Klimawirkungen des Luftverkehrs

Informationen zum Fachgespräch „Luftverkehr und Klimaschutz“

Berlin, Deutscher Bundestag, 26. März 2007

U. Schumann[1]

Zusammenfassung

Das Klima der Erdatmosphäre ändert sich derzeit stärker als je seit der letzten Eiszeit. Der Klimawandel ist sehr wahrscheinlich zu einem großen Teil Mensch gemacht. Der Luftverkehr hat zu dem Klimawandel beigetragen.

- Der globale Luftverkehr trägt zum Klimawandel durch Emission von Kohlendioxid (CO_2), Stickoxiden (NOx), Kondensstreifen und Veränderungen der Bewölkung bei.
- Emissionen von CO_2 im Reiseflug erwärmen das Klima ebenso stark wie Emissionen am Boden.
- Emissionen von NOx und Wasserdampf (H_2O) im Reiseflug verursachen Ozon und Kondensstreifen und erhöhen dadurch den Klimaantrieb stärker als gleiche Emissionen am Boden.
- Emissionen von NOx vermindern etwas den globalen Klimaantrieb durch Methan.
- Zirren und Kondensstreifen wirken nachts erwärmend; tags wärmend oder kühlend.
- Der globale Luftverkehr emittiert derzeit ca. 2.2 % aller anthropogenen CO_2-Emissionen.
- Ein Maß für die Klimawirkung ist der „Strahlungsantrieb“. Er misst die Erwärmungsrate infolge einer vom Menschen verursachten Änderung in Watt je Quadratmeter.
- Der globale Luftverkehr hat zum Strahlungsantrieb bisher ca. 0.05 W/m^2 beigetragen.
- Das sind 3 % des gesamten anthropogenen Strahlungsantriebs von etwa 1.6 W/m^2.
- Unter Einbezug der bekannten Unsicherheiten kann der bisherige Luftfahrt-Anteil am gesamten Strahlungsantrieb auch zwischen 2 und 8 % betragen.
- Der globale Luftverkehr hat zur globalen Erwärmung der Erdoberfläche von ca. 0.7°C ca. 0.03°C beigetragen. Regional ist mit stärkeren Erwärmungen zu rechen.
- Der Treibstoffverbrauch (die CO_2-Emissionen) im globalen Luftverkehr wuchs von 1990 – 2004 um 2 bis 3 %/Jahr. Die Stickoxid-Emissionen stiegen um 4 bis 5 %/Jahr.
- Die globale Erwärmung und der Beitrag des Luftverkehrs nehmen weiter zu.
- Bei einer Fernflugreise werden ca. 1.6 bis 2 Tonnen CO_2. emittiert. Die mittlere CO_2-Emission pro Einwohner in Deutschland beträgt ca. 10 bis 12.5 Tonnen.
- Das Verhältnis der Erwärmung durch CO_2, Ozon und Kondensstreifen im Vergleich zur Erwärmung durch CO_2 allein hängt vom betrachteten Zeitraum (1 oder 100 Jahre) ab. („Kein konstanter Faktor 3“)
- Langfristig ist die Erwärmung durch CO_2 am größten. Kurz- und mittelfristig ist die Erwärmung durch NOx und Kondensstreifen größer als die durch CO_2.

[1] **Deutsches Zentrum**
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Institut für Physik der Atmosphäre
Oberpfaffenhofen, Münchner Str. 20
82234 Weßling

Prof. Dr. Ulrich Schumann
Telefon: +49 8153 28 2520
Fax: +49 8153 28 1841
ulrich.schumann@dlr.de
http://www.dlr.de/ipa/

Einleitung

Das Klima der Erdatmosphäre ändert sich derzeit stärker als je seit der letzten Eiszeit. Der Klimawandel ist sehr wahrscheinlich zu einem großen Teil Mensch gemacht [1]. Der Luftverkehr hat zu dem Klimawandel beigetragen [2]. Die Wirkungen von Emissionen der Luftfahrt auf die Atmosphäre werden in Deutschland und Europa seit 1990 intensiv erforscht [3]. Im Folgenden wird die Klimawirkung des Luftverkehrs, soweit heute bekannt, kurz zusammenfassend dargestellt. Bezüglich Einzelheiten sei auf die zitierten Unterlagen verwiesen, insbesondere IPCC (1999) [2], IPCC (2007) [1] sowie die Überarbeitung der IPCC-1999-Ergebnisse aufgrund des TRADEOFF-EU-Projekts und begleitender Untersuchungen in Sausen et al. (2005) [4]. Korrekturen dieser kurzfristig erstellten Zusammenfassung und Neubewertungen aufgrund weiterer Forschung bleiben vorbehalten.

