

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 (SO₂), 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 und Kontakt

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

Zitiervorschlag

Neu U (2021) Die Auswirkungen der Flugverkehrsemissionen auf das Klima.
Swiss Academies Communications 16 (3).

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

2. Auflage, 2021 (online)

Der vorliegende Bericht ist eine aufdatierte Version der Swiss Academies Communications Vol. 15 (9).
Bericht in elektronischer Form unter scnat.ch/de/id/cSx4y

ISSN (online) 2297-1807 · DOI: doi.org/10.5281/zenodo.4767530



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 (CO₂) verschiedene weitere Komponenten, die eine Wirkung auf das Klima erzeugen, insbesondere Wasserdampf (H₂O), Stickoxide (NO_x), Schwefeldioxid (SO₂) und Russ. Die CO₂-Emissionen und deren Klimawirkung sind gut bekannt. Kenntnisse zur Klimawirkung der Nicht-CO₂-Emissionen sind noch sehr ungenau.
- Nach aktuellem Kenntnisstand verursachen Kondensstreifen und die daraus gebildete hohe dünne Bewölkung (Zirren) die grösste Klimawirkung der Nicht-CO₂-Emissionen, eine deutlich höhere als der Effekt von CO₂. NO_x-Emissionen bewirken wärmende wie kühlende Effekte, in der Summe eine etwa halb so grosse Erwärmung wie die CO₂-Emissionen. Die Wirkungen von SO₂- und Russ-Emissionen sind vergleichsweise wahrscheinlich eher klein.
- Um die Klimawirkung der Flugverkehrsemissionen zu stabilisieren, müssen die CO₂-Emissionen auf netto null gesenkt werden, die Nicht-CO₂-Emissionen hingegen dürfen nicht weiter ansteigen. Für eine Reduktion der Klimawirkung (im Einklang mit dem 1,5-Grad-Ziel) braucht es eine Senkung der Nicht-CO₂-Emissionen – verglichen mit Stand heute – oder netto «negative» CO₂-Emissionen.
- Die im Rahmen der UN-Klimarahmenkonvention (UNFCCC) (Paris, Kyoto) verwendete Umrechnungsmetrik in CO₂-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. Technische Massnahmen am Flugzeug haben meist unterschiedliche Wirkungen auf die CO₂ und die Nicht-CO₂-Emissionen.

Für die Berechnung der Klimawirkung der Flugzeugemissionen werden die je nach Fragestellung bzw. Optik zur Verwendung empfohlenen Faktoren (Multiplikation mit CO₂-Emissionen für die Berechnung von CO₂-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 CO₂ in der Atmosphäre (die Faktoren werden dadurch kleiner), CO₂-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: Strahlungsantrieb bzw. effektiver Strahlungsantrieb), Stand 2018 (Berechnung des Anteils der Flugemissionen an der bisherigen Erwärmung)	3
Wirkung auf das verbleibende Emissionsbudget bzw. für Emissionsabsenkungspfade für die Erreichung von Temperaturzielen (Basis GWP*)	3
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)	3 / 2,3 / 1,7
– Fokus auf die Wirkung bzgl. Einhaltung von Emissionsbudgets bzw. von Emissionspfaden; geeignet für Mitigationsszenarien (Basis: GWP*)	3
– Temperaturwirkung aktueller Emissionen zu einem Zeitpunkt in der Zukunft, je nach Zeithorizont (30, 50, 100 Jahre, Basis GTP)	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])	[1,7] 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, GWP₁₀₀ auf Basis RF) ergibt. Dieser liegt etwas tiefer als die meisten anderen Metriken. Würde man die CO₂-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 CO₂-Emissionen gleichgesetzt, was etwa 8,5% der Gesamtemissionen entspricht.

