



**Luftfahrt und Atmosphäre**  
**- reicht ACARE zum Klimaschutz aus?**

**Ulrich Schumann,**  
**DLR, Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen**  
 Seminarvortrag im Forum der Luft- und Raumfahrt München,  
 TU München, Garching, 31. Januar 2008

 Deutsches Zentrum  
 für Luft- und Raumfahrt e.V.  
 in der Helmholtz-Gemeinschaft

Institut für Physik der Atmosphäre

100 JAHRE  
 Luft- und Raumfahrtforschung  
 in Deutschland 


**Der Klimawandel ist die Herausforderung für  
 die Luftfahrt**

- 1. Das Klima der Erde ändert sich**
- 2. Der Luftverkehr trägt zum Klimawandel bei**
- 3. Ein einfaches Klima-Response-Modell zeigt, dass es  
 nicht nur auf CO<sub>2</sub> ankommt**
- 4. Reichen die ACARE-Ziele zum Schutz des Klimas  
 aus?**

ACARE: Advisory Council for  
 Aeronautics Research in Europe

Diese Frage wurde auch von  
 Owen und Lee betrachtet (u.a.  
 CEAS-Konferenz, Berlin, 2007).

Methodische Grundlage:  
 Sausen und Schumann (2000),  
 Ponater et al. (1996)

 Deutsches Zentrum  
 für Luft- und Raumfahrt e.V.  
 in der Helmholtz-Gemeinschaft

Institut für Physik der Atmosphäre  
 Folie 2 > U. Schumann

## Der Strahlungsantrieb

Ein Maß für die Klimawirkung ist der „Strahlungsantrieb“ (Radiative Forcing, RF).

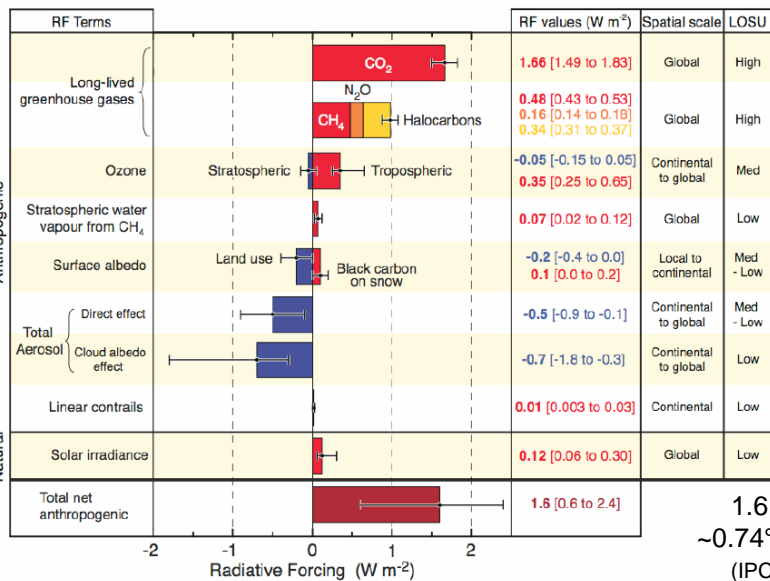
Der Strahlungsantrieb misst die Erwärmungsrate (in  $W/m^2$ ) infolge einer vorgegebenen Störung im Erd-Atmosphären-Klimasystem (z.B.  $CO_2$ -Konzentrations-Erhöhung).

Stark vereinfacht:

Im stationären Gleichgewicht

1  $W/m^2$  -> 0.8 (0.5 – 1.2) °C globaler mittlerer Temperaturanstieg auf der Erdoberfläche

## Anthropogener Strahlungsantrieb bis 2005 global



Aviation: +

-

+

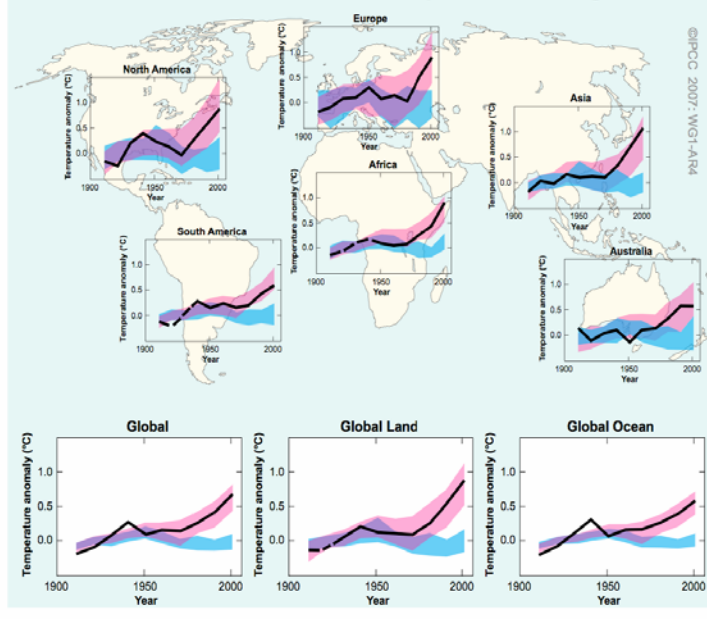
+

1.6  $W/m^2$   
~0.74°C bisher  
(IPCC, 2007)

