Vol. 15, No. 9, 2020

scnat
akademie der naturwissenschaften

swiss academies
communications

akademien-schweiz.ch

Die Auswirkungen der Flugverkehrsemissionen auf das Klima



Inhalt

1. Einleitung 4
2. Die Emissionskomponenten und Wirkungsmechanismen 5
3. Unterschiedliche Eigenschaften erschweren Vergleichsrechnungen 6
4. Abschätzung der gesamten Klimawirkung der Flugverkehrsemissionen 7
5. Wahl der Metrik 9
Referenzen 11

Bitte beachten: Schwefeldioxid (SO_2), Stickoxide (NO_x) und Russ, die beim Start und bei der Landung in bodennahen Luftschichten emittiert werden, haben auch direkte Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt. Diese nicht-klimatischen Auswirkungen der Flugverkehrsemissionen werden in diesem Communications nicht diskutiert. Ebenfalls nicht diskutiert werden mögliche Massnahmen zur Verringerung der Emissionen und ihre Wirkung. Vor- und Nachteile von politischen Massnahmen sind im Faktenblatt der Akademien der Wissenschaften Schweiz (2019) «Instrumente für eine wirksame und effiziente Energie- und Klimapolitik» beschrieben.

IMPRESSUM

Herausgeberin
Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT) • ProClim – Forum für Klima und globalen Wandel
Haus der Akademien • Laupenstrasse 7 • Postfach • 3001 Bern • Schweiz
+41 31 306 93 50 • proclim@scnat.ch • proclim.scnat.ch

Autor: Urs Neu, ProClim

Verantwortliches Fachgremium: Kuratorium ProClim
mit Unterstützung des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Expertinnen und Experten: Dr. Erich Fischer, ETH Zürich • Prof. Fortunat Joos, Universität Bern • Prof. Ulrike Lohmann, ETH Zürich • Prof. Thomas Peters, ETH Zürich • Theo Rindlisbacher, BAZL

Redaktion: Urs Neu und Sanja Hosi, ProClim

Layout: Sanja Hosi • Olivia Zwygart

Foto: pxHere

Bericht in elektronischer Form unter akademien-schweiz.ch/publikationen
© Akademien der Wissenschaften Schweiz, 2020

Zitiervorschlag: Neu U (2020) Die Auswirkungen der Flugverkehrsemissionen auf das Klima. Swiss Academies Communications 15 (9).

akademien-schweiz.ch

ISSN (online) 2297-1807

DOI: doi.org/10.5281/zenodo.3778046

Mit dieser Publikation leistet die Akademie der Naturwissenschaften Schweiz einen Beitrag an das SDG 13.

› un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals
› eda.admin.ch/agenda2030/de/home/agenda-2030/die-17-ziele-fuer-eine-nachhaltige-entwicklung.html



Das Wichtigste in Kürze

- → Die Emissionen des Flugverkehrs enthalten neben Kohlendioxid (CO_2) verschiedene weitere Komponenten, die eine Wirkung auf das Klima erzeugen, insbesondere Wasserdampf (H_2O), Stickoxide (NO_x), Schwefeldioxid (SO_2) und Russ. Die CO_2-Emissionen und deren Klimawirkung sind gut bekannt. Kenntnisse zur Klimawirkung der Nicht-CO_2-Emissionen sind noch sehr ungenau.
- → Nach aktuellem Kenntnisstand verursachen Kondensstreifen und die daraus gebildete hohe dünne Bewölkung (Zirren) die grösste Klimawirkung der Nicht-CO_2-Emissionen, ähnlich hoch oder etwas höher als der Effekt von CO_2. NO_x-Emissionen bewirken ähnlich hohe wärmende wie kühlende Effekte. Die Wirkungen von SO_2- und Russ-Emissionen sind vergleichsweise wahrscheinlich eher klein.
- → Um die Klimawirkung der Flugverkehrsemissionen zu stabilisieren, müssen die CO_2-Emissionen auf netto null gesenkt werden, die Nicht-CO_2-Emissionen hingegen dürfen nicht weiter ansteigen. Eine Senkung der Nicht-CO_2-Emissionen wirkt – verglichen mit Stand heute – kühlend, ähnlich wie negative Emissionen.
- → Die im Rahmen der UN-Klimarahmenkonvention (UNFCCC) (Paris, Kyoto) verwendete Umrechnungsmetrik in CO_2-äquivalente Emissionen (das Global Warming Potential», GWP) ist für kurzlebige Substanzen nicht geeignet. Eine für alle Fragestellungen geeignete Alternative hat sich bisher nicht etabliert. Es empfiehlt sich die Verwendung der je nach Fragestellung bzw. Optik am besten passenden Metrik.
- → Die Wahl der Metrik im Zusammenhang mit politischen Massnahmen hängt von der Optik ab bzw. der Gewichtung verschiedener Auswirkungen und damit von (gesellschafts-)politischen Wertsetzungen.

Für die Berechnung der Klimawirkung der Flugzeugemissionen werden die je nach Fragestellung bzw. Optik zur Verwendung empfohlenen Faktoren (Multiplikation mit CO_2-Emissionen für die Berechnung von CO_2-Äquivalenten als Mass für die totale Klimawirkung) in untenstehender Tabelle zusammengefasst.

Zu beachten: Diese Faktoren sind mit hohen Unsicherheiten behaftet und sind Schätzwerte nach aktuellem Wissensstand. Diese Faktoren können sich mit der Zeit verändern und müssen allenfalls angepasst werden. Gründe dafür sind die Akkumulation des CO_2 in der Atmosphäre (die Faktoren werden dadurch kleiner), CO_2-Minderungsmassnahmen (die Faktoren können je nach Art und Umfang der Massnahme ansteigen oder auch sinken, siehe Tabelle 5) oder Änderungen der Anstiegsrate der Emission kurzlebiger Substanzen (beim «Equivalent Warming Potential», GWP*).

