997.htm>) zur Vermeidung von Kondensstreifen vorgeschlagen wird, die schwarze Kurve einem generellen Ausweichen nach oben. Da die kondensstreifen- und somit zirrenträchtigen eisübersättigten Gebiete (ice super-saturated regions“, ISSR) im Allgemeinen eine nur geringe Mächtigkeit haben (im Mittel ~500 m), kann bei selektivem Ausweichen, d.h. nur dann, wenn im vorgesehenen Flugniveau Eisübersättigung anzutreffen ist, schon mit geringen Änderungen der Flughöhe ein bedeutender Teil der langlebigen Kondensstreifen vermieden werden. Die geringsten Abweichungen sind nötig, wenn bekannt ist, ob die nächstgelegene ‚trockene‘ Schicht über oder unter dem ursprünglich gewählten Flugniveau liegt (hellblau).

Ein Forschungsverbund bestehend aus der Deutschen Lufthansa AG, der Deutschen Flugsicherung, dem Deutschen Wetterdienst und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt hat sich, gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Programms ‚Klimazwei - Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkung‘ die Aufgabe gestellt, die Möglichkeiten zur Verringerung des Einflusses des Flugverkehrs auf das Klima durch eine Optimierung der Flugrouten zu untersuchen. Die Strategie zur Vermeidung

von Kondensstreifen im Projekt ‚Umweltgerechte Flugroutenoptimierung‘ basiert unter anderem auf einer Studie von Mannstein et al. (2005). Abbildung 4 ist ihr entnommen: Wie diese Abbildung zeigt, ist die Vermeidung eisübersättigter Gebiete, in denen Kondensstreifen zu ausgedehnten Zirrenfeldern anwachsen können, durch relativ geringe Änderungen des Flugniveaus möglich.

Im Projekt ist vorgesehen, die gesamte Strahlungswirkung möglicher Kondensstreifen während ihrer Lebensdauer basierend auf Wetterprognosen abzuschätzen und mit der Strahlungswirkung der CO₂ (und später auch NO_x) Emission zu vergleichen. Dies ermöglicht, durch selektive Vermeidung derjenigen Kondensstreifen und Zirren, die einen stark erwärmenden Beitrag erwarten lassen, die Gesamtbilanz des Strahlungsantriebes durch den Flugverkehr deutlich zu beeinflussen. Dabei muss nur relativ selten von der optimalen Flugroute bzw. –höhe abgewichen werden. Aufbauend auf früheren Arbeiten (Sausen et al., 1996) und auf bereits in der täglichen Praxis erprobten Optimierungsverfahren sollen anhand der gegebenen meteorologischen Situation unter Berücksichtigung der Verkehrssituation, des zu erwartenden Strahlungsantriebes und des Kosten-Nutzen-Verhältnisses die günstigsten Flugprofile berechnet werden.

Da der Nutzen einer solchen Optimierung entscheidend von der Zuverlässigkeit der Prognosen der Feuchte und der Bewölkung abhängt, wird in diesem Projekt besondere Aufmerksamkeit der Messung und Modellierung dieser Parameter gewidmet. Zur Verifikation der Prognosen werden Satellitendaten genutzt.

4 Zusammenfassung

Im Projekt ‚Umweltgerechte Flugroutenoptimierung‘ werden Möglichkeiten zur Reduzierung des Einflusses des Flugverkehrs auf die Strahlungsbilanz untersucht, die sich im operationellen Betrieb bei der Flugplanung ergeben. Besonderes Augenmerk wird hier auf die Vermeidung von Kondensstreifen gelegt. Ob die vielversprechenden Ansätze in naher Zukunft realisierbar sind, welche Kosten sie verursachen und welchen Nutzen sie bringen, wird sich am Ende des Projekts zeigen.

1 Literaturverzeichnis

Fahey, D.W., U. Schumann (Coordinating Lead Authors), S. Ackerman, P. Artaxo, O. Boucher, M.Y. Danilin, B. Kärcher, P. Minnis, T. Nakajima, O.B. Toon (Lead Authors), 1999: Aviation-Produced Aerosols and Cloudiness. Chapter 3 in Aviation and the Global Atmosphere, A Special Report of IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), eds. J. E. Penner, D. H. Lister, D. J. Griggs, D. J. Dokken, and M. McFarland, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, p. 65-120.