**Der Klimawandel ist sehr wahrscheinlich durch anthropogene Emissionen verursacht**

**Bild zeigt: Beobachtungen und Modell-Ergebnisse mit ohne anthropogene Emissionen**

### Global and Continental Temperature Change

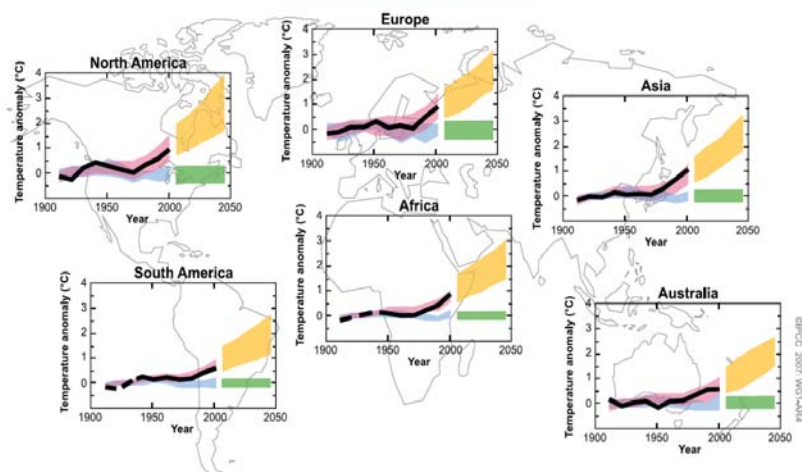


DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz-Gemeinschaft

Institut für Physik der Atmosphäre (IPCC-2007)

### In den nächsten 50 Jahren kann es 1-3°C wärmer werden

#### CONTINENTAL SURFACE TEMPERATURE ANOMALIES: OBSERVATIONS AND PROJECTIONS

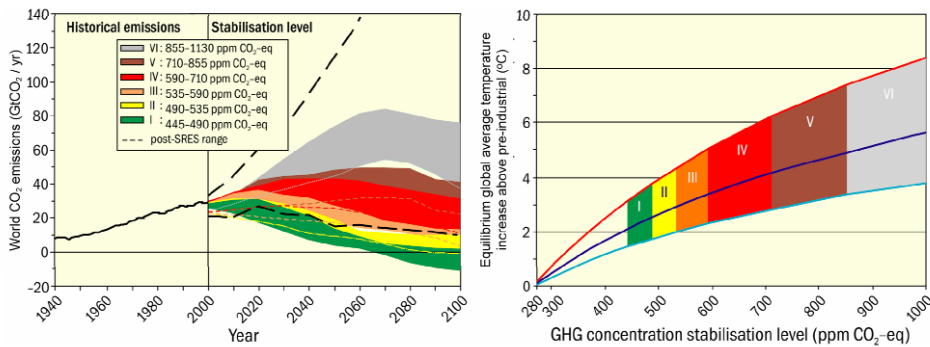


DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz-Gemeinschaft

Institut für Physik der Atmosphäre Folie 6 > U. Schumann

**CO<sub>2</sub>-Emissionen und daraus folgende Gleichgewichts-Temperaturzunahme: Zur Begrenzung der Erwärmung auf 2 bis 3°C sind bis 2050 die Emissionen um > 50 % zu reduzieren**

CO<sub>2</sub> emissions and equilibrium temperature increases for a range of stabilisation levels



IPCC 2007, Synthesis Report

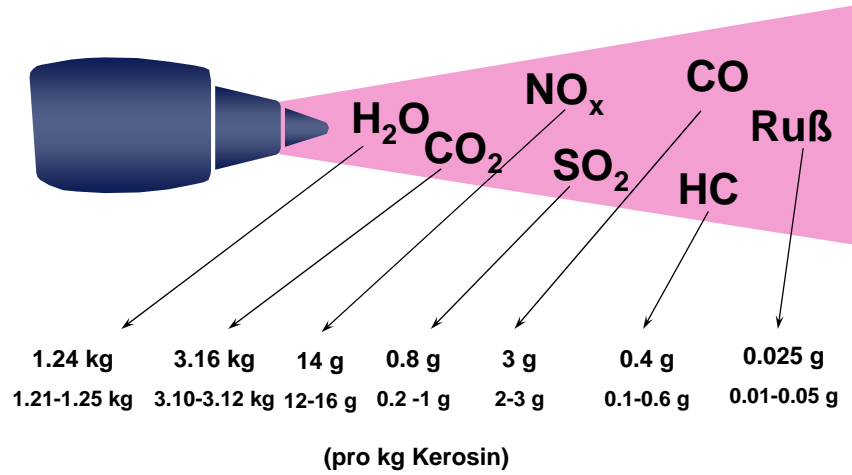
**Der Luftverkehr trägt zum Klimawandel bei**