1. Einleitung

Der Anteil der Kohlendioxid-Emissionen (CO₂) aus dem weltweiten Luftverkehr beträgt 2 bis 2,5 Prozent an den globalen durch Menschen verursachten fossilen CO₂-Emissionen (IEA 2018). In der Schweiz betrug der Anteil des nationalen und internationalen Luftverkehrs im Jahr 2019 ca. 13,5 Prozent an den erfassten Gesamtemissionen von CO₂ und rund 11 Prozent an allen Treibhausgasen (CO₂-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 CO₂-Emissionen aus dem Flugverkehr bereits halb so gross wie diejenigen des motorisierten Individualverkehrs. Bei gleichem Wachstum beim Flugverkehr und tieferen Emissionswerten von Personenzug werden sich diese Anteile rasch weiter annähern. Die Klimawirkung des Flugverkehrs erhält deshalb vermehrte Aufmerksamkeit. Durch die Auswirkungen der COVID-19-Pandemie wurde das Wachstum des Flugverkehrs 2020 allerdings abrupt gestoppt und es ist unklar, wie sich dessen Umfang in naher Zukunft entwickeln wird und ob die vorherigen Wachstumsraten wieder erreicht werden.

Die Emissionen des Flugverkehrs enthalten neben CO₂ verschiedene weitere Komponenten, die eine Wirkung auf das Klima erzeugen, insbesondere Wasserdampf, Stickoxide (NO_x), Schwefeldioxid (SO₂) und Russ. Während die CO₂-Emissionen und deren Klimawirkung gut bekannt sind, sind Angaben bezüglich der Klimawirkung dieser Nicht-CO₂-Emissionen mit grossen Unsicherheiten

behaftet und beruhen auf Abschätzungen aus vergleichsweise wenigen Studien.

Die Klimawirkung der Nicht-CO₂-Emissionen des Flugverkehrs wird vom Treibhausgasinventar nicht erfasst, da es sich dabei nicht um Treibhausgase handelt (im Treibhausgasinventar sind die Flugverkehrsemissionen praktisch identisch mit den CO₂-Emissionen). Die Wirkung findet über einen relativ kurzen Zeitraum von Stunden bis einigen Jahren statt. Ein Vergleich mit CO₂ ist deshalb sehr schwierig. Das «Global Warming Potential» (GWP)², das im Treibhausgasinventar für die Berechnung der CO₂-Äquivalente anderer Treibhausgase (Methan, Lachgas etc.) verwendet wird, ist nicht auf die kurzfristigen Wirkungen solcher Nicht-CO₂-Emissionen ausgerichtet, wird aber mangels Alternativen und dem Wunsch nach einheitlicher Berechnungsweise bisher trotzdem oft verwendet.

Eine kürzlich veröffentlichte, umfangreiche Studie (Lee et al. 2021), die auch als Grundlage für den Sechsten Sachstandsbericht des IPCC dient, hat die Wirkung der verschiedenen Komponenten eingehend analysiert. Demnach bewirken die aufgrund der Emission von Wasserdampf und Partikeln gebildeten Kondensstreifen und die daraus entstehende bleibende Zirren-Bewölkung den weitaus grössten Klimaeffekt der Nicht-CO₂-Emissionen des Flugverkehrs – ein deutlich höherer als der Effekt von CO₂ –, gefolgt von den Auswirkungen der Stickoxide.

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

¹ Im Jahr 2019 betragen gemäss Treibhausgasinventar der Schweiz die Emissionen inklusive internationalem Flugverkehr 42,5 Mio. t CO₂ bzw. 52 Mio. t CO₂-Äquivalente. Die Emissionen des nationalen und internationalen Flugverkehrs betragen ca. 5,8 Mio. t CO₂ (davon ca. 0,11 Mio. t national) bzw. 5,9 Mio. t CO₂-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 CO₂-Emissionen des Flugverkehrs gemäss Kyoto-Protokoll (Abflüge ab Schweiz) betragen demnach im Jahr 2019 rund 13,5% der Gesamtemissionen von CO₂ bzw. 11% der Gesamtemissionen von Treibhausgasen (CO₂-Äquivalente) relativ zum Total inklusive internationalem Flugverkehr. Im Vergleich dazu beträgt der Anteil des motorisierten Individualverkehrs 25,5% bzw. 21% an den CO₂- bzw. CO₂-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 CO₂ pro Passagier und Kilometer (Durchschnitt bei Flügen ab der Schweiz) ca. 810 kg CO₂ pro Einwohner und Jahr bzw. geschätzten 6,9 Mio. t CO₂ für die Schweizer Bevölkerung. Die «grauen» CO₂-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-CO₂-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 CO₂ in gleicher Menge. Das GWP ist abhängig vom Zeithorizont, der meist auf 100 Jahre gesetzt wird (GWP₁₀₀).