Fragestellung/Optik	Faktor
Heutige Klimawirkung bisheriger Emissionen (Basis: Stahlungsantrieb bzw. effektiver Strahlungsantrieb), Stand 2011 (Berechnung des Anteils der Flugemissionen an der bisherigen Erwärmung)	2,5
Wirkung auf das verbleibende Emissionsbudget bzw. für Emissionsabsenkungspfade für die Erreichung von Temperaturzielen (Änderung der letzten zehn Jahre (2007–2017) berücksichtigt) (Basis GWP*)	2,5
Kompensationszahlungen bzw. politische Interventionen auf Konsumseite, je nach Optik:	
– Berücksichtigung der Temperaturwirkung im Verlauf der Zeit. Schwergewicht auf kurzfristige bzw. kurz- und langfristige bzw. langfristige Effekte (Basis: GWP; Zeithorizont 30 / 50 / 100 Jahre)	2,7 / 2 / 1,5
– Fokus auf die Wirkung bzgl. Einhaltung von Emissionsbudgets bzw. von Emissionspfaden; geeignet für Mitigationsszenarien (Basis: GWP*)	2,5
– Temperaturwirkung aktueller Emissionen zu einem Zeitpunkt in der Zukunft, je nach Zeithorizont (30, 50, 100 Jahre)	1,3 / 1,1 / 1
Politische (Lenkungs-)Instrumente zur Förderung von Massnahmen beim Operator (Empfehlung für die Betrachtung der Nicht-CO_2-Emissionen: GWP*-Ansatz verwenden)	getrennt betrachten
(Gleiche Behandlung wie Treibhausgase gemäss UNFCCC/Kyoto-Protokoll [GWP_{100}])	[2][1]

1 Vergleich zum Treibhausgasinventar: Aufgeführt ist zur Information auch der Faktor, der sich bei der Anwendung der gegenwärtig in den UNFCCC-Protokollen und den Treibhausgasinventaren verwendeten Metrik (GWP mit Zeithorizont 100 Jahre, GWP_{100}) ergibt. Dieser liegt etwas tiefer als die meisten anderen Metriken. Würde man die CO_2-Äquivalent-Emissionen des ebenfalls eher kurzlebigen Treibhausgases Methan auf Basis des GWP*-Ansatzes berechnen, ergäbe sich in der Schweiz daraus eine geringe Senkung der Gesamtemissionen, da die Methan-Emissionen in den letzten 10–20 Jahren leicht zurückgegangen sind. Im Treibhausgasinventar hingegen werden heute die Methan-Emissionen mit rund 4 Mio. t CO_2-Emissionen gleichgesetzt, was etwa 8,5 % der Gesamtemissionen entspricht.

1. Einleitung

Der Anteil der Kohlendioxid-Emissionen (CO_2) aus dem weltweiten Luftverkehr beträgt 2 bis 2,5 Prozent an den globalen durch Menschen verursachten fossilen CO_2-Emissionen (IEA 2018). In der Schweiz betrug der Anteil des nationalen und internationalen Luftverkehrs im Jahr 2017 ca. 12,5 Prozent an den erfassten Gesamtemissionen von CO_2 und rund 10 Prozent an allen Treibhausgasen (CO_2-Äquivalente) gemäss Treibhausgasinventar.[1] Aufgrund der starken Zunahme des Luftverkehrs nimmt dieser Anteil stetig zu, trotz technischer und operationeller Massnahmen zur Effizienzsteigerung, welche die stark steigende Nachfrage jedoch nicht kompensieren können. 2018 waren die CO_2-Emissionen aus dem Flugverkehr bereits halb so gross wie diejenigen des motorisierten Individualverkehrs. Bei gleichem Wachstum beim Flugverkehr und tieferen Emissionswerten von Personenwagen werden sich diese Anteile rasch weiter annähern. Die Klimawirkung des Flugverkehrs erhält deshalb vermehrte Aufmerksamkeit.

Die Emissionen des Flugverkehrs enthalten neben CO_2 verschiedene weitere Komponenten, die eine Wirkung auf das Klima erzeugen, insbesondere Wasserdampf, Stickoxide (NO_x), Schwefeldioxid (SO_2) und Russ. Während die CO_2-Emissionen und deren Klimawirkung gut bekannt sind, sind Angaben bezüglich der Klimawirkung dieser Nicht-CO_2-Emissionen mit grossen Unsicherheiten behaftet und beruhen auf Abschätzungen aus vergleichsweise wenigen Studien.

Die Klimawirkung der Nicht-CO_2-Emissionen des Flugverkehrs wird vom Treibhausgasinventar, das nur Treibhausgase beschreibt, nicht erfasst. Sie findet über einen relativ kurzen Zeitraum von Stunden bis einigen Jahren statt. Ein Vergleich mit CO_2 ist deshalb sehr schwierig. Das «Global Warming Potential» (GWP)[2], das im Treibhausgasinventar für die Berechnung der CO_2-Äquivalente anderer Treibhausgase (Methan, Lachgas etc.) verwendet wird, ist nicht auf die kurzfristigen Wirkungen solcher Nicht-CO_2-Emissionen ausgerichtet, wird aber mangels Alternativen und dem Wunsch nach einheitlicher Berechnungsweise oft trotzdem verwendet.

Zurzeit fehlt eine umfassende Synthese der vorliegenden wissenschaftlichen Literatur zur Bestimmung von «besten Schätzwerten» der Nicht-CO_2-Wirkungen des Flugverkehrs. Die aktuellen Berichte des Weltklimarats (IPCC) enthalten Angaben zur Wirkung des Flugverkehrs auf Kondensstreifen- und Wolkenbildung sowie auf Ozon, nicht jedoch zur Wirkung von Russ und Schwefeldioxid sowie zur direkten Wirkung von Stickoxiden. Nach bisherigen Kenntnissen bewirken die aufgrund der Emission von Wasserdampf und Partikeln gebildeten Kondensstreifen und die daraus entstehende bleibende Zirren-Bewölkung den weitaus grössten Klimaeffekt der Nicht-CO_2-Emissionen des Flugverkehrs, ähnlich hoch oder etwas höher als der Effekt von CO_2.

In der Folge werden die Wirkungsweise der wichtigsten Emissionskomponenten auf das Klima kurz beschrieben und deren Quantifizierung sowie die Verwendung von Vergleichswerten diskutiert.