Strahlungsantriebe durch Emissionen von Gasen und Partikeln aus der Luftfahrt

Der mittlere globale Strahlungsantrieb[2] infolge der globalen Luftfahrt in der Vergangenheit bis zum Jahr 2000 beträgt laut Tabelle 1 in der Summe (ohne Berücksichtigung von Zirrusänderungen) ca. 0.05 W/m^2. Das entspricht ca. 3 % des gesamten anthropogenen Strahlungsantriebs von etwa 1.6 W/m^2 [1].

Tabelle 1: Der Strahlungsantrieb (RF) infolge Luftfahrt [mW/m^2] für das Jahr 2000 [4].

CO_2	O_3	CH_4	H_2O	Direkt Sulfat	Direkt Ruß	Kondensstreifen	Summe (ohne Zirrus)
25.3	21.9	-10.4	2.0	- 3.5	2.5	10.0	47.8

Der Luftverkehr beeinflusst das Klima langfristig vor allem durch die Emission von Kohlendioxid, das im Mittel länger als 60 Jahre in der Atmosphäre verbleibt. Emissionen von Kohlendioxid im Reiseflug erwärmen das Klima ebenso stark wie Emissionen am Boden. Der globa-

[2] Der „Strahlungsantrieb“ (englisch: „Radiative Forcing”, RF) ist ein häufig verwendetes Maß für den Treibhauseffekt infolge einer Störung im Erd-Atmosphäre-System. RF misst die Änderung des Strahlungsflusses am Oberrand der Atmosphäre infolge einer Störung, bei sonst festgehaltenen Eigenschaften der Atmosphäre. Störungen können z.B. sein: die Konzentrationszunahme eines Gases wie CO_2 oder die Zunahme der Bedeckung durch Wolken eines bestimmten Typs. Für gut durchmischte Treibhausgase (wie CO_2) gilt näherungsweise ein linearer Zusammenhang zwischen RF und der global gemittelten Änderung ΔT der Temperatur an der Erdoberfläche im globalen Mittel:
$\Delta T = \lambda\ RF$,
wobei der Parameter λ die Einheit K/(Wm^{-2}) hat. Hierbei ist ΔT die Temperaturänderung bei Erreichen des Strahlungsgleichgewichts des Erdsystems, zu deren Erreichen viele Jahrzehnte notwendig sind. Bei ansteigendem RF ist die aktuell erreichte Temperaturerhöhung kleiner als ΔT im Gleichgewicht. In erster Näherung ist λ für verschiedene Klimastörungen gleich groß. Bei genauerer Klimarechnung mit Klimamodellen merkt man, dass λ für verschiedene Störungen teils erheblich (ca. 50 %) von einer Konstanten abweichen kann. Insofern ist RF nur ein Näherungsmaß für den Treibhauseffekt einer Störung.

le Luftverkehr trägt derzeit insgesamt etwa 2.2 (2 bis 2.5) % zu den gesamten anthropogenen Kohlendioxidemissionen bei. Der Beitrag des CO_2 aus Luftverkehr zum Strahlungsantrieb (Treibhauseffekt) beträgt 0.025 W/m^2 oder ca. 1.6 % des gesamten anthropogenen Strahlungsantriebs.

Stickoxide aus dem Luftverkehr im Reiseflug verstärken den Treibhauseffekt innerhalb von Wochen im globalen Mittel um 0.022 W/m^2 durch Bildung zusätzlichen Ozons. Pro Stickoxid-Molekül wird im Reiseflug deutlich mehr Ozon gebildet als am Boden. Ozon ist im Höhenbereich des Luftverkehrs ein wirksames Treibhausgas. Stickoxide vermindern auch Methan, was einen Teil (0.010 W/m^2) der globalen Erwärmung durch Ozon ausgleicht.