2. Die Emissionskomponenten und Wirkungsmechanismen

Die Emissionen von SO₂ und NO_x sowie Russ führen einerseits zu einem direkten Strahlungsantrieb³ durch Reflexion von Sonnenstrahlung oder Absorption von Wärmestrahlung. Andererseits 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 Klimateffekte quantifizieren zu können, sind Kenntnisse und eine detaillierte Analyse der zahlreichen chemischen und physikalischen Prozesse unter verschiedenen Wetterbedingungen in der Atmosphäre notwendig.

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 ₂ O)	• Treibhausgaswirkung (erwärmend) • Fördert Bildung von Kondensstreifen und kann zur Bildung zusätzlicher Zirren (Federwolken) führen (bewirkt H ₂ O-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 die Ozonbildung und die Wasserdampfkonzentration (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; Lee et al. 2021; EC Report 2020; siehe Tabelle 2).

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).

Tabelle 2: Durch die Verbrennung von Kerosin emittierte Stoffe und der entsprechende Strahlungsantrieb⁴ relativ zu vorindustriellen Verhältnissen (in Klammern der 90-Prozent-Unsicherheitsbereich). Der Strahlungsantrieb nimmt von Jahr zu Jahr zu, solange die Emissionen weiter ansteigen.

Komponente	Strahlungsantrieb für das Jahr 2005 (mW/m ²) ⁴	Strahlungsantrieb für das Jahr 2018 (mW/m ²) ⁴
CO ₂	+25 (+21 bis +29)	+34 (+28 bis +40)
Kondensstreifen (persistente K. und aus K. gebildete Zirren)	+35 (+10 bis +60)	+57 (+15 bis +100)
NO _x (netto) über	+13 (+2 bis +20)	+17,5 (0 bis +30)
• Ozonanstieg	+33 (+21 bis +51)	+49 (+32 bis +76)
• Methanabbau	-13 (-9 bis -25)	-21 (-15 bis -40)
• Ozonabbau via Methan	-7 (-4 bis -13)	-11 (-7 bis -20)
• Wasserdampfabbau via Methan	-2 (-1 bis -4)	-3 (-2 bis -6)
H ₂ O (Emission)	+1,5 (+0,5 bis +2,5)	+2 (+1 bis +3)
SO ₂ (direkter Aerosoleffekt)	-5 (-2 bis -13)	-7 (-2 bis -19)
Russ	+0,7 (+0,1 bis +3)	+1 (+0,1 bis +4)
SO ₂ (via Aerosolbildung) und Russ über Wolkenbildung	Quantifizierung sehr unsicher	Quantifizierung sehr unsicher
Total Nicht-CO₂-Effekte (netto)	+42 (+14 bis +69)	+67 (+21 bis +110)

Quelle: Lee et al. 2021.

Die Nicht-CO₂-Effekte sind stark abhängig von der Flughöhe, der geographischen Lage, der Tageszeit und der Wettersituation. Die Berechnung der Klimawirkung ist dadurch sehr anspruchsvoll. Die wichtigsten Komponenten und Wirkungen sind (siehe auch Tabelle 1):

Der direkte Strahlungsantrieb bzw. die Treibhausgaswirkung von CO₂ kann quantitativ aus dem Treibstoffverbrauch und dem Kohlenstoffgehalt des Treibstoffs relativ genau berechnet werden.