1 Im Jahr 2018 betrugen gemäss Treibhausgasinventar der Schweiz die Emissionen inklusive internationalem Flugverkehr 42,6 Mio. t CO_2 bzw. 52,1 Mio. t CO_2-Äquivalente. Die Emissionen des nationalen und internationalen Flugverkehrs betrugen ca. 5,7 Mio. t CO_2 (davon ca. 0,11 Mio.t national) bzw. 5,8 Mio. t CO_2-Äquivalente. Diese Zahlen werden aus dem Verkauf von Kerosin und Flugbenzin an Schweizer Flughäfen abgeschätzt. Sie repräsentieren ungefähr die Emissionen der Flüge ab Schweizer Flughäfen (ohne Basel-Mulhouse) bis zur nächsten Landung.
Die CO_2-Emissionen des Flugverkehrs gemäss Kyoto-Protokoll (Abflüge ab Schweiz) betrugen demnach im Jahr 2018 rund 13,5 % der Gesamtemissionen von CO_2 bzw. 11 % der Gesamtemissionen von Treibhausgasen (CO_2-Äquivalente) relativ zum Total inklusive internationalem Flugverkehr. Im Vergleich dazu beträgt der Anteil des motorisierten Individualverkehrs 25,7 % bzw. 21,4 % an den CO_2- bzw. CO_2-Äquivalent-Emissionen. Die Schweizer Bevölkerung flog gemäss Erhebungen des BFS zum Verkehrsverhalten (Mikrozensus) im Jahr 2015 pro Einwohner und Jahr ca. 9000 km, dies entspricht bei 90 g CO_2 pro Passagier und Kilometer (Durchschnitt bei Flügen ab der Schweiz) ca. 810 kg CO_2 pro Einwohner und Jahr bzw. geschätzten 6,9 Mio. t CO_2 für die Schweizer Bevölkerung. Die «grauen» CO_2-Emissionen des Flugverkehrs der Schweizer Bevölkerung betragen – verglichen mit den Emissionen des Flugverkehrs im THG-Inventar von 5,1 Mio. t im Jahr 2015 - rund 2 Mio. t.
Berücksichtigt man auch die «grauen» Treibhausgasemissionen (verursacht durch die Produktion von in der Schweiz konsumierten Gütern im Ausland) sowie die Nicht-CO_2-Effekte des Flugverkehrs, so liegt der Anteil des Flugverkehrs an den Gesamtemissionen ebenfalls im Bereich von 10–15 %.

2 Das «Global Warming Potential» (Globale Erwärmungspotenzial; GWP) wird berechnet aus dem über die Zeit integrierten Strahlungsantrieb aufgrund eines einmaligen Emissionspulses eines bestimmten Gases nach einer bestimmten Zeit, in Relation zum Strahlungsantrieb eines Emissionspulses von CO_2 in gleicher Menge. Das GWP ist abhängig vom Zeithorizont, der meist auf 100 Jahre gesetzt wird (GWP_{100}).

2. Die Emissionskomponenten und Wirkungsmechanismen

Die Emissionen von SO_2 und NO_x sowie Russ führen einerseits zu einem direkten Strahlungsantrieb[3] durch Reflexion von Sonnenstrahlung oder Absorption von Wärmestrahlung. Anderseits bewirken diese Komponenten Veränderungen bei der Ozonkonzentration oder führen – zusammen mit ebenfalls emittiertem Wasserdampf oder Wasserdampf der Umgebungsluft – zur Bildung von Kondensstreifen und hohen Wolken und haben dadurch einen zusätzlichen, indirekten Einfluss auf das Klima. Um die verschiedenen Klimaeffekte quantifizieren zu können, sind Kenntnisse und eine detaillierte Analyse der zahlreichen chemischen und physikalischen Prozesse unter verschiedenen Wetterbedingungen in der Atmosphäre notwendig. Tabelle 1 fasst die wichtigsten emittierten Stoffe und deren Wirkungen zusammen.

Tabelle 1: Durch die Verbrennung von Kerosin emittierte Stoffe und ihre Wirkung auf den Strahlungsantrieb bzw. das Klima.

Emittierter Stoff	Wirkungsmechanismen
Kohlendioxid (CO_2)	• Treibhausgaswirkung (erwärmend)
Wasserdampf (H_2O)	• Treibhausgaswirkung (erwärmend) • Fördert Bildung von Kondensstreifen und kann zur Bildung zusätzlicher Zirren (Federwolken) führen (bewirkt H_2O-Sättigung und Kondensation; wirkt insgesamt erwärmend)
Stickoxide (NO_x)	• Erhöht kurzfristig die Ozonbildung, Ozon wirkt als Treibhausgas (wirkt erwärmend) • Baut das Treibhausgas Methan ab (wirkt kühlend); Abbau von Methan vermindert längerfristig Ozonbildung (wirkt kühlend) • Führt zu Aerosolbildung (wirkt kühlend) und beeinflusst indirekt die Bewölkung
Russ	• Strahlungswirkung (absorbiert Sonnenstrahlung; wirkt erwärmend) • Führt zu Aerosolbildung und Bildung von Kondensstreifen (wirkt erwärmend) und beeinflusst indirekt die Bewölkung
Schwefeldioxid (SO_2)	• Strahlungswirkung (reflektiert Sonnenstrahlung; wirkt kühlend) • Führt zu Aerosolbildung (wirkt kühlend) und beeinflusst indirekt die Bewölkung

Der aktuelle Kenntnisstand zu den wichtigsten Prozessen und Wirkungen ist sehr unterschiedlich und die quantitativen Aussagen sind dementsprechend mit sehr unterschiedlichen Unsicherheiten behaftet (u. a. ICAO 2016; siehe Tabelle 2):

Tabelle 2: Durch die Verbrennung von Kerosin emittierte Stoffe und der entsprechende Strahlungsantrieb relativ zu vorindustriellen Verhältnissen. Der Strahlungsantrieb nimmt von Jahr zu Jahr zu, solange die Emissionen weiter ansteigen.

Komponente	Strahlungsantrieb für die Jahre 2005/6 [mW/m²]	Strahlungsantrieb für das Jahr 2011 [mW/m²][4]
CO_2 direkt	+28	+35
Kondensstreifen (persistente K. und aus K. gebildete Zirren)	+45 (+15 bis +100)	+50 (+20 bis +150) (+10 [5–30] persistente K.; +40 [15–120] für K.-Zirren)
NO_x (via Ozon, via Methan und Ozon sowie via Nitrat)	+4 (-6 bis +17) (+25 [+6 bis +82] via Ozon; -15 [-6 bis -80] via Methan/Ozon -6 [-4 bis -7,5] via Nitrat)	ca. +5
SO_2 (direkter Aerosoleffekt)	-5 (-3 bis -7)	k. A.
Russ	+0,5 bis +3,5	k. A.
SO_2 (via Aerosolbildung) und Russ über Wolkenbildung	Quantifizierung sehr unsicher	k. A.

