

Klimawirksamkeit des Flugverkehrs

Aktueller wissenschaftlicher Kenntnisstand über die Effekte des Flugverkehrs

Der Flugverkehr verursacht folgende Emissionen und atmosphärischen Prozesse, die klimawirksam sind:

- Emissionen von CO₂ (erwärmender Effekt)
- Bildung des treibhauswirksamen Gases Ozon infolge von NO_x-Emissionen (erwärmender Effekt)
- Minderung der atmosphärischen Konzentrationen des treibhauswirksamen Gases Methan, auch infolge der NO_x-Emissionen (abkühlender Effekt)
- Emission des treibhauswirksamen Gases Wasserdampf (erwärmender Effekt)
- Reflektion der Sonnenstrahlung durch die emittierten Sulfataerosole (abkühlender Effekt)
- Absorption der Sonnenstrahlung durch die emittierten Rußpartikel (erwärmender Effekt)
- Bildung von Kondensstreifen¹ (erwärmender Effekt)
- Bildung zusätzlicher Zirruswolken² aus Kondensstreifen (erwärmender Effekt)
- Modifikation bestehender Zirrusbewölkung (Effekt unbekanntes Vorzeichens und sehr unsicherer Größenordnung).

Als Maß für die Klimawirksamkeit dieser Emissionen und Prozesse nutzen die Wissenschaftler den Strahlungsantrieb (englisch: radiative forcing). Der Strahlungsantrieb drückt die Änderung der Energiebilanz des Systems Erde – Atmosphäre infolge einer Störung (zum Beispiel der Emission eines treibhauswirksamen Gases) aus. Ein positiver Strahlungsantrieb führt tendenziell zur Erwärmung der Erdoberfläche, während ein negativer Antrieb in der Tendenz zu einer Abkühlung führt. Die Ermittlung des Strahlungsantriebes erfolgt mit Hilfe von Modellen, und die Einheit ist Watt je Quadratmeter (W/m²).

Der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen (IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change) nahm in seinem speziellen Bericht „Aviation and the Global Atmosphere“ (IPCC 1999) erstmalig eine umfangreiche Bewertung der Klimawirksamkeit des Flugverkehrs vor. *Sausen u.a. 2005* sowie *Lee u.a. 2009* legten in der Folgezeit neuere Ergebnisse vor. In der

¹ Kondensstreifen bestehen aus Eispartikeln

² hohe, aus Eispartikeln bestehende Wolken

Tabelle 1 sind die Strahlungsantriebe der einzelnen Effekte des Flugverkehrs nach Sausen und Lee – bezogen auf die Jahre 2000 und 2005 – zusammengefasst.

Tabelle 1: Jährliche Treibstoffverbräuche, CO₂-Emissionen und Strahlungsantriebe verschiedener Effekte des Flugverkehrs (mittlere Werte) für die Jahre 2000 und 2005 nach *Sausen u.a. 2005* sowie *Lee u.a. 2009*

	Jahr: 2000 <i>(nach Sausen u.a. 2005)</i>	Jahr: 2005 <i>(nach Lee u.a. 2009)</i>
Treibstoffverbrauch [10⁶ t/Jahr]	169,0	232,4
CO₂ - Emissionen [10⁶ t/Jahr]	533	733
Strahlungsantrieb [mW/m²]		
CO₂	25,3	28,0
Ozonbildung	21,9	26,3
Abnahme von Methan	-10,4	-12,5
Wasserdampf	2,0	2,8
Sulfatpartikel	-3,5	-4,8
Rußpartikel	2,5	3,5
Kondensstreifen	10,0	11,8
Gesamt	47,8	55,0
Zirruswolken (untere Grenze, mittlerer Wert, obere Grenze)	10, 30, 80	11, 33, 87
Gesamt mit Zirruswolken (mittlerer Wert)	77,8	88,0