**Der globale Luftverkehr trägt zum Klimawandel durch Emission von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Stickoxiden (NO<sub>x</sub>), Kondensstreifen und Veränderungen der Bewölkung bei.**

**Emissionen von CO<sub>2</sub> im Reiseflug erwärmen das Klima ebenso stark wie Emissionen am Boden.**

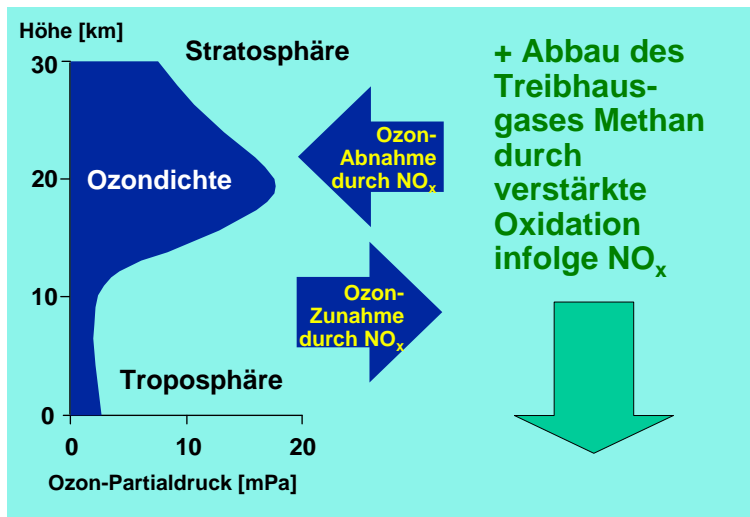
**Emissionen von NO<sub>x</sub> und Wasserdampf (H<sub>2</sub>O) im Reiseflug verursachen Ozon und Kondensstreifen und erhöhen dadurch den Klimaantrieb stärker als gleiche Emissionen am Boden.**

## Mittlere Emission aus Flug-Triebwerken im Reiseflug

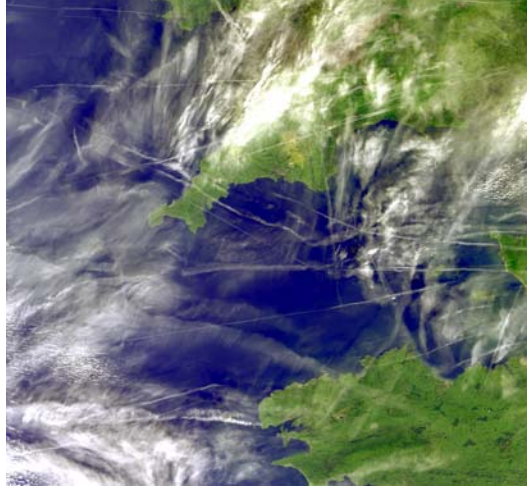


(Emissionen von Methan (CH<sub>4</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O) sind vernachlässigbar klein)

## Stickoxide aus Flugtriebwerken verändern die Treibhausgase Ozon und Methan



## Kondensstreifen induzieren Zirren

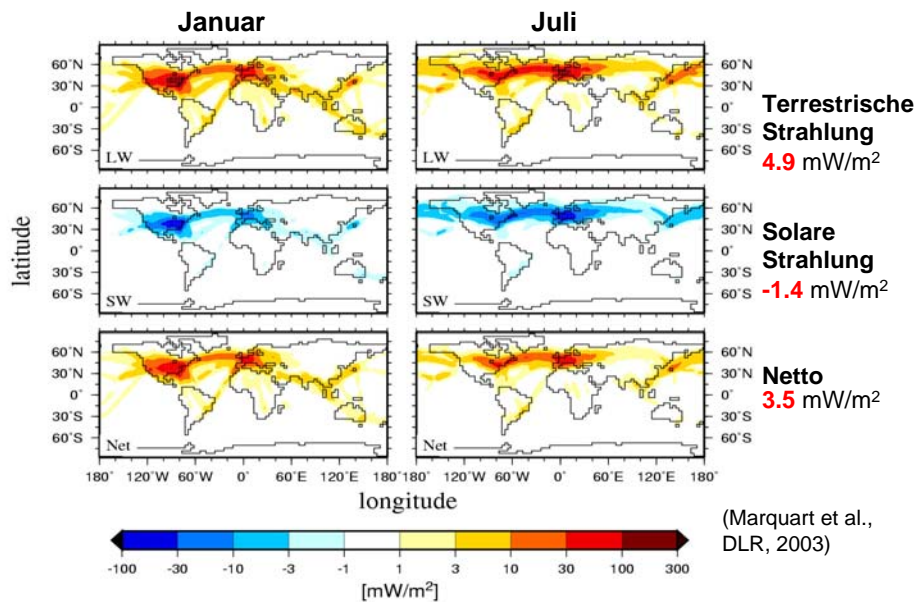


## Kondensstreifen-Bildung

durch Kondensation von Wasserdampf aus den Triebwerken auf Partikeln im Abgas oder der Umgebungsluft.