Wasserdampf aus den Triebwerken verursacht im Reiseflug in kalter Luft die vielfach sichtbaren Kondensstreifen [5]. Der unmittelbare Treibhauseffekt von Wasserdampf und Partikeln ist deutlich kleiner als der infolge CO_2 aus Luftverkehr. Eispartikel haben jedoch einen etwa 300-mal größeren Strahlungsantrieb als die gleiche Menge Wasserdampf. Kondensstreifen und Partikel aus dem Luftverkehr verändern die vorhandene Bewölkung. In feuchter und kalter Luft entwickeln sich Kondensstreifen zu künstlichen Zirruswolken („Contrail-Cirrus“). Ruß kann „Soot-Cirrus“ verursachen. Zirren vermindern die am Boden ankommende solare Strahlung und die in den Weltraum emittierte terrestrische Strahlung. Dünne hohe Wolken über hellen und warmen Untergrund wärmen, dicke niedrige Wolken über dunklen und kalten Untergrund kühlen die Erdoberfläche. Zirren und Kondensstreifen wirken nachts erwärmend; tags können sie wärmen oder kühlen [6]. Kondensstreifen kühlen die Erde lokal durch Schattenwurf. Die Erwärmung findet zunächst großen Teils in der Atmosphäre statt und ist daher am Boden erst nach längerer Zeit spürbar.

Der mittlere globale Strahlungsantrieb durch Kondensstreifen (0.010 W/m^2) ist etwa dreimal kleiner als zunächst [2] angenommen. Das liegt daran, dass Kondensstreifen optisch dünner sind als früher angenommen und daher weniger erwärmen.

Kondensstreifen sind im Satellitenbild als lineare Wolken-Objekte erkennbar [7]. Kondensstreifen bedecken über Mittel-Europa etwa 0.5 Prozent des Himmels [8]. Erste Ergebnisse, wonach die aus Kondensstreifen entstehenden Cirren einen zehnmal höheren Bedeckungsgrad bewirken, erwiesen sich als nicht stichhaltig [9, 10]. Der Strahlungsantrieb infolge Luftfahrt-induzierter Zirren ist daher nach wie vor nur sehr ungenau bekannt [5]. Er wird in verschiedenen Studien unterschiedlich bewertet, siehe Tabelle 2.

Tabelle 2. Strahlungsantrieb (RF, [mW/m^2]) infolge Luftfahrt-induzierter Zirren [4]

Jahr	Studie	Mittlerer Wert	Obere Grenze
1992	IPCC (1999)		40
1992	Minnis et al. (2004)		26
2000	Sausen et al. (2005)	30	80

Die mittlere Temperatur an der Erdoberfläche folgt dem Strahlungsantrieb aufgrund der thermischen Trägheit des Atmosphäre/Ozean-Systems mit einer Verzögerung von ca. 40 Jahren [11, 12]. Für einen konstanten Strahlungsantrieb von 0.05 W/m^2 wäre langfristig mit einer Zunahme der Temperatur an der Erdoberfläche von 0.037 K (1 K = 1 Kelvin = 1°C) im globalen Mittel zu rechnen [11, 12]. Da die Emissionen aus der Luftfahrt im Wesentlichen in den letzten 30 Jahren erfolgten, ist das Atmosphäre/Ozean-System noch lange nicht in einem neuen thermischen Gleichgewicht. Daher ist die bisherige Erwärmung ca. 30 - 50 % kleiner als im Gleichgewicht [11]. (Der genaue Wert ist nicht bekannt). In Zukunft steigt die Erwärmung selbst bei konstanter Emission weiter an [1, 11].

Über den Kontinenten erwärmt sich die Luft schneller als über den Ozeanen. In den Regionen mit hoher Verkehrsdichte (z.B. USA, Europa) ist die mittlere Erwärmung infolge Kondensstreifen etwa 2.5 mal höher als im globalen Mittel [13]. Regionale Analysen sind aufgrund der geringen Größe des Klimaeffekts aus dem Luftverkehr mit großen statistischen Fehlern behaftet.

Das Verhältnis aus Summe aller Strahlungsantriebe aus dem Luftverkehr bis zum Jahr 1992 im Vergleich zu dem durch Kohlendioxid wurde 1999 [2] auf 2 - 4 geschätzt. Zur Bewertung des gesamten Klimaeffekts des Luftverkehrs multiplizieren manche daher die Kohlendioxidemissionen des Luftverkehrs mit einem Faktor 3. Damit wird die Klimawirkung des Luftverkehrs allerdings nicht angemessen berücksichtigt [14]. Der Strahlungsantrieb liefert dafür nicht die erforderliche Bewertungsbasis. Bei Ozon und den Kondensstreifen folgt der Strahlungsantrieb den Emissionen in wenigen Tagen oder Wochen und daher praktisch unmittelbar. Dagegen folgt der Strahlungsantrieb bei CO_2 dem zeitlichen Integral der Emissionen im Verlauf vieler Jahrzehnte. Zudem wird die Erwärmung der Erde durch die thermische Trägheit des Ozeans um Jahrzehnte verzögert.

Die durch eine Störung des Klimasystems bewirkte Temperaturänderung ΔT ist zudem nicht genau proportional zum Strahlungsantrieb RF [15]. Das Verhältnis $\lambda = \Delta T/RF$, d.h. die Temperaturänderung ΔT je Strahlungsantrieb RF beträgt für CO_2 etwa $\lambda_{CO2} = 0.74$ K/(W m^{-2}). Für andere Störungen ist λ kleiner (z.B. für Kondensstreifen) oder größer (z.B. für Ozon), siehe Tabelle 3.

Tabelle 3. Verhältnis der Erwärmung infolge eines Strahlungsantriebs relativ zu dem für CO_2 [12]

	CO_2	CH_4	O_3	H_2O	Kondensstreifen
λ/λ_{CO2}	1	1.18	1.37-1.55	1.14	0.59

Eine bessere Maßzahl für die Klimawirksamkeit ist die Temperaturänderung $\Delta T(t)$. Diese Maßzahl kann näherungsweise mit einfachen Modellen abgeschätzt werden. Die Emissionen aus einem Jahr Luftverkehr erwärmen die Erde innerhalb von 100 Jahren aufgrund aller Beiträge etwa 1.2-mal stärker als nur durch CO_2 (Sausen et al., 2007, pers. Mitteilung; die Genauigkeit dieses neuen Ergebnisses ist noch zu bestimmen.)

Die isolierte Betrachtung einer Verkehrsform macht wenig Sinn. Im laufenden EU-Projekt QUANTIFY (Koordination: DLR) wird der gesamte Verkehr, incl. Land-, See- und Luftverkehr, nach einheitlichen Maßstäben bewertet. Ergebnisse sind 2009 zu erwarten. Es sei erwähnt, dass auch beim Straßenverkehr die Summe aller Strahlungsantriebe (infolge Ozon und Ruß) deutlich (nach vorläufigen Rechnungen etwa 2-mal) größer ist wie der infolge CO_2.

Wachstum des Luftverkehrs

Die Transportleistung im Welt-Luftverkehr wächst im Passagier und Frachtteil derzeit um ca. 5.4 %/Jahr, siehe Tabelle 4.

Tabelle 4. Weltweiter kommerzieller Luftverkehr nach ICAO (2006) [16] und Treibstoffproduktion nach IEA (2006) [17]

Jahr	Zahlende Passagiere	Passagier-Transport	Fracht-Transport	Treibstoff
Einheit	10^6	10^9 P km	10^9 t km	Tg/a
1990	1164	1893	59	173
1991	1135	1844	59	167
1992	1146	1930	63	165
2000	1656	3017	118	213
2001	1624	2930	111	206
2002	1639	2963	120	209
2003	1657	2992	125	209
2004	1888	3445	139	224
2005	2022	3720	143	
Quelle	ICAO	ICAO	ICAO	IEA
Wachstum 1991-2004, %/Jahr	3.7	4.6	6.4	2.1

Auf den großen „ausgewählten Flugplätzen“ in Deutschland ist die Zahl der Passagiere und Starts von 1990 bis zum Jahr 2005 im Mittel um 5.3 und 4.1 %/Jahr gewachsen, siehe Tabelle 5.

