



Publikationen des  
Umweltbundesamtes

## Klimawirksamkeit des Flugverkehrs

Aktueller wissenschaftlicher  
Kenntnisstand über die  
Effekte des Flugverkehrs

**Claudia Mäder**  
Umweltbundesamt  
FG I 2.1 Klimaschutz

März 2008

Umwelt  
Bundes  
Amt   
Für Mensch und Umwelt

## **Klimawirksamkeit des Flugverkehrs**

### **Aktueller wissenschaftlicher Kenntnisstand über die Effekte des Flugverkehrs**

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

- Emissionen von CO<sub>2</sub> (erwärmender Effekt)
- Bildung des treibhauswirksamen Gases Ozon infolge von NO<sub>x</sub>-Emissionen (erwärmender Effekt)
- Minderung der atmosphärischen Konzentrationen des treibhauswirksamen Gases Methan, auch infolge der NO<sub>x</sub>-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 Kondensstreifen (erwärmender Effekt)
- Bildung zusätzlicher Zirruswolken (hohe, aus Eispertikeln bestehende Wolken) (erwärmender Effekt).

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. Die Ermittlung des Strahlungsantriebes erfolgt mit Hilfe von Modellen und die Einheit ist Watt je Quadratmeter (Wm<sup>-2</sup>).

Der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen (IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change) nahm in seinem speziellen Bericht „Aviation and the Global Atmosphere“ (IPCC 1999) eine umfangreiche Bewertung der Klimawirksamkeit des Flugverkehrs vor und gab Zahlen für den Strahlungsantrieb der einzelnen Effekte an. Sausen u. a. 2005 präsentieren überarbeitete Zahlen bezogen auf das Jahr 2000, die in der Tabelle 1 zusammengefasst sind.

<b>Prozess</b>	<b>Strahlungsantrieb [mW/m<sup>2</sup>]</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	25,3
<b>Ozonbildung</b>	21,9
<b>Abnahme von Methan</b>	-10,4
<b>Wasserdampf</b>	2,0
<b>Sulfatpartikel</b>	-3,5
<b>Rußpartikel</b>	2,5
<b>Kondensstreifen</b>	10,0
<b>Gesamt</b>	47,8

Tabelle 1: Strahlungsantrieb verschiedener Effekte des Flugverkehrs (mittlere Werte) bezogen auf das Jahr 2000 nach Sausen u.a. 2005

In diese Berechnungen gehen die Luftverkehrsemissionen des Jahres 2000 ein. Der gesamte Treibstoffverbrauch (aus ziviler und militärischer Luftfahrt) betrug 169 Millionen Tonnen. Daraus resultieren CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 532 Millionen Tonnen (aus 1 Kilogramm Treibstoff entstehen bei der Verbrennung 3,15 Kilogramm CO<sub>2</sub>). Darüber hinaus gehen in diese Berechnungen die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Luftverkehrs seit 1950 ein. Seit dieser Zeit emittiert der Flugverkehr jedes Jahr erhebliche Mengen an CO<sub>2</sub>. Da Kohlendioxid ein langlebiges Treibhausgas ist, verbleibt ein großer Teil der Jahr für Jahr emittierten Menge in der Atmosphäre. Dieses CO<sub>2</sub>, das seit 1950 durch den Flugverkehr emittiert wurde und das in der Atmosphäre verblieben ist, wird bei der Berechnung des Strahlungsantriebes (siehe Zeile 2 der Tabelle 1) mit berücksichtigt.

Die Tabelle verdeutlicht, dass der Strahlungsantrieb der Emissionen und Effekte des Luftverkehrs im Jahr 2000 nach gegenwärtigen Erkenntnissen etwa **zweimal** so groß ist wie der Strahlungsantrieb von CO<sub>2</sub> allein. Das Verhältnis des Strahlungsantriebes aller Effekte des Flugverkehrs zum Strahlungsantrieb von flugverkehrsbedingtem CO<sub>2</sub> bezeichnen die Wissenschaftler auch als **Radiative Forcing Index (RFI)**. Allerdings enthält die Tabelle 1 und der daraus abgeleitete RFI den Strahlungsantrieb der zusätzlichen Zirkuswolken noch nicht. 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 Zirkuswolken von 30 mWm<sup>-2</sup> (Milliwatt je Quadratmeter) und eine obere Grenze von 80 mWm<sup>-2</sup> an. Mit diesen Zahlen erhöht sich der gesamte Strahlungsantrieb auf 77,8 bis 127,8 mW/m<sup>2</sup>. Das ergibt einen Radiative Forcing Index (RFI) von **3** bis **5**. Unter Einbeziehung der (mit größerer Unsicherheit behafteten) Angaben zum Effekt der Zirkuswolken ist der gesamte Strahlungsantrieb des Luftverkehrs im Jahr 2000 etwa 3 bis 5 mal so groß wie der CO<sub>2</sub>-Strahlungsantrieb allein.

Wie oben erläutert, gehen in die Berechnung des RFI die Luftverkehrsemissionen sowohl des Jahres 2000 als auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Luftverkehrs seit 1950 ein. Das heißt, die lange atmosphärische Verweilzeit von Kohlendioxid (die mit Hilfe von Modellen berechnet wird) ist berücksichtigt.

Der Radiative Forcing Index 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, kann der RFI sinnvoll angewendet werden. Für den Fluggast steht die Frage im Mittelpunkt, welche Klimaeffekte durch seinen aktuellen Flug bewirkt werden. Zur Beantwortung dieser Frage bietet der RFI die treffende Metrik.

## **Literatur**

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.

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.