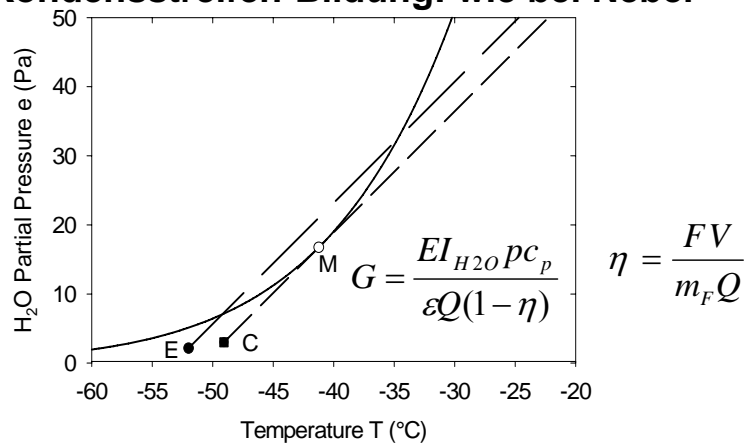
## Kondensstreifen: Erwärmung überwiegt (?)



Deutsches Zentrum  
 DLR für Luft- und Raumfahrt e.V.  
 in der Helmholtz-Gemeinschaft

Institut für Physik der Atmosphäre  
 Folie 13 > U. Schumann

## Kondensstreifen-Bildung: wie bei Nebel



Gradient *G* der Mischungslinie hängt ab von Emission-Index  $EI_{H_2O}$ , Druck  $p$ , Verbrennungswärme  $Q$ , Gesamtwirkungsgrad  $\eta$ , spez. Wärmekapazität  $c_p$ .

(Schumann, 1996, 2005)

Deutsches Zentrum  
 DLR für Luft- und Raumfahrt e.V.  
 in der Helmholtz-Gemeinschaft

Institut für Physik der Atmosphäre  
 Folie 14 > U. Schumann

## Messungen mit DLR-Falcon in Kondensstreifen



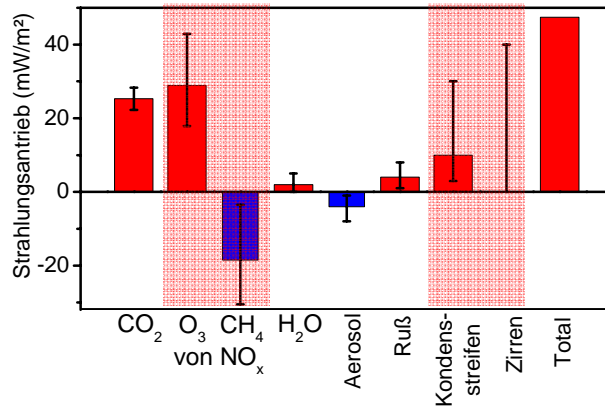
## Kondensstreifen lassen sich nicht durch modernere Treibwerke vermeiden



Photo eines Airbus A340 mit Kondensstreifen (links,  $\eta = 0.33$ ) und einer Boeing B707 ohne Kondensstreifen (rechts,  $\eta = 0.25$ )

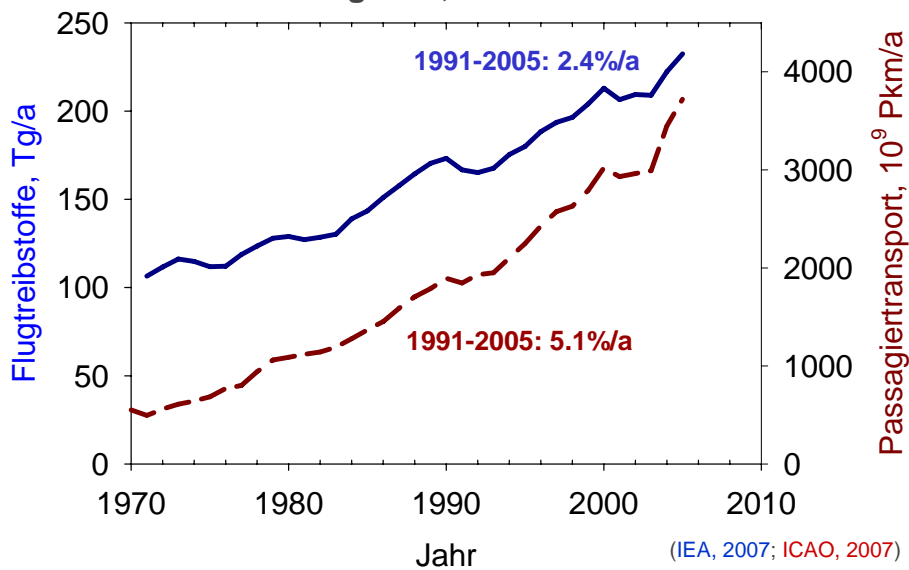
(Schumann, 2000)

## Strahlungsantrieb bis 2000 durch globalen Luftverkehr



Sausen et al.,  
DLR, TRADEOFF  
(2005),  
IPCC 1999, 2007

## Treibstoffverbrauch und Passagiertransportleistung global, 1970-2005

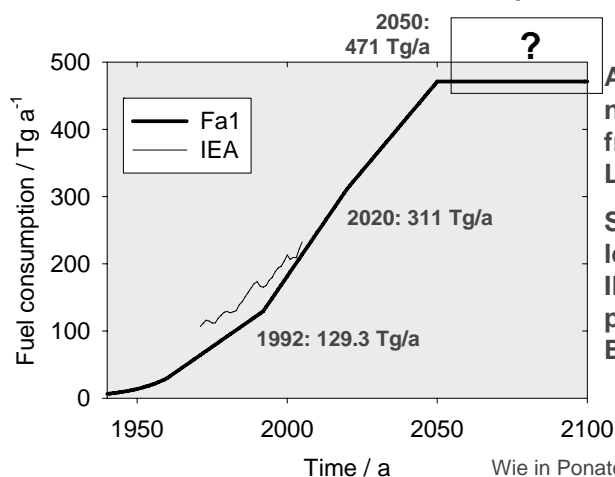


(IEA, 2007; ICAO, 2007)

## Beitrag des bisherigen Luftverkehrs

Beitrag zu	Im Jahr 2005	Globaler Bezug	In %
CO <sub>2</sub> -Emissionen	550-732 Tg/a	30700 Tg/a	1.8-2.4 %
CO <sub>2</sub> -Konzentrationsanstieg	1.3-1.6 μmol/mol	100 μmol/mol	1.3-1.6%
Zum Strahlungsantrieb	0.06 (0.03-0.14) W/m <sup>2</sup>	1.6 W/m <sup>2</sup>	3.5 % (2-9 %)
Zur globalen Erwärmung	0.015-0.03°C	0.76°C	2-4 %

## Treibstoffverbrauch, Referenzfall (Fa1, IPCC, 1999)



Ab 2050: Zuwachs nur noch mit CO<sub>2</sub>-freiem Luftverkehr?

Szenario; dient lediglich zur Illustration der prinzipiellen Effekte!!!!

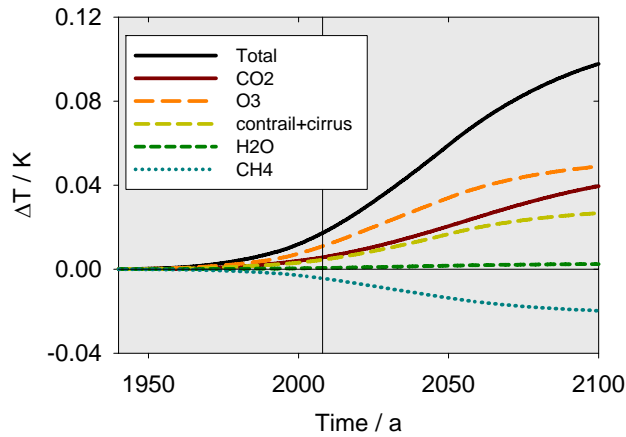
Annahme: 1992-2050 (IPCC; 1999):

Verkehr wächst mit ca. 3.5- 4 %/a

Treibstoffverbrauch wächst mit 2.25 %/a.

Wie in Ponater et al., DLR (2006).  
 Realer Treibstoffverbrauch von  
 International Energy Agency (IEA)  
 1971-2005  
 Evtl. IEA höher wegen Militäranteil?

## Temperaturänderung infolge Luftfahrt, Fa1



$\Delta T(2005) \cong 0.02 \text{ K}$

$\Delta T(2050) \cong 0.06 \text{ K}$

$\Delta T(2100) \cong 0.1 \text{ K}$

Szenario kann Treibstoffverbrauch unterschätzen!

$\Delta T / \Delta T_{\text{CO}_2} = 3\text{-}2.5$ ,  
abnehmend in 1992-2100; nimmt zu mit zunehmender Wachstumsrate!

Bis auf zusätzlichem Cirrus = 2\* Contrails, wie in Ponater et al., DLR (2006)

## Die ACARE-Vision

### European Aeronautics: A Vision for 2020

#### Challenges and associated goals

- Quality and Affordability
  - Reduced passenger charges
  - Increased passenger choice
  - Transformed freight operations
  - Reduced time to market by 50%
- Environment
  - Reduction of CO<sub>2</sub> by 50%
  - Reduction of NO<sub>x</sub> by 80%
  - Reduce perceived external noise by 50%
  - Substantial progress towards 'Green MMD'

Wann wird die Vision Realität?

Wenn Vision im Betrieb realisiert wird, reichen die Maßnahmen zum Klimaschutz aus?

## Klima-Response-Modell

$$\Delta m(t) = \int_{t_0}^t G_C(t-t') E(t') dt'$$

$$RF(t) = \alpha \ln((m_0 + \Delta mc) / m_0),$$

$$\Delta T(t) = \int_{t_0}^t G_T(t-t') RF(t') dt'$$

**Verkehr, Emission**

$\tau \cong 30-300 \text{ a}$

**Konzentration**

$\tau < 1 \text{ a}$

**Strahlungsantrieb**

$\tau \cong 30-50 \text{ a}$

**Klimaänderung**

(Hasselmann et al., 1993; Sausen und Schumann, 2000)

## Änderung des CO<sub>2</sub>-Mischungsverhältnisses durch Luftverkehr von t<sub>0</sub> ≅ 1940 bis 2000

$$\Delta m(t) = \int_{t_0}^t G_C(t-t') E(t') dt'$$

$$G_C(t) = \sum_{j=1}^5 \alpha_j e^{-t/\tau_j}$$

Lebensdauer von CO<sub>2</sub>: 1.7-  
>300 Jahre

Die Änderung  $\Delta m$  zur Zeit  $t$  ist das gewichtete Integral über die Emissionen  $E(t)$  in der Vergangenheit.

j	1	2	3	4	5
$\alpha_j, \text{ nmol/mol}^1 \text{ Tg}^{-1}$	0.067	0.1135	0.152	0.0970	0.041
$\tau_j, \text{ a}$	$\infty$	313.8	79.8	18.8	1.7

$$\Delta m(2000) = 1.3 \text{ } \mu\text{mol/mol}$$

= 1.6 % des CO<sub>2</sub>-Anstiegs seit 1750.  
Kleiner als der Emissionsanteil (2.2 %)

Ca. 20 % unsicher wegen  
Unsicherheiten in  $E(t)$  und  $\alpha_j$   
(Sausen und Schumann, 2000)

## Änderung des CO<sub>2</sub>-RF durch Luftverkehr von 1940 bis 2000

$$RF(t) = \alpha \ln((m_0 + \Delta mc) / m_0), \quad \alpha = 5.35 \text{ W m}^{-2}$$

Global  $RF(2000)$ :

1.66 ± 0.27 W/m<sup>2</sup> aus CO<sub>2</sub>,

1.6 (0.6-2.4) W/m<sup>2</sup> aus allen Beiträgen (IPCC, 2007)

## Änderung des Temperatur allein infolge der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Luftverkehr bis 2000

$$\Delta T(t) = \int_{t_0}^t G_T(t-t') RF(t') dt'$$

Die Änderung  $\Delta T$  zur Zeit  $t$  ist das gewichtete Integral über den Strahlungsantrieb  $RF$  in der Vergangenheit.

$$G_T(t-t') = \alpha_T e^{-t'/\tau_T}$$

$\tau_T \cong 36.8$  Jahren u.a. infolge thermischer Trägheit des Ozeans

$\alpha_T$  so, dass Klimasensitivität 3 K bei Verdopplung von CO<sub>2</sub>

(Ponater et al. 2006). Andere Modelle: 2-4.5°C bei Verdopplung von CO<sub>2</sub>; IPCC, 2007.)

### Berücksichtigung kurzlebiger Emissionen und Effekte: Wasserdampf, Ozon, Methan, Contrail, Cirrus

$$RF_{H_2O}(t) = S_{H_2O} \frac{E(t)}{E(2015)}, \quad S_{H_2O} = 2.8 \text{ mW m}^{-2}$$

$$RF_{O_3}(t) = S_{O_3} \frac{E(t)}{E(1992)} \frac{EI_{NOx}(t)}{EI_{NOx}(1992)}, \quad S_{O_3} = 20 \text{ mW m}^{-2}$$

$$RF_{CH_4}(t) = S_{CH_4} \frac{E(t)}{E(1992)} \frac{EI_{NOx}(t)}{EI_{NOx}(1992)}, \quad S_{CH_4} = -9.4 \text{ mW m}^{-2}$$

(Ponater et al., DLR, 2006)

$$RF_{Contrail}(t) = S_{Contrail} \frac{E(t)}{E(1992)} \frac{0.1 + \eta(t)}{0.1 + \eta(1992)}, \quad S_{Contrail} = 6.2 \text{ mW m}^{-2}$$

$$RF_{Cirrus}(t) = A_{Cirrus} RF_{Contrail}, \quad A_{Cirrus} = 2$$

Konservative Annahmen. Teils große Unsicherheiten!

### Klimawirksamkeit

Bei gleichem RF haben verschiedenen Störungen eine etwas unterschiedliche globale Erwärmung zur Folge

$$RF(t) = \sum_i r_i RF_i$$

	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	O <sub>3</sub>	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O	Contrails
<i>r</i>	1	1.18	1.37	1.18	1.14	0.59

(Ponater et al., DLR, 2006)

Die Luftfahrt-O<sub>3</sub>-Änderung wärmt stärker als Kondensstreifen bei gleichem RF, wegen stärkerer Rückwirkungen u.a. auf stratosphärischen Wasserdampf (Hansen et al., 2005; Ponater et al., 2005)

## Klimawirksamkeit von ACARE; Modellannahmen

Reduktion des spezifischen Treibstoffverbrauchs in 2050 um 50 % gegenüber 2000 unter Beachtung, dass auch ohne ACARE eine Reduktion um 1%/a realisiert würde (daher Reduktion nur um 34 % - dabei bleibt Verbrauch ab 2020 bis 2050 konstant)

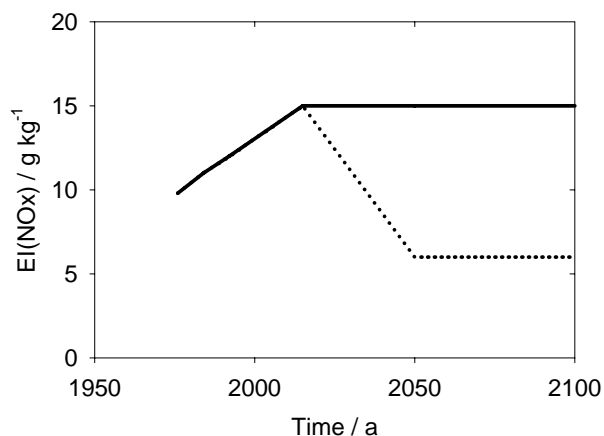
EI-NO<sub>x</sub> von 15 g/kg in 2020 auf 6 g/kg (80 % Reduktion der NO<sub>x</sub>-Emissionen bei 50 % Reduktion im Treibstoffverbrauch und 60 % Reduktion im EI)

Reduktion der Summe aus Contrails und Cirrus (von 18.6 mW/m<sup>2</sup> in 1992; bei gleichzeitiger Berücksichtigung steigenden Antriebs-Wirkungsgrad auf 0.4 ab 2050 und 0.5 ab 2100) um 80 %. Dabei Annahme, dass  $RF(\text{Cirrus}) = 2 \times RF(\text{Contrails})$  und dass beide proportional zu Treibstoffverbrauch skalieren (und nicht proportional zur Verkehrsdichte)

Mit berücksichtigt: H<sub>2</sub>O (proportional zum Treibstoff), sowie CH<sub>4</sub> (proportional zu EI-NO<sub>x</sub> und Treibstoff).

Grundlage: Modell von Sausen und Schumann (2002) mit den Erweiterungen von Ponater et al. (2006), mit  $\lambda_i$  angepasst an jeweilige Störung  $i$  ( $i = \text{CO}_2, \text{O}_3, \text{etc.}$ )

## Stickoxide, NO<sub>x</sub> (im Masseneinheiten von NO<sub>2</sub>), Emissions-Index EI, mit und ohne ACARE



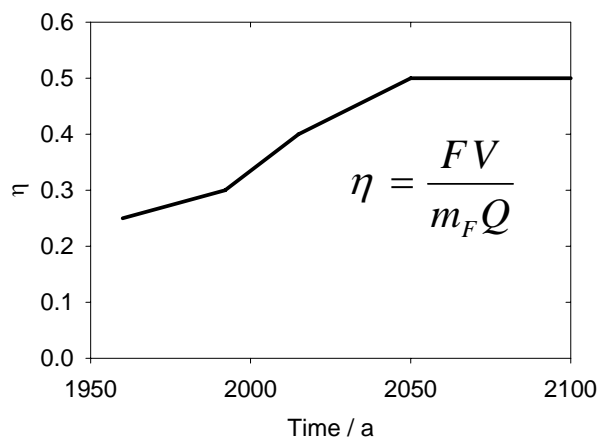
**ACARE: 80 %  
Reduktion  
(Faktor 0.2)**

**durch 50 %  
weniger spez.  
Treibstoff-  
verbrauch**

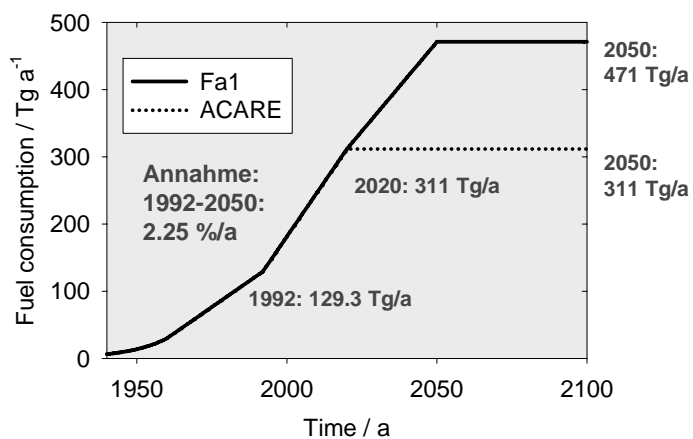
**und 0.4  
kleinerem  
EI(NO<sub>x</sub>):**

**$0.2 = 0.4 \cdot 0.5$**

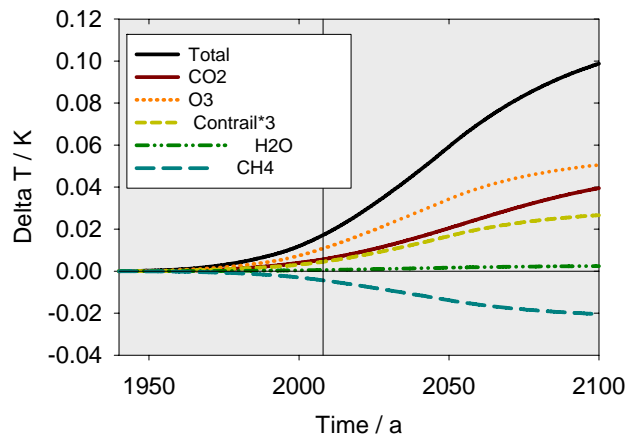
## Gesamt-Antriebswirkungsgrad



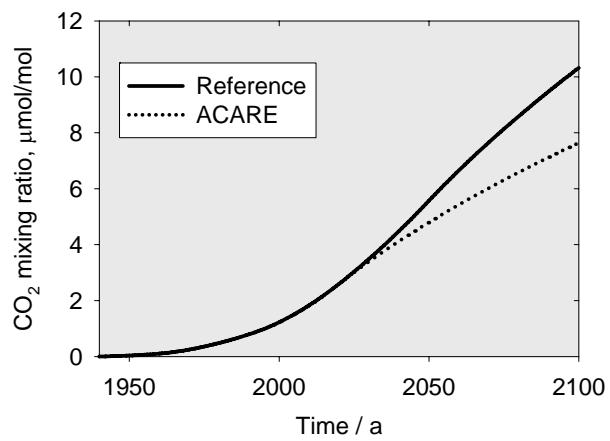
## Treibstoffverbrauch – Szenario (!!!) mit/ohne ACARE



### Temperatur für Referenzfall



### CO<sub>2</sub>-Mischungsverhältnis, mit/ohne ACARE



## Strahlungsantrieb mit/ohne ACARE:

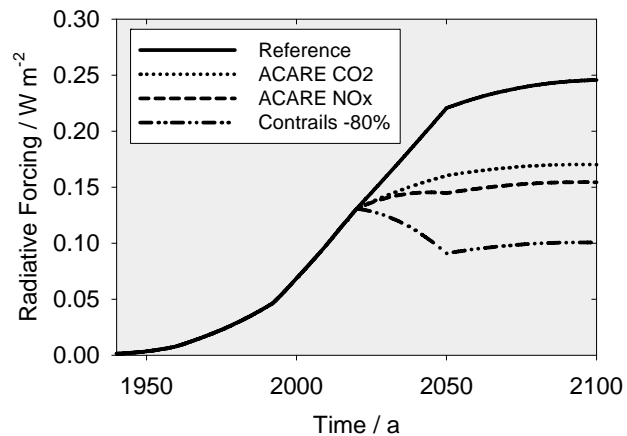
1: ohne ACARE

2: mit CO<sub>2</sub>-Reduktion

(impliziert auch weniger NO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub>O, Contrail+Cirrus)

3: mit 80%-NO<sub>x</sub>-Reduktion

4: mit 80% Contrail+Cirrus-Reduktion



## Temperaturänderung

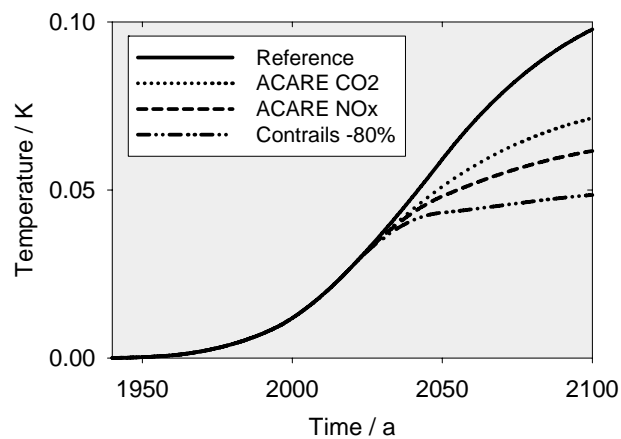
1: ohne ACARE

2: mit CO<sub>2</sub>-Reduktion

3: mit 80%-NO<sub>x</sub>-Reduktion

4: mit 80% Contril+Cirrus-Reduktion

**Qualitatives  
Ergebnis!  
Zahlenwerte hängen  
stark von den  
Annahmen ab!!!**



## ACARE erreichbar und ausreichend?

Grundsätzlich gibt es keinen Grund anzunehmen, dass die ACARE/Ziele nicht erreichbar wären.

Bei den gegenwärtigen Wachstumsraten, wächst der Treibstoffverbrauch im Luftverkehr selbst bei 50 % Reduktion in den spezifischen CO<sub>2</sub>/Emissionen ab 2020 weiter.

Durch zusätzliche Reduktion der Klimabeiträge von NO<sub>x</sub> und Kondensstreifen, ließe sich die Klimawirkung des Luftverkehrs zusätzlich deutlich reduzieren.

Die Realisierung der ACARE Ziele ist wichtig und muss konsequent angegangen werden.

## