



# Strahlenwirksamkeit von Flugemissionen

## Wie die Emissionen des Flugverkehrs auf den Treibhauseffekt wirken

Gerade im Verkehrsbereich werden neben CO<sub>2</sub> noch viele andere Treibhausgase ausgestossen, beispielsweise Stickoxide (NO<sub>x</sub>), Feinstaub und Russ sowie HFC-134a, das vor allem durch Klimaanlage von Autos verursacht wird. Diese wirken in unterschiedlicher Masse auf den Treibhauseffekt – sie treiben den Klimawandel also unterschiedlich stark an. Wie stark diese Treibhaus- oder Klimawirkung ist, hängt beispielsweise davon ab, wie lange ein Molekül eines Treibhausgases in der Atmosphäre verbleibt, bevor es vollständig abgebaut ist, oder wie viel Infrarotstrahlung – also wie viel von der Erdoberfläche zurückgestrahlte Wärme – ein Molekül eines Treibhausgases absorbiert resp. reflektiert. Für den Flugverkehr ist zudem entscheidend, dass viele Schadstoffe in grosser Höhe ausgestossen werden und so komplizierte chemische und physikalische Prozesse in der Atmosphäre auslösen, die wiederum in sehr unterschiedlicher Masse auf den Treibhauseffekt wirken.

Um die Treibhausgaswirkung von verschiedenen Treibhausgasen bzw. von durch sie ausgelösten atmosphärischen Prozesse vergleichen zu können, kommen verschiedene Vergleichsmetriken in Frage. Man sollte sich bewusst sein, dass diese Metriken immer eine starke Vereinfachung von komplexen atmosphärischen Prozessen sind, abhängig von der Wahl bestimmter Parameter Werturteile enthalten können und damit die atmosphärische Realität nie perfekt abbilden. Ist man sich dieser Einschränkungen jedoch bewusst, sind diese Metriken aber unverzichtbar, um die klimapolitische Entscheidungsfindung zu erleichtern.

### Der Strahlungsantrieb

Der Strahlungsantrieb ist ein Mass für die Änderung der Bilanz von einfallender und abgehender Energie im System Erde-Atmosphäre, den ein bestimmter Faktor (z.B. die Erhöhung der Kohlendioxid-Konzentration) hat.<sup>1</sup> Mit Hilfe des Strahlungsantriebs lassen sich also die wärmenden und kühlenden Einflüsse einer Anzahl von menschlich und natürlich verursachten Prozessen auf das globale Klima vergleichen.

Meistens wird der Strahlungsantrieb als Veränderung im Vergleich zur vorindustriellen Zeit, also zum Jahr 1750, angegeben und bezieht sich auf den global und jährlich gemittelten Wert. Er wird in Watt pro Quadratmeter (W/m<sup>2</sup>) ausgedrückt. Ein positiver Antrieb führt dabei tendenziell zur Erwärmung der Erdoberfläche während ein negativer Antrieb tendenziell zu einer Abkühlung führt.

Die Klimawissenschaft ist sich heute sicher (sehr wahrscheinlich), dass der globale durchschnittliche Netto-Effekt der menschlichen Aktivitäten seit 1750 bis 2011 zu einem Strahlungsantrieb von +2,3 W/m<sup>2</sup> und damit zu einer Erwärmung des globalen Klimas geführt hat (IPCC 2013).

Die Veränderung des Strahlungsantriebs kann aber nicht nur für die Gesamtheit aller menschlichen Aktivitäten berechnet werden, sondern auch für einzelne Sektoren. Dazu wird die Veränderung des Strahlungsantriebs durch die, durch diesen Sektor verursachten, atmosphärischen Veränderungen analysiert.

So werden beispielsweise durch den Flugverkehr Unmengen an CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre geblasen, aber auch andere Stoffe ausgestossen, die zu einer ganzen Reihe von chemischen und physikalischen Reaktionen in der Atmosphäre führen – insbesondere weil diese Stoffe in grossen Höhen ausgestossen werden. Insbesondere die Ozonbildung und der Ausstoss von Wasserdampf in hoher Flughöhe sind besonders klimawirksam.

---

<sup>1</sup> Technisch ausgedrückt: Der Strahlungsantrieb ist die Veränderung in der vertikalen Nettoeinstrahlung (Einstrahlung minus Ausstrahlung; ausgedrückt in Watt pro Quadratmeter: W/m<sup>2</sup>) an der Tropopause (Grenze zwischen Troposphäre und Stratosphäre) aufgrund einer Veränderung eines äusseren Antriebs (einer exogen verursachten Veränderung) des Klimasystems, wie z.B. eine Veränderung in der Konzentration von Kohlendioxid.