Grundlage dieser Berechnungen der Strahlungsantriebe sind die Luftverkehrsemissionen der Jahre 2000 und 2005. Der gesamte Treibstoffverbrauch (aus ziviler und militärischer Luftfahrt) betrug 169 Millionen Tonnen im Jahr 2000 und 232,4 Millionen Tonnen im Jahr 2005. Daraus resultieren CO₂-Emissionen in Höhe von 532. und 733 Millionen Tonnen (aus 1 Kilogramm Treibstoff entstehen bei der Verbrennung 3,15 Kilogramm CO₂). Darüber hinaus gehen in diese Berechnungen die CO₂-Emissionen des Luftverkehrs seit 1950 ein. Seit dieser Zeit emittiert der Flugverkehr jedes Jahr erhebliche Mengen an CO₂. Da Kohlendioxid ein langlebiges Treibhausgas ist, verbleibt ein großer Teil der Jahr für Jahr emittierten Menge in der Atmosphäre. Dieses CO₂, das seit 1950 durch den Flugverkehr emittiert wurde und das in der Atmosphäre verblieben ist, wird bei der Berechnung des Strahlungsantriebes mit berücksichtigt. Der Strahlungsantrieb im Jahre 2005 ist also nicht ausschließlich ein Maß der Klimawirksamkeit des Flugverkehrs von 2005, sondern ein Maß der Klimawirksamkeit, die der seit 1950 bis 2005 erfolgte Flugverkehr im Jahre 2005 ausübt. Insofern ist der Strahlungsantrieb eine auf die Vergangenheit und die Gegenwart bezogene Maßzahl.

Die Tabelle verdeutlicht, dass der gesamte Strahlungsantrieb der Emissionen und Effekte des Luftverkehrs (ohne Zirruswolken) in den Jahren 2000 und 2005 nach gegenwärtigen Erkenntnissen etwa **zweimal** so groß ist wie der Strahlungsantrieb von CO₂ allein. Das Verhältnis des Strahlungsantriebes aller Effekte des Flugverkehrs zum Strahlungsantrieb von flugverkehrsbedingtem CO₂ bezeichnen die Wissenschaftler auch als **Radiative Forcing Index** (RFI).

Im zuvor genannten Radiative Forcing Index (RFI) von 2 ist jedoch der durch die Bildung zusätzlicher Zirruswolken bewirkte Strahlungsantrieb noch nicht enthalten. Dieser Effekt konnte bisher noch nicht mit der gleichen Sicherheit wie die anderen Effekte des Flugverkehrs bestimmt werden. *Sausen u. a. 2005* geben – mit größerer Unsicherheit – einen mittleren Strahlungsantrieb der durch den Flugverkehr gebildeten zusätzlichen Zirruswolken von 30 mW/m^2 (Milliwatt je Quadratmeter) und eine obere Grenze von 80 mW/m^2 an. Mit diesen Zahlen erhöht sich der gesamte Strahlungsantrieb auf $77,8$ bis $127,8 \text{ mW/m}^2$. Das ergibt einen Radiative Forcing Index (RFI) von 3 bis 5. *Lee u.a. 2009* präsentierten ähnliche Zahlen für 2005. Mit einem mittleren Strahlungsantrieb für Zirruswolken von 33 und einer oberen Grenze von 87 mW/m^2 resultiert ein gesamter Strahlungsantrieb von 88 bzw. 142 mW/m^2 und damit ebenfalls ein RFI von 3 bis 5. Unter Einbeziehung der (mit größerer Unsicherheit behafteten) Angaben zum Effekt der Zirruswolken ist der gesamte Strahlungsantrieb des Luftverkehrs in den Jahren 2000 und 2005 etwa 3 bis maximal 5 mal so groß wie der CO_2 -Strahlungsantrieb allein.

Burkhardt und Kärcher 2011 haben den Strahlungsantrieb von Kondensstreifen und der von diesen zusätzlich erzeugten Zirruswolken (zusammen als Kondensstreifen-Zirren bezeichnet) erstmals mit einem Klimamodell simuliert. Die Autoren ermittelten für den Effekt von Kondensstreifen-Zirren einen Wert von ca. 38 mW/m^2 , bezogen auf das **Jahr 2002**. Die Autoren fanden ferner, dass Kondensstreifen-Zirren einen Rückgang der natürlichen (im Mittel wärmenden) Zirrusbewölkung verursachen, was den Gesamteffekt auf ca. 31 mW/m^2 reduziert. Der direkte Strahlungsantrieb der Kondensstreifen-Zirren und der Rückgang der natürlichen Bewölkung werden in der Studie als Kondensstreifen-induzierte Bewölkung bezeichnet. Fehlerquellen dieser wie auch der früher für Kondensstreifen bestimmten Werte ergeben sich vor allen Dingen aufgrund der Unsicherheit bei der Repräsentation der optischen Eigenschaften und der Strahlungswirkung. Ein möglicher Effekt der Rußemissionen aus Flugzeugtriebwerken auf Zirruswolken, der ohne Kondensstreifenbildung wirksam werden könnte, ist in diesen Abschätzungen nicht enthalten. Die Studie von *Burkhardt und Kärcher 2011* zeigt, dass Kondensstreifen-Zirren die größte Komponente des luftverkehrsbedingten Strahlungsantriebs darstellen. Diese neuen Ergebnisse bilden eine wissenschaftliche Grundlage zur Bewertung der Klimawirkung des Luftverkehrs sowie für zukünftige Strategien zu dessen Verminderung. Allerdings sind weitere unabhängige Simulationen und Modellvergleiche notwendig, um die bestehenden Unsicherheiten weiter einzugrenzen.