Quellen: Lee 2009; Brasseur 2015; Fahey & Lee 2016; Kärcher 2018 (nur Kondensstreifen) für die Jahre 2005/2006; IPCC 2013 für das Jahr 2011.

Der direkte Strahlungsantrieb bzw. die Treibhausgaswirkung von CO_2 kann quantitativ aus dem Treibstoffverbrauch und dem Kohlenstoffgehalt des Treibstoffs relativ genau berechnet werden.

Die Nicht-CO_2-Effekte sind stark abhängig von der Flughöhe, der geographischen Lage, der Tageszeit und der Wettersituation. Die Berechnung der Klimawirkung ist dadurch sehr schwierig. Es gibt verschiedene Modellansätze, die jedoch nicht alle Kopplungs- und Rückkopplungseffekte im Klimasystem berücksichtigen.

Bei der Bildung von Kondensstreifen werden die Wirkungen von persistenten linearen Kondensstreifen und von hoher Zirren-Bewölkung, die sich aus den Kondensstreifen bildet, unterschieden. Beide wirken erwärmend, letztere haben eine deutlich grössere Wirkung. Verschiedene Schätzwerte dazu liegen vor.

Stickoxide (NO_x) beeinflussen die Konzentrationen von Ozon und Methan, mit verschiedenen, sowohl kühlenden

3 Der Strahlungsantrieb («Radiative Forcing», RF) ist die Veränderung der in ca. 10 km Höhe ü.M. (Tropopause) in Richtung Erdoberfläche fliessenden Netto-Strahlung, aufgrund von intern oder extern ausgelösten Veränderungen der Strahlungsverhältnisse in der Erdatmosphäre (siehe. IPCC AR5 WGI Kasten 8.1, www.ipcc.ch).

4 Die angegebenen Werte aus dem IPCC-Bericht von 2013 entsprechen dem effektiven Strahlungsantrieb («Effective Radiative Forcing», ERF), das Anpassungen in der unteren Atmosphärenschicht (Troposphäre) berücksichtigt, im Gegensatz zum «Radiative Forcing».

als auch wärmenden Auswirkungen. Diese Effekte sind abhängig vom Ort der Emission und den vorhandenen Hintergrundkonzentrationen von NO_x. Die wärmenden und kühlenden Effekte sind ähnlich gross, finden aber zu unterschiedlichen Zeiten statt und heben sich deshalb nicht einfach auf. Entsprechende Modellanalysen des Strahlungsantriebs weichen um einen Faktor 2 bis 3 voneinander ab.

Schwefelhaltige Aerosolteilchen und Russ haben – neben ihrem Einfluss auf die Bildung von Kondensstreifen – einen direkten Strahlungseffekt: Russ bewirkt eine Erwärmung, Schwefel eine Kühlung. Die Grössenordnung der jeweiligen Klimawirkung ist bekannt.

Mögliche Effekte von CO_2 und Russ auf die Veränderung der allgemeinen Wolkenbedeckung (zusätzlich zu Kondensstreifeneffekten) sind kaum untersucht und wenig verstanden. Die Angaben in der Literatur liegen weit auseinander.

Wie aus Tabelle 2 ersichtlich ist, bilden die Kondensstreifen und daraus gebildete hohe Zirren-Bewölkung den weitaus wichtigsten Effekt der Nicht-CO_2-Emissionen.

3. Unterschiedliche Eigenschaften erschweren Vergleichsrechnungen

Unterschiedliche Lebensdauer

Die verschiedenen Emissionskomponenten des Flugverkehrs bewirken unterschiedlich lange andauernde Störungen. Während die Klimawirkung von Kondensstreifen und der Emission von NO_x, Russ und Schwefel nach wenigen Stunden bis zu einigen Jahren abklingt, bleibt ein wesentlicher Teil der CO_2-Emissionen über Jahrhunderte bis Jahrtausende in der Atmosphäre.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen CO_2 und den anderen, kurzlebigen Substanzen zeigt sich bei einer angenommenen Stabilisierung der Emissionen aus dem Flugverkehr: Die Konzentration und Klimawirkung der kurzlebigen Substanzen bleibt nach einigen Jahren konstant und verursacht ab diesem Zeitpunkt keine zusätzliche Erwärmung mehr. Das CO_2 jedoch sammelt sich auch bei konstanten Emissionen in der Atmosphäre immer mehr an und erwärmt unseren Lebensraum ungebremst weiter. Um die Klimawirkung des Flugverkehrs zu stabilisieren, müssten daher die CO_2-Emissionen auf netto null verringert werden. Die Emissionen von kurzlebigen Substanzen müssen hingegen «nur» stabilisiert werden, bei einer Verringerung entsteht eine kühlende Wirkung im Vergleich zu heute.

Räumliche Unterschiede

Eine Herausforderung bei der Berechnung der Klimawirkung der Nicht-CO_2-Emissionen bildet die unterschiedliche Wirkung der verschiedenen Emissionen je nach Umgebungsverhältnissen wie Feuchtigkeit oder Hintergrundkonzentration. Dazu kommt die unterschiedliche Verteilung der Nicht-CO_2-Emissionen. So weist die Wirkung auf das Ozon eine regionale bis hemisphärische Verteilung auf, die Wirkung der Kondensstreifen konzentriert sich hingegen auf die hauptsächlichen Flugrouten. Dazu gibt es jedoch nur sehr wenige Studien (z. B. Schumann & Mayer 2017) mit sehr unterschiedlichen Ergebnissen. Ein regional unterschiedliches Erwärmungsmuster durch räumlich inhomogene Strahlungsveränderungen ist jedoch kaum feststellbar.

Unterschiedliche Temperaturwirkung

Der durch die verschiedenen Substanzen hervorgerufene Strahlungsantrieb hat auch unterschiedliche Wirkung auf die Temperatur, da unterschiedliche physikalische Prozesse beteiligt sind. Dieser Effekt wird im «Global Temperature Potential» (GTP)[5] berücksichtigt, im «Global Warming Potential» (GWP) und im Strahlungsantrieb (RF) hingegen nicht.

5 Das «Global Temperature Potential» (Globales Temperaturpotenzial; GTP) beschreibt die augenblickliche Wirkung heutiger Emissionen auf die Temperatur zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Zukunft im Vergleich zu einer Emission der gleichen Menge CO_2. Das GTP ist abhängig vom betrachteten Zeithorizont.

4. Abschätzung der gesamten Klimawirkung der Flugverkehrsemissionen

Der Vergleich der Klimawirkung von CO_2 und von kurzlebigen Nicht-CO_2-Emissionen ist generell schwierig und mit relativ grossen Unsicherheiten verbunden. Das in der UN-Klimarahmenkonvention und den Treibhausgasinventaren verwendete Vergleichsmass des GWP_{100} ist dafür kaum geeignet, da es auf in der Atmosphäre ziemlich homogen verteilte Treibhausgase mit längerer Verweilzeit in der Atmosphäre und den langfristigen Zeithorizont von 100 Jahren ausgerichtet ist. Trotzdem werden das GWP und ähnliche Masse mangels besserer Alternativen verwendet.

Die gebräuchlichen Masszahlen Strahlungsantrieb, GWP und GTP beschreiben unterschiedliche Aspekte der Klimawirkung (Tabelle 3). Deshalb ist es wichtig, dass – je nach Fragestellung und deren Charakteristik – diejenige Masszahl verwendet wird, die diese Charakteristik am adäquatesten beschreibt.

Der Strahlungsantrieb beschreibt die momentane Wirkung aufgrund der seit der vorindustriellen Zeit beobachteten Emissionen. Dieses Mass ist jedoch für den Vergleich der Wirkung heutiger Emissionen in der Zukunft ungeeignet, da sich CO_2 akkumuliert und damit die Wirkung der CO_2-Emissionen gegenüber derjenigen der Nicht-CO_2-Emissionen mit der Zeit zunimmt. Für den Vergleich zukünftiger Wirkungen werden das GWP oder das GTP verwendet. Das GWP berechnet den über einen bestimmten Zeitraum von typischerweise 20, 50 oder 100 Jahren integrierten Strahlungsantrieb einer einmaligen Emission. Es berücksichtigt durch die zeitliche Integration auch kurzlebige Wirkungen. Das GTP berechnet die durch einen einmaligen Emissionspuls zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Zukunft bewirkte Veränderung der Temperatur. Dadurch, dass nur die Wirkung in ferner Zukunft betrachtet wird, erfasst diese Grösse bei der Betrachtung längerer Zeithorizonte (50 oder 100 Jahre) die Wirkung kurzlebiger Substanzen praktisch gar nicht. Die Wahl des betrachteten Zeithorizonts von GWP bzw. GTP ist demnach abhängig von der Fragestellung bzw. davon, welches Gewicht der Erwärmung in den nächsten paar Dekaden beigemessen wird. Bei einem Zeithorizont von 20 Jahren sind die kurzlebigen Wirkungen stark übergewichtet, bei 100 Jahren sind sie untergewichtet (siehe Grafik 1).

In jüngster Zeit wurde in der Literatur eine weitere Grösse beschrieben, das GWP* («Equivalent Warming Potential») (Allen et al. 2018; Cain et al. 2019), welches die Tatsache berücksichtigt, dass kurzlebige Effekte – im Gegensatz zu CO_2 – bei gleichbleibenden Emissionen keine Temperaturerhöhung mehr bewirken und die bewirkte Temperaturerhöhung hauptsächlich von der Änderung der Emissionen abhängt. Das GWP* ist grösser als null, wenn die Emissionen von kurzlebigen Substanzen ansteigen und kleiner als null, wenn die Emissionen von kurzlebigen Substanzen sinken. Das GWP* wurde für die Berechnung von verbleibenden Emissionsbudgets für die Einhaltung bestimmter Temperaturziele oder die Wirkung von Emissionsminderungspfaden entwickelt. Das GWP* ist relativ unabhängig vom Zeithorizont (siehe Grafik 2).

Die Indizes und die entsprechenden Abschätzungen ihrer Werte sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Gebräuchlichste Umrechnungsfaktoren in der verfügbaren Literatur für die Berechnung der totalen Klimawirkung der Flugverkehrsemissionen im Vergleich zur Klimawirkung von CO_2 allein.

Verwendete Metrik	Inhalt	Umrechnungsfaktor (Schätzwert)
Strahlungsantrieb (RF)	Momentane Strahlungswirkung aufgrund der vorangegangenen und aktuellen Emissionen.	1 bis 3[6]
Global Temperature Potential (GTP)	Temperaturwirkung eines heutigen Emissionspulses nach x Jahren.	20 Jahre: 1 bis 1,6 50 Jahre: ca. 1,2 100 Jahre: ca.1,1
Global Warming Potential (GWP)	Über die nächsten x Jahre integrierter Strahlungsantrieb, welcher aus einem heutigen Emissionspuls resultiert.	20 Jahre: ca. 4,5 50 Jahre: ca. 3 100 Jahre: ca. 2
Equivalent Warming Potential (GWP*)	Durch die Veränderung der Emissionen von kurzlebigen Substanzen bewirkte Veränderung der globalen Temperatur.	ca. 4[7]

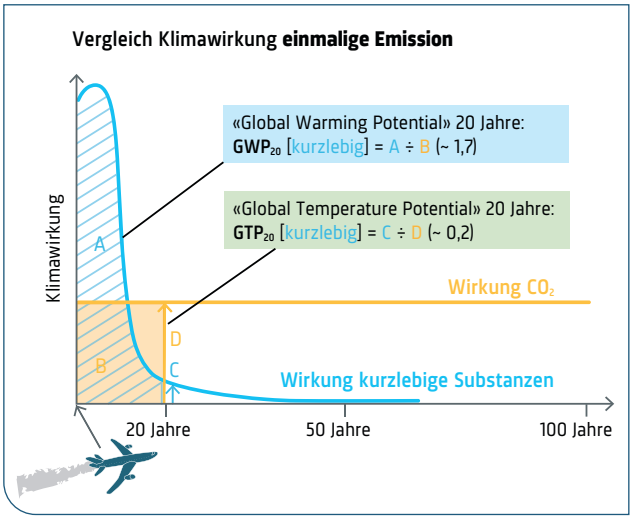
Quellen: Lee et al. 2010; Fuglestvedt et al. 2010; Allen et al. 2018.

Zwei Studien (Ponater et al. 2005; Schumann & Mayer 2017) weisen darauf hin, dass die effektive Temperaturwirkung von Kondensstreifen bei gleichem Strahlungsantrieb etwa halb so gross ist wie für CO_2. Für die anderen Nicht-CO_2-Emissionen des Flugverkehrs liegt die Temperaturwirkung etwas höher als beim CO_2. Trotz bestehenden Unsicherheiten wird dies für die Schätzungen der Umrechnungsfaktoren berücksichtigt. Und da Kondensstreifen und Zirren den weitaus grössten Teil der Nicht-CO_2-Wirkung ausmachen, werden die auf dem GWP und GWP* basierenden Metriken hier mit dem Faktor 0,5 multipliziert (im GTP ist dies bereits berücksichtigt).

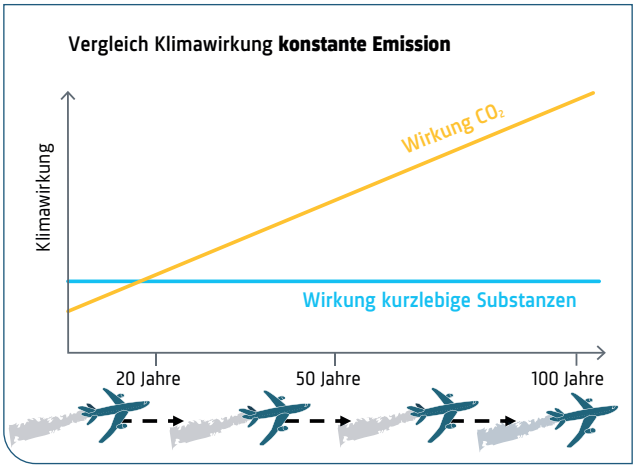
6 In der Literatur oft als Strahlungsantriebsindex bezeichnet.

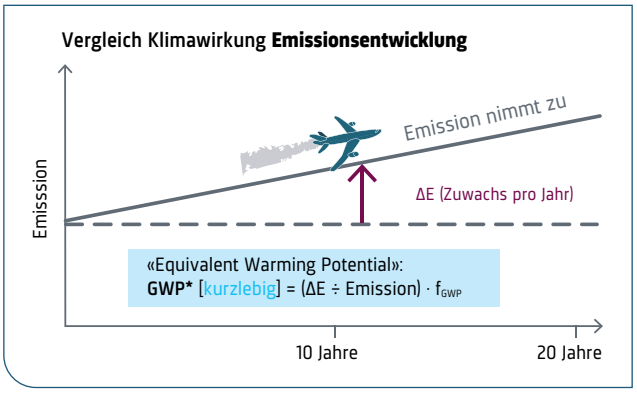
7 Geschätzt aufgrund der Wachstumsrate der Flugverkehrsemissionen der letzten zehn Jahre (2007–2017) in der Schweiz.

Im Folgenden sind die wichtigsten Fragestellungen und die Wahl des passenden Faktors kurz diskutiert. Dabei ist zu beachten, dass sich die angegebenen Faktoren mit der Zeit verändern, auch in Abhängigkeit von Massnahmen zur CO_2-Minderung (siehe Tabelle 5). Bei Verwendung der heutigen Technik wird der Faktor längerfristig abnehmen, da CO_2 akkumuliert wird. Mit dem Einsatz von alternativen, teilweise bis vollständig CO_2-neutralen Treibstoffen wie Bio-Kerosin oder synthetisches Kerosin könnte der Faktor aber auch ansteigen, da bei deren Einsatz die Kondensstreifen- bzw. Zirren-Bildung nicht in ähnlichem Mass abnimmt wie die CO_2-Emissionen.



Grafik 1: Schematische Darstellung der Berechnung der Klimawirkung einer einmaligen Emission: Berechnung über das «Global Warming Potential» (GWP) und «Global Temperature Potential» (GTP) jeweils für kurzlebige und langlebige klimawirksame Substanzen (langlebige am Beispiel CO_2). Das GWP und GTP über 100 Jahre werden analog zum GWP bzw. GTP über 20 Jahre berechnet.





Grafik 2: Vergleich der Klimawirkung konstanter Emissionen: Oben: Vergleich der Klimawirkung konstanter Emissionen von kurzlebigen Substanzen und langlebigen Substanzen (am Beispiel von CO_2). Unten: Berechnung des «Equivalent Warming Potential» GWP* anhand der Emissionsentwicklung der kurzlebigen Substanzen (ΔE: Emissionsveränderung über die vergangenen Jahre; f_{GWP}: Faktor in Abhängigkeit des «Global Warming Potential» der kurzlebigen Substanz).

5. Wahl der Metrik

Aktuelle Klimawirkung

Für die Wirkung der bisherigen Emissionen ist der aktuelle Strahlungsantrieb ein sinnvolles Mass. Aus den gegenwärtigen Abschätzungen ergibt sich für den Strahlungsantriebsindex ungefähr ein Faktor 2,5 (siehe Tabelle 3).

Erreichung des Temperaturziels

Für die Frage, welchen Einfluss aktuelle Emissionen auf die Stabilisierung der Temperatur haben, ist primär der Temperatureinfluss zum Zeitpunkt, an dem dieses Ziel erreicht werden soll, entscheidend. Dies wird durch das GTP ausgedrückt.

Für die Frage, wie die Emissionsentwicklung aussehen muss, um dieses Ziel zu erreichen, sind GTP und GWP nicht geeignet, da sie weder auf rückläufige Emissionen noch auf kurzlebige Substanzen ausgerichtet sind. Für diese Frage wurde das GWP* entwickelt, dass den Vergleich von kurz- und langlebigen Substanzen erlaubt und die Wirkung verschiedener Emissionspfade und vor allem auch Absenkungspfade bzw. Minderungsszenarien erfassen kann (Allen et al. 2018). Auch für die Berechnung von Emissionsbudgets – das heisst die zur Erreichung eines Temperaturziels noch zur Verfügung stehende Emissionsmenge – ist der GWP*-Ansatz die geeignetste Metrik. Gemäss Treibhausgasinventar betrug das Wachstum der Emissionen im Flugverkehr in der Schweiz in den letzten zehn Jahren (2007–2017) rund 1,5 Prozent pro Jahr.

Kompensation für aktuelle Emissionen

Im Zusammenhang mit Kompensationsmassnahmen für aktuelle Emissionen ist die Wahl der geeigneten Metrik abhängig von Wertsetzungen, das heisst der (gesellschafts-)politischen Wahl, welcher Aspekt bzw. welche Aspekte im Vordergrund stehen sollen. Soll vor allem die zukünftige Wirkung der aktuellen Emission kompensiert werden, so stehen GWP und GTP im Vordergrund. Sollen kurz- und langfristige Wirkungen berücksichtigt werden, wird dies durch das GWP am besten repräsentiert. Das GTP erfasst praktisch ausschliesslich die Wirkung in der Zukunft, entsprechend dem gewählten Zeithorizont. Für die langfristige Betrachtung ist der Zeithorizont von 100 Jahren üblich. Hier wird vor allem berücksichtigt, dass einige Effekte relativ rasch wieder verschwinden, und deshalb längerfristig weniger bedeutsam sind. Stellt man hingegen die Entwicklung in der näheren Zukunft, das heisst die nächsten paar Jahrzehnte oder den Zeithorizont 2050 in den Vordergrund, würde das etwa 30 Jahren entsprechen. Ein Zeithorizont von 50 Jahren würde dann kurz- und langfristige Effekte ungefähr ähnlich gewichten.

Tabelle 4: Schätzwerte der Umrechnungsfaktoren zur Berechnung der gesamten CO_2-Äquivalent-Emissionen aus den CO_2-Emissionen, in Abhängigkeit des betrachteten Zeithorizonts; berechnet auf Basis des «Global Warming Potentials» GWP bzw. des «Global Temperature Potentials» GTP und unter Berücksichtigung der geringeren Temperaturwirkung des Strahlungsantriebs von Kondensstreifen und Zirren-Bewölkung (Faktor 0,5 beim GWP).

Betrachtungsweise (Gesichtspunkte im Vordergrund)	Zeithorizont	Faktor basierend auf GWP	Faktor basierend auf GTP
• Zeithorizont des Netto-Null-Ziels (2050) • Für die heutige Bevölkerung relevanter Zeithorizont • Überproportionale Gewichtung der kurzfristigen Effekte durch Nicht-CO_2-Emissionen	30 Jahre	2,7	1,3
• Ähnliche Gewichtung der kurz- und der langfristigen Wirkung	50 Jahre	2	1,1
• Überproportionale Gewichtung der langfristigen Wirkung • Fokussiert auf die über lange Zeit irreversiblen Effekte	100 Jahre	1,5	1

Tabelle 4 zeigt die entsprechenden Schätzwerte der Umrechnungsfaktoren für die verschiedenen Zeithorizonte, berechnet auf der Basis des GWP und unter Berücksichtigung der effektiven Temperaturwirkung sowie des GTP. Setzt man hingegen die Auswirkung der aktuellen Emissionen auf angestrebte Emissionsminderungspfade oder die Einhaltung von Emissionsbudgets in den Vordergrund, so ist das GWP* die geeignete Metrik. Das GWP* ist relativ unabhängig vom betrachteten Zeithorizont.

Wirkung politischer Interventionen

Im Falle von politischen Interventionen kann die Anwendung genereller Umrechnungsfaktoren für die Klimawirkung der Nicht-CO_2-Emissionen unter Umständen zu Fehlanreizen führen.

Politische Interventionen auf der Konsumseite wie eine Flugticketabgabe streben vor allem eine Reduktion des Flugverkehrs an. Diese sollen zu einer Reduktion aller Emissionen und Klimawirkungen führen und sind somit die wirksamste Massnahme zur Emissionsminderung. Die Verwendung eines konstanten Faktors (siehe Tabelle 4) zur Berechnung der totalen Klimawirkung ist in diesem

Fall sinnvoll. Die Wahl der Metrik ist wiederum abhängig von der Gewichtung der verschiedenen Aspekte, wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben.

Im Falle von politischen Interventionen beim Operator hingegen, beispielsweise ein Emissionshandelssystem oder das globale System CORSIA (ICAO 2016), können unter Umständen auch Fehlanreize entstehen, da die Wirkung technischer oder operationeller Massnahmen auf die verschiedenen Emissionskomponenten sehr unterschiedlich sein kann (siehe Tabelle 5) und damit der Umrechnungsfaktor verändert wird. So können beispielsweise bei technischen Massnahmen, die zu einer Reduktion des Treibstoffverbrauchs führen, unter Umständen die NO_x-Emissionen ansteigen. Oder beim Einsatz von mehr oder weniger CO_2-neutralen Treibstoffen wie Biotreibstoffen oder synthetischem Kerosin wird zwar die CO_2-Wirkung stark reduziert, die Nicht-CO_2-Emissionen und ihre Wirkung hingegen können ähnlich bleiben. Das Umfliegen von feuchten Luftmassen oder eine tiefere Flughöhe kann zwar die Kondensstreifenbildung senken, erhöht aber gleichzeitig den Treibstoffbedarf und damit die CO_2-Emissionen. Bei all diesen Massnahmen entstehen Zielkonflikte und es empfiehlt sich deshalb, die CO_2-Emissionen und Nicht-CO_2-Emissionen getrennt zu betrachten. Für die Beurteilung der Wirkung der Nicht-CO_2-Emissionen ist der GWP*-Ansatz wohl am besten geeignet, da er Emissionswachstum belastet und Emissionsminderungen «belohnt».

Tabelle 5: Wirkung von technischen oder operationellen Massnahmen im Flugverkehr auf die Klimawirkung durch CO_2- bzw. Nicht-CO_2-Emissionen (Kondensstreifen, NO_x, SO_2, Russ).

Massnahmengruppe	CO_2-Wirkung	Nicht-CO_2-Wirkungen
Einsatz von Bio-Kerosin oder synthetischem Kerosin	sinkt	tendenziell wenig sinkend
Reduktion Treibstoffverbrauch (pro Tonnen- ohne Personen-Kilometer)	sinkt	sinkt
Umfliegen feuchter Luftmassen	steigt	sinkt
Wasserstoffantrieb (kleinere Flugzeuge, kurze Strecken)	sinkt	steigend
Kerosin-elektrischer Hybrid (mit erneuerbarem Strom; kurze Strecken)	sinkt	sinkt

Referenzen

Akademien der Wissenschaften Schweiz (2019) **Instrumente für eine wirksame und effiziente Klima- und Energiepolitik**. Swiss Academies Factsheets 14 (4). www.proclim.ch/id/ejUCr

Allen MR et al. (2018) **A solution to the misrepresentations of CO_2-equivalent emissions of short-lived climate pollutants under ambitious mitigation**. Npj Climate and Atmospheric Science 1: 16. doi:10.1038/s41612-018-0026-8

Bickel M et al. (2019) **Effective radiative forcing and rapid adjustments of contrail cirrus**. 27. IUGG General Assembly, 8-18 Jul 2019, Montreal, Canada. https://elib.dlr.de/129731/1/Bickel_IUGG_2019.pdf

Bock L, Burkhardt U (2016) **The temporal evolution of a long-lived contrail cirrus cluster: Simulations with a global climate model**. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 121: 3548–3565. doi:10.1002/2015JD024475

Brasseur GP et al. (2015) **Impact of aviation on climate: FAA's Aviation Climate Change Research Initiative (ACCRI) Phase II**. Bulletin of the American Meteorological Society 98: 561–584. doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00089.1

Burkhardt U, Kärcher B (2011) **Global radiative forcing from contrail cirrus**. Nature Climate Change 1: 54–58. doi: 10.1038/nclimate1068

Cain M et al. (2019) **Improved calculation of warming-equivalent emissions for short-lived climate pollutants**. Npj Climate and Atmospheric Science 2: 29. doi.org/10.1038/s41612-019-0086-4

Chen C-C, Gettelman A (2013) **Simulated radiative forcing from contrails and contrail cirrus**. Atmospheric Chemistry and Physics 13: 12525–12536.

Fahey DW, Lee DS (2016) **Aviation and Climate Change: A Scientific Perspective**. Carbon & Climate Law Review 10: 97–104.

Fahey DW et al. (2016) **White Paper on Climate change Aviation Impacts on Climate: State of Science**. ICAO, Environmental Report 2016: 99–107.

Fuglestvedt JS et al. (2010) **Transport impacts on atmosphere and climate: Metrics**. Atmospheric Environment 44: 4648–4677. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.04.044

Gettelman A, Chen C (2013) **The climate impact of aviation aerosols**. Geophysical Research Letters 40: 2785–2789. doi: 10.1002/grl.50520

ICAO (2016) **What is CORSIA and how does it work?** www.icao.int/environmental-protection/Pages/A39_CORSIA_FAQ2.aspx

IEA (2018) **International Energy Agency** www.iea.org

IPCC (Boucher O, Randall D et al.) (2013) **Clouds and Aerosols. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. www.ipcc.ch/report/ar5/wg1

Jungbluth N, Meili C (2019) **Recommendations for calculation of the global warming potential of aviation including the radiative forcing index**. International Journal of Life Cycle Assessment 24: 404–411. doi.org/10.1007/s11367-018-1556-3

Kärcher B (2018) **Formation and radiative forcing of contrail cirrus**. Nature Communications 9: 1824.

Lee DS et al. (2009) **Aviation and global climate change in the 21st century**. Atmospheric Environment 43: 3520–3537.

Lund MT et al. (2017) **Emission metrics for quantifying regional climate impacts of aviation**. Earth System Dynamics 8: 547–563. doi.org/10.5194/esd-8-547-2017

Ponater M et al. (2005) **On contrail climate sensitivity**. Geophysical Research Letters 32: L10706. doi:10.1029/2005GL022580

Ponater M et al. (2006) **Potential of the cryoplane technology to reduce aircraft climate impact: A state-of-the-art assessment**. Atmospheric Environment 40: 6928–6944.

Schumann U, Graf K (2013) **Aviation-induced cirrus and radiation changes at diurnal timescales**. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 118: 2404–2421. doi: 10.1002/jgrd.50184

Schumann U, Mayer B (2017) **Sensitivity of surface temperature to radiative forcing by contrail cirrus in a radiative-mixing model**. Atmospheric Chemistry and Physics 17: 13833–13848.

Søvde OA et al. (2014) **Aircraft emission mitigation by changing route altitude: A multimodel estimate of aircraft NO_x emission impact on O_3 photochemistry**. Atmospheric Environment 95: 468-479.

Spangenberg DA et al. (2013) **Contrail radiative forcing over the Northern Hemisphere from 2006 Aqua MODIS data**. Geophysical Research Letters 40: 595–600. doi:10.1002/grl.50168

Wer sind wir?

Die Akademien der Wissenschaften Schweiz vernetzen die Wissenschaften regional, national und international. Sie engagieren sich insbesondere in den Bereichen Früherkennung und Ethik und setzen sich ein für den Dialog zwischen Wissenschaft und Gesellschaft.

Die Akademien der Wissenschaften Schweiz sind ein Verbund der vier wissenschaftlichen Akademien der Schweiz:
- Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT)
- Schweizerische Akademie der Medizinischen Wissenschaften (SAMW)
- Schweizerische Akademie der Geistes- und Sozialwissenschaften (SAGW)
- Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften (SATW)

sowie der Kompetenzzentren
- Zentrum für Technologiefolgenabschätzung (TA-SWISS)
- Stiftung Science et Cité

SCNAT – vernetztes Wissen im Dienste der Gesellschaft

Die Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT) engagiert sich regional, national und international für die Zukunft von Wissenschaft und Gesellschaft. Sie stärkt das Bewusstsein für die Naturwissenschaften als zentralen Pfeiler der kulturellen und wirtschaftlichen Entwicklung. Ihre breite Abstützung macht sie zu einem repräsentativen Partner für die Politik. Die SCNAT vernetzt die Naturwissenschaften, liefert Expertise, fördert den Dialog von Wissenschaft und Gesellschaft, identifiziert und bewertet wissenschaftliche Entwicklungen und legt die Basis für die nächste Generation von Naturwissenschaftlerinnen und Naturwissenschaftlern. Sie ist Teil des Verbundes der Akademien der Wissenschaften Schweiz.

ProClim ist das Forum für Klima und globalen Wandel der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT). ProClim dient in diesen Themenbereichen als Schnittstelle zwischen Wissenschaft einerseits, und öffentlicher Verwaltung, Politik, Wirtschaft und Öffentlichkeit andererseits und fördert die Kommunikation zwischen diesen Kreisen.