Gierens, Klaus Martin, 2007: Are fuel additives a viable contrail mitigation option? Atmospheric Environment, 41, 4548 - 4552

- Gierens, Klaus Martin; Lim, Ling; Eleftheratos, Kostas 2008: A review of various strategies for contrail avoidance. *The Open Atmospheric Science Journal*, 2, S. 1 - 7
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Lee, D.S., Sausen, R., 2000: New directions: Assessing the real impact of CO₂ emissions trading by the aviation industry. *Atmos. Environ.* 34, 5337-5338.
- Mannstein, H., R. Meyer, and P. Wendling, 1999: Operational Detection of Contrails from NOAA-AVHRR-Data. *International Journal of Remote Sensing*, Vol 20, 8, pp 1641-1660,
- Mannstein, H., P. Spichtinger, K. Gierens, 2005: A note on how to avoid contrail cirrus. *Transportation Research Part D*, 10, 421–426
- Mannstein, H., Schumann, U. 2005: Aircraft induced contrail cirrus over Europe. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 14, No. 4, 549-554
- Mannstein, H.; Schumann, U. 2007: Corrigendum to Mannstein, H., U. Schumann, 2005: Aircraft induced contrail cirrus over Europe. *Meteorologische Zeitschrift*, 16, 131-132
- Marquart, S., Ponater, M., Mager, F., Sausen, R. 2003: Future Development of Contrail Cover, Optical Depth and Radiative Forcing: Impacts of Increasing Air Traffic and Climate Change. *Journal of Climate*, 16, 17, S. 2890-2904
- Meerkötter, R., U. Schumann, P. Minnis, D. R. Doelling, T. Nakajima, and Y. Tsushima, 1999: Radiative forcing by contrails. *Ann. Geophys.*, 17, 1080-1094.
- Meyer, R., H. Mannstein, R. Meerkötter, U. Schumann, P. Wendling, 2001: Regional Radiative Forcing by Line-Shaped Contrails Derived from Satellite Data. *Journal of Geophysical Research*, 107, D10, S. ACL 17-1-ACL 17-13
- Noppel, F., Singh, R., 2007, Overview on Contrail and Cirrus Cloud Avoidance Technology, *Journal of Aircraft* 44, 5, 1721-1726
- Sausen, R., et al., 1996: Ermittlung optimaler Flughöhen und Flugrouten unter dem Aspekt minimaler Klimawirksamkeit. DLR-FB 96-13.
- Sausen, R., Isaksen, I., Grewe, V., Hauglustaine, D., Lee, D. S., Myhre, G., Köhler, M. O., Pitari, G., Schumann, U., Stordal, F., Zerefos, Ch., 2005: Aviation radiative forcing in 2000: An update on IPCC (1999), *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 14, No. 4, 555-561
- Schumann, U., On conditions for contrail formation from aircraft exhausts. *Meteorol. Z.*, 5 (1996) 4-23.
- Schumann, U., 2000, Influence of Propulsion Efficiency on Contrail Formation, *Aerospace Science and Technology*, 4, 391-401.
- Schumann, U., 2002, Contrail Cirrus, in D. K. Lynch, K. Sassen, D. O’C. Starr, and G. Stephens (Eds.): *Cirrus*, Oxford Univ. Press, 231-255.

- Schumann, U., 2005, Formation, properties and climatic effects of contrails. C. R. Physique, 6, 549-565
- Stubenrauch C. J., and U. Schumann, 2005, Impact of air traffic on cirrus coverage, Geophys. Res. Lett., 32, L14813, doi:10.1029/2005GL022707 (2005).
- Stuber N, Forster P, Rädcl G, Shine K.,2007, The importance of the diurnal and annual cycle of air traffic for contrail radiative forcing, Nature, 441(7095):864-7.
- Unterstrasser, Simon; Gierens, Klaus; Spichtinger, Peter, 2006: Simulation of contrails in the vortex regime - Examination of the microphysical properties. In: 2005 Oxford TAC Conference, International Conference on Transport, Atmosphere and Climate TAC, Oxford, (UK)
- Williams, V., R.B. Noland and R. Toumi, 2002, Reducing the climate change impacts of aviation by restricting cruise altitudes, Transportation Research Part D 7 451–464

Oberpfaffenhofen, 25. April 2008

Anschrift des Verfassers:

Dr. Hermann Mannstein
Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt,
Institut für Physik der Atmosphäre
Oberpfaffenhofen
82230 Weßling
Tel.: 08153 28 2503
Fax: 08153 28 1841
E-Mail: Hermann.Mannstein@dlr.de