Lee u.a. 2009 setzen den Strahlungsantrieb des Flugverkehrs 2005 in Beziehung zum gesamten, vom Menschen verursachten Strahlungsantrieb im Jahr 2005. Demnach hat der Flugverkehr (ohne den Effekt der zusätzlichen Zirruswolken) einen Anteil von $3,5 \%$ (mittlerer Wert bzw. bester Schätzwert) am gesamten Strahlungsantrieb. Das 90% - Unsicherheitsintervall beträgt $1,3 \%$ - 10% . Das bedeutet, es gibt eine geschätzte $5 -$ prozentige Wahrscheinlichkeit, dass der wahre Wert oberhalb dieses Bereichs liegen könnte und eine $5 -$ prozentige Wahrscheinlichkeit, dass der wahre Wert unterhalb des genannten Bereichs liegen könnte.

Unter Einbeziehung des Strahlungsantriebes der Zirruswolken erhöht sich der Anteil auf **4,9 %** (bester Schätzwert) und das 90 % - Unsicherheitsintervall wird mit 2 % - 14 % angegeben³.

Abschließend noch eine Anmerkung zum Radiative Forcing Index (RFI) Der RFI eignet sich besonders zum Vergleich der Klimaeffekte verschiedener Sektoren der Wirtschaft oder verschiedener Bereiche des Verkehrs wie beispielsweise Luft- und Straßenverkehr. Auch im Hinblick auf die Kompensation der Klimaeffekte von Flugreisen durch freiwillige Beiträge, die Passagiere für ihre Flüge entrichten können, halten wir den RFI für die treffende Metrik.

³ Auch für die in der Tabelle 1 aufgeführten Strahlungsantriebe werden 90 % - Unsicherheitsintervalle angegeben. Wir beschränken uns hier mit der Angabe der Unsicherheitsbereiche auf die gesamten Strahlungsantriebe und verweisen für weitere Details auf die zitierte Literatur.

Literatur

Burkhardt, U., Kärcher, B., 2011: Global radiative forcing from contrail cirrus. Nature Climate Change 1, 54 – 58, doi: 10.1038/nclimate 1068

<http://www.nature.com/nclimate/journal/v1/n1/full/nclimate1068.html>

IPCC 1999: Aviation and the Global Atmosphere. A Special Report of IPCC Working Groups I and III, Cambridge, Cambridge University Press.

IPCC 2007: Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Cambridge, Cambridge University Press.

Lee, D. S., Fahey, D. W., Forster, P. M., Newton, P., J., Wit, R. C. N., Lim, L., L., Owen, B., Sausen, R., 2009: Aviation and global climate change in the 21 st century. Atmospheric Environment, doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.04.024

Sausen, R., Isaksen, I., Grewe, V., Hauglustaine, D., Lee, D.S., Myhre, G., Köhler, M.O., Pitari, G., Schumann, U., Frode, S., Zerefos, C., 2005: Aviation Radiative Forcing in 2000: An Update on IPCC (1999). Meteorologische Zeitschrift, Vol. 14, No. 4, 555-561.

IMPRESSUM

Herausgeber: Umweltbundesamt
Postfach 14 06
06813 Dessau-Roßlau
Tel.: 0340/2103-0
Telefax: 0340/2103 2285
E-Mail: info@umweltbundesamt.de
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

Fachgebiet: I 2.1 Klimaschutz

Dessau-Roßlau, 12. April 2012