Aufgeschlüsselt auf die einzelnen durch den Flugverkehr verursachten Prozesse hat sich durch den Sektor Flugverkehr bisher folgende Veränderung des globalen Strahlungsantriebs ergeben (im Jahr 2018 gegenüber dem Jahr 1940):

CO <sub>2</sub>	34,3 mW/m <sup>2</sup>
Ozonbildung aufgrund NO <sub>x</sub> -Emissionen	49,3 mW/m <sup>2</sup>
Methanspaltung aufgrund NO <sub>x</sub> -Emissionen	-35 mW/m <sup>2</sup>
Wasser	2 mW/m <sup>2</sup>
Sulfat-Partikel	-7,4 mW/m <sup>2</sup>
Russ-Partikel	0,9 mW/m <sup>2</sup>
Zirruswolkenbildung	57,4 mW/m <sup>2</sup>
Strahlungsantrieb Flugverkehr total	100,9 mW/m <sup>2</sup>



Tabelle 1: Veränderung des effektiven Strahlungsantriebs durch den globalen Flugverkehr (Quelle: Lee et al. 2021)

Diese Zusammenstellung zeigt beispielsweise, dass die Ozonbildung mindestens so wirksam die Infrarotstrahlung der Erde zurückhält wie das emittierte CO<sub>2</sub>. Noch wirksamer ist die Bildung von Zirruswolken, wobei diese Wolkenbildung jedoch von vielen Wetterparametern abhängig ist und die Relevanz im Jahresdurchschnitt deshalb variiert.

Die Zusammenstellung zeigt schliesslich auch, dass der Klimaeffekt der Luftfahrt (gemessen am effektiven Strahlungsantrieb) um den Faktor 3 höher liegt als jener von dem durch die Luftfahrt verursachten CO<sub>2</sub> allein. Das ergibt sich, wenn man den gesamten, vom Flugverkehr verursachten Strahlungsantrieb durch den Strahlungsantrieb des durch den Flugverkehr verursachten CO<sub>2</sub> dividiert. Will man also ausgehend von den CO<sub>2</sub>-Emissionen der Luftfahrt (die sich über den Kerosinverbrauch relativ einfach bestimmen lassen), den gesamten Klimaeffekt der Luftfahrt berechnen, müssen die CO<sub>2</sub>-Emissionen mit einem Faktor von 3 multipliziert werden. Diesen Faktor nennt man den Radiative Forcing Index (RFI).

Während viele Emissionsrechner den Klimaeffekt von Flugreisen noch immer mit diesem RFI-Faktor berechnen

neuere wissenschaftliche Studien vom Gebrauch dieses Faktors ab (Fuglestad et al. 2010). Ihnen zufolge ist der RFI-Faktor ungeeignet, um die gegenwärtige und zukünftige Wirkung der Emissionen eines Sektors auf den Treibhauseffekt zu bestimmen. Das liegt daran, dass der RFI-Faktor ebenso wie der Strahlungsantrieb auf den kumulierten, in der Vergangenheit verursachten Emissionen eines Sektors beruht. Dies lässt jedoch unberücksichtigt, wie der Sektor sich im Vergleich zu anderen Sektoren in der jüngsten Zeit entwickelt hat (ob er zum Beispiel erst im letzten Jahrzehnt besonders stark gewachsen ist). Aus dem RFI-Faktor lässt sich also nicht ableiten, welchen Anteil am Treibhauseffekt ein Sektor zum heutigen Zeitpunkt hat. Aus diesem Grund ist der RFI auch kein geeignetes Mass, um den zukünftigen Effekt des Sektors auf den Klimawandel abzuschätzen. Oder anders gesagt: Der RFI misst den Anteil der vergangenen Emissionen eines Sektors am Treibhauseffekt bis heute; für politische Entscheidungen ist aber der Anteil der heutigen (und zukünftigen) Emissionen des Sektors am Treibhauseffekt in der Zukunft ausschlaggebend. Genau dies leistet das so genannte Global Warming Potential.

## Global Warming Potential

Das Global Warming Potential gibt an, welchen Strahlungsantrieb eine Gewichtseinheit eines heute ausgestossenen Treibhausgases in Zukunft im Vergleich zu CO<sub>2</sub> hat. (Das Global Warming Potential von Kohlendioxid hat per Definition stets den Wert 1.) Dabei wird berücksichtigt, dass unterschiedliche Treibhausgase unterschiedliche lange in der Atmosphäre verbleiben und die von der Erde abgehende Infrarotstrahlung unterschiedlich stark absorbieren. Das Global Warming Potential eines Treibhausgases wird immer für einen bestimmten zukünftigen Zeitraum bestimmt. Beispielsweise ist das Global Warming Potential von Methan (CH<sub>4</sub>) für den Zeitraum der nächsten 100 Jahre 25 (GWP<sub>100</sub> CH<sub>4</sub> = 25). Anders ausgedrückt: Wenn wir heute eine Tonne Methan austossen, dann hat das in den nächsten 100 Jahren denselben Klimaeffekt wie wenn wir heute 25 Tonnen Kohlendioxid austossen.