Tabelle 5. Luftverkehr in Deutschland (DLR, 2006 [18])

Jahr	1991	2005	Wachstumsrate
Zahl der Einsteiger, Millionen	39	85	5.7 %/Jahr
Zahl der Starts, Millionen	0.53	0.97	4.4 %/Jahr

Treibstoffverbrauch im Luftverkehr

Der Treibstoffverbrauch im globalen Luftverkehr wächst bisher ca. 2 bis 4 %/Jahr langsamer an als die Transportleistung, siehe Tabelle 4. Dennoch wächst der Treibstoffverbrauch global um 2 bis 3 %/Jahr. Die Stickoxid-Emissionen steigen etwas rascher als der Treibstoffverbrauch.

In Deutschland (Angaben aus http://unfccc.int) sind die gesamten äquivalenten CO_2-Emissionen (incl. „Land Use, Land-Use Change and Forestry", LULUCF) von 1990 bis 2004 von etwa 1200 Tg (1 Tg = 1 Teragramm = 10^{12} g = 1 Megatonne = 1 Mt) auf knapp 1000 Tg gesunken. Sie haben also um 18.2 % oder um 1.4 %/Jahr abgenommen. Der Verkehr (inklusive Inlands-Luftverkehr) trug zu den gesamten äquivalenten CO_2-Emissionen im Jahr 2004 etwa 17.6 % bei, die internationale Luftfahrt 1.8 %. Die Emissionen des gesamten Verkehrs stiegen seit 1990 um 5.1 % oder um 0.4 %/Jahr an. Der Verbrauch an so genannten Bunker-Treibstoffen für die internationale Luftfahrt stieg seit 1990 um 53.4 % oder um 3.1 %/Jahr. Der Beitrag des Luftverkehrs zur CO_2-Emission in Deutschland beträgt also wenige Prozent, aber sein Anteil wächst rascher als die Summe der Emissionen aus Verkehr insgesamt. Die CO_2-Emissionen aus der internationalen Luftfahrt wachsen langsamer als die Transportleistung.

Die Deutsche Lufthansa (DLH) verbrauchte mit ihrer gesamten Flotte im Jahr 2005 ca. 6.7 Tg Treibstoff [19]. Pro Passagier und 100 km wurden dabei im Mittel 4.4 Liter verbraucht. Bei DLH wurde von 1991 bis 2005 die Transportleistung um ca. 9 %/Jahr gesteigert. Dabei ist der Treibstoffverbrauch um ca. 5.7 %/Jahr gestiegen. Der spezifische Treibstoffverbrauch pro Transportleistung sank demnach in 14 Jahren um 3.2 %/Jahr. Dennoch stieg der absolute Treibstoffverbrauch er Flotte aufgrund der stark wachsenden Verkehrsleistung auf mehr als das Doppelte an. Die moderneren Triebwerke emittieren weniger Masse an Stickoxiden pro Transportleistung aber mehr Stickoxide pro verbrannten Treibstoff.

Der größte Teil der Emissionsmengen stammt von Großraumflugzeuge auf Langstrecken. Dabei überwiegen die Emissionen im Reiseflug die in den Start- und Landphasen. Etwa 80 % der Emissionen erfolgen oberhalb von 9000 Fuß (ca. 3 km) [20], siehe Tabelle 6. Für etwa 69 % aller Flugbewegungen und 88 % der Distanzen werden große Strahlflugzeuge benutzt.

Tabelle 6. Anteil der Flugbewegungen und Flug-Distanzen je nach Flugzeug-Typ auf der Basis eines Datensatzes von EUROCONTROL [20]

Flugzeug-Typ	Anteil an Flugbewegungen (%)	Anteil an der geflogenen Distanz (%)
Große Jets (> 100 Sitze)	68.8	87.8
Regional-Jets (≤ 100 Sitze)	10.6	5.4
Turboprops	19	5.6
Busines-Jets (≤ ca. 20 Sitze)	1.7	1.2
	Zahl der Flugbewegungen: 48,988	Geflogene Distanz: 34,711,952 nautische Meilen

Auf Langstrecken wird etwa zehnmal mehr Treibstoff verbraucht als auf Kurzstrecken. Siehe dazu Tabelle 7 (Durchschnittswerte der DLH-Flugzeugmuster in 2006 bei realer Auslastung inkl. Warteschleifen und Taxiing am Boden, Lufthansa, 2007). Nahezu gleiche Werte (mit Abweichungen von wenigen Prozent, je nach anzunehmender Auslastung) wurden in unabhängigen Rechnungen des DLR, Institut für Antriebstechnik (M. Schaefer, pers. Mitteilung, 2007), gefunden.