Bei der Bildung von Kondensstreifen werden die Wirkungen von persistenten linearen Kondensstreifen und von hoher Zirren-Bewölkung, die sich aus den Kondens-

⁴ Die angegebenen Werte entsprechen dem effektiven Strahlungsantrieb («Effective Radiative Forcing», ERF), das Anpassungen in der unteren Atmosphärenschicht (Troposphäre) berücksichtigt, im Gegensatz zum «Radiative Forcing» (RF), das nur Anpassungen in der Stratosphäre erlaubt. In diesem Papier wird für den Strahlungsantrieb das ERF verwendet, das die unterschiedliche Wirkung des RF der verschiedenen Komponenten auf die Temperatur berücksichtigt. Auch für die Berechnung des GWP wurden ERF-Werte verwendet.

streifen bildet, unterschieden. Beide wirken erwärmend, letztere haben eine deutlich grössere Wirkung. Hier konnten in den letzten Jahren in Klimamodellrechnungen die Kopplungs- und Rückkopplungseffekte immer besser simuliert werden.

Stickoxide (NO_x) beeinflussen die Konzentrationen von Ozon und Methan, mit verschiedenen, sowohl kühlenden 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. Hier liegen Schätzwerte für die einzelnen Effekte sowie die Gesamtwirkung vor.

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 und es gibt noch keine integralen Schätzwerte.

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. Eine Minderung der Nicht- CO_2 -Emissionen bewirkt hingegen eine Minderung der Klimawirkung.

Beim CO_2 braucht es für eine Minderung «negative» Emissionen, das heisst eine Entfernung von CO_2 aus der Luft. Eine Reduktion des Strahlungsantriebs, die für die Einhaltung des 1,5-Grad-Ziels wahrscheinlich notwendig ist, kann demnach sowohl durch die Senkung der Nicht- CO_2 -Emissionen – verglichen mit Stand heute – als auch durch negative CO_2 -Emissionen erreicht werden.

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 hauptsächlichsten 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.

4. Abschätzung der gesamten Klimawirkung der Flugverkehrsemissionen

Zurzeit werden in den Treibhausgasinventaren im Rahmen des UNFCCC nur Treibhausgase erfasst. Da bei den Flugzeugemissionen CO₂ das einzige relevante Treibhausgas ist, entsprechen die CO₂-Äquivalentemissionen praktisch den CO₂-Emissionen. Die Klimawirkung der Nicht-CO₂-Emissionen wird nicht erfasst. Die Bestrebungen nehmen zu, auch diese Emissionen zu berücksichtigen.

Bisher wurden für die Abschätzung der gesamten Klimawirkung des Flugverkehrs meist die CO₂-Emissionen mit einem Umrechnungsfaktor multipliziert. Dieser Faktor kann aufgrund unterschiedlicher Masszahlen für die Klimawirkung der Nicht-CO₂-Emissionen bestimmt werden. Die Faktoren für die verschiedenen Masszahlen sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Der Vergleich der Klimawirkung von CO₂ und von kurzlebigen Nicht-CO₂-Emissionen ist generell schwierig und mit relativ grossen Unsicherheiten verbunden. Das in der UN-Klimarahmenkonvention und den Treibhausgasinventaren verwendete Vergleichsmass des GWP₁₀₀ 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 «Global Temperature Potential» (GTP)⁵ 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 CO₂ akkumuliert und damit die Wirkung der CO₂-Emissionen gegenüber derjenigen der Nicht-CO₂-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).

Tabelle 3: Gebräuchlichste Umrechnungsfaktoren in der verfügbaren Literatur für die Berechnung der totalen Klimawirkung der Flugverkehrsemissionen im Vergleich zur Klimawirkung von CO₂ allein.

Verwendete Metrik	Inhalt	Umrechnungsfaktor (Schätzwert)
Strahlungsantrieb (ERF)	Momentane Strahlungswirkung aufgrund der vorangegangenen und aktuellen Emissionen.	3 ⁶
Global Temperature Potential (GTP)	Temperaturwirkung eines heutigen Emissionspulses nach x Jahren.	20 Jahre: ca. 1,3 50 Jahre: ca. 1 100 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 50 Jahre: ca. 2,3 100 Jahre: ca. 1,7
Equivalent Warming Potential (GWP*)	Durch die Veränderung der Emissionen von kurzlebigen Substanzen bewirkte Veränderung der globalen Temperatur.	ca. 3

Quellen: Lee et al. 2021; Allen et al. 2018.