Es ist wichtig, dass mit dem Global Warming Potential für ein Gas auch stets angegeben wird, welche zukünftige Zeitspanne man betrachtet. Beispielsweise baut sich Methan schneller ab als CO<sub>2</sub> und darum liegt der langfristige Wert des Global Warming Potentials von Methan (GWP<sub>100</sub> CH<sub>4</sub> = 25) unter dem entsprechenden kurzfristigen Wert (GWP<sub>20</sub> CH<sub>4</sub> = 72). Unter der Annahme, dass gleich grosse Massen der von CO<sub>2</sub> und Methan ausgestossen werden und die Reduktion einer Tonne Methan gleich viel kostet wie die Reduktion einer Tonne CO<sub>2</sub>, wird eine Klimapolitik, die auf einem Global Warming Potential in Verbindung mit einer Zeitspanne von 20 Jahren beruht, also die Reduktion von Methan stärker vorziehen, eine Klimapolitik, die auf einem Global Warming Potential in Verbindung mit einer Zeit-

spanne von 100 Jahren beruht. Allgemein gilt also, dass eine Klimapolitik, die auf einem über kurze Zeiträume betrachteten Global Warming Potential beruht, unter sonst gleichen Umständen die Reduktion von kurzlebigen Treibhausgasen (wie Methan) der Reduktion von langlebigen Treibhausgasen (wie Schwefelhexafluorid, SF<sub>6</sub>) vorzieht als eine Klimapolitik, die auf einem über lange Zeiträume betrachteten Global Warming Potential beruht. Das Kyoto-Protokoll beruht übrigens auf Global Warming Potentials, die über einen Zeitraum von 100 Jahren betrachtet werden. Lee et al. (2021) haben das Global Warming Potential für alle vom Flugverkehr ausgestossenen Gase sowie die dadurch induzierte Zirruswolkenbildung berechnet. Allerdings kritisieren dieses statische Mass als wenig geeignet für den Flugsektor, wo einerseits sehr kurzlebige Emissionen mit dem vergleichsweise langlebigen CO<sub>2</sub> verrechnet werden soll und andererseits aufgrund der starken Zunahme des Luftverkehrs der letzten und künftigen Jahrzehnte eine kumulative Wirkung der Nicht-CO<sub>2</sub>-Emissionen zu erwarten ist. Der dynamische Wert GWP\*<sub>100</sub> berücksichtigt diesen Umstand für einen Horizont von 100 Jahren.

Der Multiplikationsfaktor basierend auf dem GWP\*<sub>100</sub> von Emissionen des Flugverkehrs beträgt gemäss Lee et al. (2021) einen Faktor 3. Dieser Faktor wurde auch in einer Studie für die EU in EASA (2020) bestätigt. Da dies das geeignetere – wenn auch nicht perfekte – Mass für politische Entscheidungen ist, empfiehlt der WWF deshalb flugbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen mit einem Faktor 3 zu multiplizieren, was einem Betrachtungshorizont über 100 Jahre entspricht.

Stand: Dezember 2020

Quellen:

**EASA (2020):** Updated analysis of the non-CO<sub>2</sub> climate impacts of aviation and potential policy measures pursuant to the EU Emissions Trading System Directive Article 30(4). European Union Aviation Safety Agency.

**Fuglestad, J.S., Shine, K.P. et al (2010):** Transport impacts on atmosphere and climate: Metrics, in: Atmospheric Environment 44 (37), 4648 – 4677.

**IPCC (2013):** Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press

**Lee, et al (2021):** The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018, in: Atmospheric Environment 244 (2021) 117834.



### Unser Ziel

Wir wollen die weltweite Zerstörung der Umwelt stoppen und eine Zukunft gestalten, in der Mensch und Natur in Harmonie miteinander leben.

### WWF Schweiz

Hohlstrasse 110  
Postfach  
8010 Zürich

Tel.: +41 (0) 44 297 21 21  
Fax: +41 (0) 44 297 21 00  
E-Mail: [service@wwf.ch](mailto:service@wwf.ch)  
[www.wwf.ch](http://www.wwf.ch)  
Spenden: PC 80-470-3