Tabelle 7. Treibstoffverbrauch pro Passagier und Entfernung auf verschiedenen Strecken (Deutsche Lufthansa, 2007; M. Schaefer, DLR-Institut für Antriebstechnik, 2007).

Streckentyp	Strecke	Treibstoffverbrauch, L/Passagier	Treibstoffverbrauch, L pro Passagier und 100 km
Kurzstrecke	Berlin-Köln, A320-200	25	5.4
Mittelstrecke	Frankfurt-Madrid, A321-200	65	4.6
Langstrecke	Frankfurt-Peking, A340-600	310	4.0

Pro Flugreise und pro Passagier entstehen auf einer Langstrecke (z.B. Frankfurt – Peking – Frankfurt) knapp 1600 kg Kohlendioxid. Pro Einwohner und Jahr emittiert Deutschland etwa 10000 kg [21] CO_2 (mit Landnutzung etc. auch mehr; http://unfccc.int).

Gas- und partikelförmige Emissionen aus Triebwerken

Pro kg verbranntem Treibstoff (mit einem Kohlenstoffanteil von ca. 86 %) werden ca. 3.15 kg CO_2 und 1.25 kg H_2O emittiert (Tabelle 8). Aufgrund eines mittleren Schwefelgehalts von ca. 400 μg/g (der je nach Herkunft von 1 bis ca. 1000 μg/g variiert) werden im Mittel ca. 0.8 g SO_2 pro kg Treibstoff emittiert [2].

Bei der Verbrennung von Kerosin in den Brennkammern der Triebwerke werden pro kg Treibstoff im Mittel ca. 13 (12 bis 17) g Stickoxide (NOx = NO + NO_2, in Masseneinheiten von NO_2) emittiert; zudem ca. 3 g Kohlenmonoxid (CO) und 0.4 g Kohlenwasserstoffe (hier vereinfacht abgekürzt mit HC) [20].

Tabelle 8. Verbrauchte oder emittierte Spezies, mittlere Emissionsindizes (Masse an Emission pro Einheitsmasse verbranntem Treibstoff, für die globalen Luftfahrtflotte). Gesamt Emissionsrate und vergleichbare Emissionsraten [3], angepasst auf das Jahr 2004 auf der Basis der angegeben Quellen. Der tatsächliche Treibstoffverbrauch im Jahr 2000 lag zwischen 169 und 213 Tg [17, 20]

Spezies	Emissions-index, g/kg (Bereich)	Emissions-rate (2004) in Tg/Jahr	Vergleichbare Emissions-rate, Tg/Jahr	Vergleichbare Emissionsquelle
Kerosin		200	3600	Gesamte Erdölproduktion [17]
			280	Globaler Schiffsverkehr
			1320	Globaler Straßenverkehr
CO_2	3160	630	26500	Gesamte anthropogene CO_2 Emissionen [21]
			800	Anthropogene CO_2 Emissionen in Deutschland [21]
H_2O	1230	246	45	Methan Oxidation in der Stratosphäre
			525000	Verdampfung von H_2O an der Erdoberfläche
NO_x	13	2.6	0.7-2,	Stratosphärische Quellen
			17±10	Blitzquelle
			170±20	Gesamte atmosphärische anthropogene Quelle
Ruß	0.025 (0.01-0.05)	0.004 (AERO2K)	12	Verbrennung von fossilen Treibstoffen und Biomasse
SO_2	0.8 (0.6-1.0)	0.16	130	Gesamte Quelle aus Verbrennung fossiler Treibstoffe
			20-100	Natürliche Quellen
			5.4, 8.0	Nicht-eruptive, eruptive Vulkane
CO	3 (2-4)	0.507	2800	Gesamte anthropogene Quellen
HC	0.4 (0.1-1.0)	0.063	90	Gesamte anthropogene Quellen