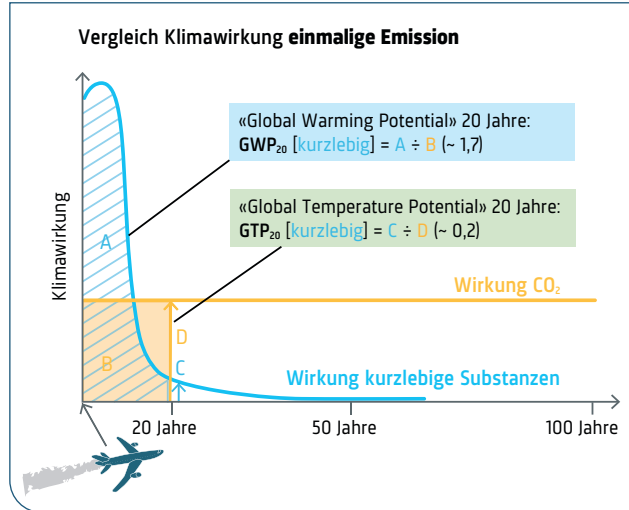
In jüngster Zeit wurde in der Literatur eine weitere Grösse beschrieben, das GWP* («Equivalent Warming Potential») (Allen et al. 2018; Cain et al. 2019), welches die Tatsache berücksichtigt, dass kurzlebige Effekte – im Gegensatz zu CO₂ – bei gleichbleibenden Emissionen keine Temperaturerhöhung mehr 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.

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 CO₂. Das GTP ist abhängig vom betrachteten Zeithorizont.

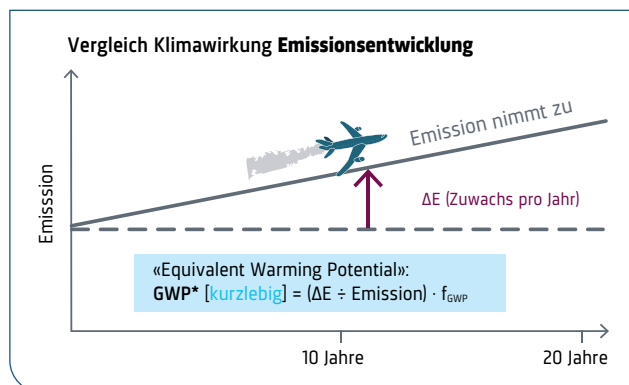
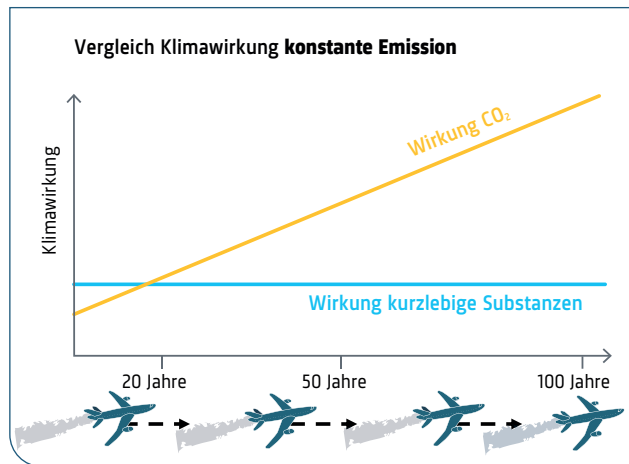
⁶ In der Literatur oft als Strahlungsantriebsindex bezeichnet.

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).

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 CO₂-Minderung (siehe Tabelle 5). Bei Verwendung der heutigen Technik wird der Faktor längerfristig abnehmen, da CO₂ akkumuliert wird. Mit dem Einsatz von alternativen, teilweise bis vollständig CO₂-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 CO₂-Emissionen. Bei Verwendung des GWP* muss der Faktor auch angepasst werden, wenn sich die Änderungsrate der Nicht-CO₂-Emissionen verändert, beispielsweise wenn der Anstieg der Emissionen schwächer wird.



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 CO₂). 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 CO₂).
 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 (Stand 2018) ergibt sich für den Strahlungsantriebsindex ungefähr ein Faktor 3 (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, das 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 oder die Berechnung von CO₂-Äquivalenten in den Treibhausgasinventaren – ist der GWP*-Ansatz die geeignetste Metrik.

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 CO₂-Äquivalent-Emissionen aus den CO₂-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
<ul style="list-style-type: none"> • Zeithorizont des Netto-Null-Ziels (2050) • Für die heutige Bevölkerung relevanter Zeithorizont • Überproportionale Gewichtung der kurzfristigen Effekte durch Nicht-CO₂-Emissionen 	30 Jahre	3	1,3
<ul style="list-style-type: none"> • Ähnliche Gewichtung der kurz- und der langfristigen Wirkung 	50 Jahre	2,3	1
<ul style="list-style-type: none"> • Überproportionale Gewichtung der langfristigen Wirkung • Fokussiert auf die über lange Zeit irreversiblen Effekte 	100 Jahre	1,7	1,1

Quelle: Lee et al. 2021.

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-CO₂-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 CO₂-neutralen Treibstoffen wie Biotreibstoffen oder synthetischem Kerosin wird zwar die CO₂-Wirkung stark reduziert, die Nicht-CO₂-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 CO₂-Emissionen. Da die Wirkung von Massnahmen die CO₂-Emissionen und Nicht-CO₂-Emissionen nicht gleichermassen betrifft, empfiehlt es sich, die CO₂-Emissionen und Nicht-CO₂-Emissionen getrennt zu betrachten. Für die Beurteilung der Wirkung der Nicht-CO₂-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 CO₂- bzw. Nicht-CO₂-Emissionen (Kondensstreifen, NO_x, SO₂, Russ).

Massnahmengruppe	CO ₂ -Wirkung	Nicht-CO ₂ -Wirkungen
Einsatz von Bio-Kerosin oder synthetischem Kerosin	sinkt	tendenziell wenig sinkend
Reduktion Treibstoffverbrauch (pro Tonne- 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 CO₂-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 (ACCR) Phase II**. *Bulletin of the American Meteorological Society* 98: 561–584. doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00089.1
- 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
- EC Report (2020) **Updated analysis of the non-CO₂ climate impacts of aviation and potential policy measures pursuant to EU Emissions Trading System Directive Article 30(4)**. European Commission, SWD(2020) 277 final, Part 1/3. eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=SWD:2020:277:FIN
- Fahey DW et al. (2016) **White Paper on Climate change Aviation Impacts on Climate: State of Science**. ICAO, Environmental Report 2016: 99–107.
- 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. (2021) **A comprehensive analysis of the contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing in 2018**. *Atmospheric Environment* 244: 117834. doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834
- 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
- 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 O₃ photochemistry**. *Atmospheric Environment* 95: 468–479.

Wer sind wir?

Die **Akademien der Wissenschaften Schweiz** sind ein Verbund der fünf wissenschaftlichen Akademien der Schweiz: der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT), der Schweizerischen Akademie der Geistes- und Sozialwissenschaften (SAGW), der Schweizerischen Akademie der Medizinischen Wissenschaften (SAMW), der Schweizerischen Akademie der Technischen Wissenschaften (SATW) und der Jungen Akademie Schweiz JAS. Sie umfassen nebst den Akademien die Kompetenzzentren TA-SWISS und Science et Cité sowie weitere wissenschaftliche Netzwerke. Die Akademien der Wissenschaften Schweiz vernetzen die Wissenschaften regional, national und international. Sie vertreten die Wissenschaftsgemeinschaften disziplinär, interdisziplinär und unabhängig von Institutionen und Fächern. Ihr Netzwerk ist langfristig orientiert und der wissenschaftlichen Exzellenz verpflichtet. Sie beraten Politik und Gesellschaft in wissensbasierten und gesellschaftsrelevanten Fragen.

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.