Neben den gasförmigen Emissionen werden auch Partikel emittiert [22]: Pro kg Treibstoff bilden sich ca. 0.025 g Ruß (Partikel aus schwarzem und organischem Kohlenstoff mit ca. 30-60 nm Durchmesser). Ein Teil (ca. 3.3±1.8%) des Schwefels wird zu Schwefelsäure umgewandelt, das zu Schwefelsäuretröpfchen kondensiert. Der zu Schwefelsäure umgewandelte Anteil kann bei modernen Triebwerken mit hohem Druck und hoher Temperatur in der Brennkammer auch 10 % erreichen. Zudem entstehen kondensierbare Gase in Form von Salpetersäure (ca. 0.02-0.3 g/kg), und leicht flüchtiger Kohlenwasserstoffe (0.01-0.02 g/kg). Als Folge werden ca. 2.6×10^{14} Rußpartikel und ca. 10^{16} - 10^{17} volatiler Partikel (mittlerer Durchmesser ca. 5 nm) pro kg Treibstoff im Abgas von Flugzeugen im Reiseflug gefunden.

Zukunfts-Szenarien

Für die Zukunft wurden verschiedene Szenarien betrachtet. Das im IPCC (1999) verwendete Referenzszenario sah über den Zeitraum 1992 bis 2050 ein Wachstum im Luftverkehr von ca. einem Faktor 6 (3.6 %/Jahr) vor. Der Treibstoffverbrauch stieg dabei um etwa einen Faktor 3.2. Andere im IPCC (1999) diskutierte Szenarien unterstellen Luftverkehrswachstum um Faktoren 4 bis 10 von 1992 bis 2050.

Für den Zeitraum 2005-2024 erwartete Boeing (2006) ein Weltwirtschafts-Wachstum von 2.9 %/Jahr, eine Zunahme des Passagierverkehrs von 4.8 %/Jahr und eine Wachstum im Frachttransport von 6.2 %/Jahr. Airbus hat zur gleichen Zeit ein Verkehrswachstum von 5.3 %/Jahr für die nächsten 20 Jahre prognostiziert (3.2 %/Jahr im nationalen Bereich der USA und 8.7 %/Jahr innerhalb Chinas).

Dies sind keine Vorhersagen und die tatsächliche Entwicklung wird erheblich von diesen Szenarien abweichen. Insbesondere sind in diesen Szenarien die in den letzten Monaten in Europa diskutierten Vorgaben für sinkende Kohlendioxidemissionen nicht enthalten.

Derzeit werden von allen an der Luftfahrt Beteiligten erhebliche Anstrengungen unternommen, durch neue Technologien und besseres Flugverkehrs-Management die Emissionen an Kohlendioxid und Stickoxiden zu reduzieren. Ein erklärtes Ziel der Europäischen Aeronautik (ACARE) ist es, Technologien zu entwickeln, die es ermöglichen, die Emissionen pro Passagier-Kilometer beim Kohlendioxid (CO_2) um 50 % und bei den Stickoxiden (NOx) um 80 % im Vergleich zur Technologie des Jahres 2000 zu reduzieren.

Falls sich bestätigt, dass Kondensstreifen und Partikel aus dem Luftverkehr Wolken so verändern, dass sie wesentlich zur Erwärmung beitragen, könnte man die besonders kalten und feuchten Regionen, in denen sich „Contrail-Cirrus“ bilden, umfliegen. Möglicherweise genügen dafür kleine Änderungen in der Flugroute und in der Flughöhe (z.B. 300 m höher oder tiefer) [23].

Da es beim Klima vor allem auf die Langzeitwirkung ankommt, und das Klima sich über Jahrhunderte ändert, und da auch Rohöl eine wertvolle, begrenzt verfügbare und zunehmend teurere Ressource ist, ist eine Minderung des spezifischen Treibstoffverbrauchs besonders wichtig. Eine weitere Reduktion des spezifischen Treibstoffverbrauchs schützt Klima und Erdölvorräte.

Ausgewählte Referenzen

[1] IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for Policymakers.* Intergovernmetnal Panel on Climate Change, WMO-UNEP, Geneva, 2007.

[2] IPCC. *Aviation and the Global Atmosphere*, Cambridge, UK, Cambridge Univ. Press, 1999.

[3] Schumann U. Wie stark beeinflussen die Emissionen des Luftverkehrs Ozon und Klima? *GAIA*, Vol. 8, pp. 19-27, 1999.

[4] Sausen R, Isaksen I, Hauglustaine D, Grewe V, Lee D S, Myhre G, Köhler M O, Pitari G, Schumann U, Stordal F, and Zerefos C. Aviation radiative forcing in 2000: An update on IPCC (1999). *Meteorol. Z.*, Vol. 14, pp. 555 - 561, 2005.

[5] Schumann U. Formation, properties and climate effects of contrails. *C. R. Physique*, Vol. 6, pp. 549 - 565, 2005.

[6] Meerkötter R, Schumann U, Minnis P, Doelling D R, Nakajima T, and Tsushima Y. Radiative forcing by contrails. *Ann. Geophys.*, Vol. 17, pp. 1080-1094, 1999.

[7] Mannstein H, Meyer R, and Wendling P. Operational detection of contrails from NOAA-AVHRR data. *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 20, pp. 1641-1660, 1999.

[8] Meyer R, Mannstein H, Meerkötter R, Schumann U, and Wendling P. Regional radiative forcing by line-shaped contrails derived from satellite data. *J. Geophys. Res.*, Vol. 107, pp. ACL 17-1 - ACL 17-15, 2002.

[9] Mannstein H and Schumann U. Aircraft induced contrail cirrus over Europe. *Meteorol. Z.*, Vol. 14, pp. 549 - 554, 2005.

[10] Mannstein H and Schumann U. Corrigendum. *Meteorol. Z.*, Vol. 16, pp. 131-132, 2007.

[11] Sausen R and Schumann U. Estimates of the climate response to aircraft CO2 and NOx-emission scenarios. *Climatic Change*, Vol. 44, pp. 27 - 58, 2000.

[12] Ponater M, Grewe V, Sausen R, Schumann U, Pechtl S, Highwood E J, and Stuber N. Climate sensitivity of radiative impacts from transport systems. *Meteorol. Z.*, Vol. in press, pp., 2007.

[13] Ponater M, Marquart S, Sausen R, and Schumann U. On contrail climate sensitivity. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 32, pp. L10706, 2005.

[14] Forster P M d F, Shine K P, and Stuber N. It is premature to include non-CO_2 effects of aviation in emission trading schemes. *Atmos. Environ.*, Vol. 40, pp. 1117–1121, 2006.

[15] Stuber N, Ponater M, and Sausen R. Why radiative forcing might fail as a predictor of climate change. *Clim. Dyn.*, Vol. 24, pp. 497-510, 2005.

[16] ICAO. Annual Review of Civil Aviation 2005. *ICAO Journal (International Civil Aviation Organisation)*, Vol. 61, pp. 7-19, 2006.

[17] IEA. *Oil Information 2006, Table 9*, Paris, International Energy Agency, 2006.

[18] Grunewald E, Berster P, Claßen A, Hepting M, Pabst H, and Pak H. *Luftverkehrsbericht 2006.* DLR, Flughafenwesen und Luftverkehr, Köln, pp. 71, 2006.

[19] DLH. *Das Wichtigste zum Thema Nachhaltigkeit bei Lufthansa - Ausgabe 2006.* Deutsche Lufthansa AG, Frankfurt, 2006.

[20] Eyers C J, et al. *AERO2k Global Aviation Emissions Inventories for 2002 and 2025.* QinetiQ for European Commission under Contract No. G4RD-CT-2000-00382, Farnborough, Hampshire, GU14 0LX, 2005.

[21] Marland G, Boden T, and Andres R J. *Global CO2 Emissions from Fossil-Fuel Burning, Cement Manufacture, and Gas Flaring: 1751-2003.* Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, 2006.

[22] Schumann U, Arnold F, Busen R, Curtius J, Kärcher B, Curtius J, Petzold A, Schlager H, Schröder F, and Wohlfrom K H. Influence of fuel sulfur on the composition of aircraft exhaust plumes: The experiments SULFUR 1-7. *J. Geophys. Res.*, Vol. 107, pp. AAC 2-1 - AAC 2-27, 2002.

[23] Mannstein H, Spichtinger P, and Gierens K. How to avoid contrail cirrus. *Transp. Res.*, Vol. D 10, pp. 421–426, 2005.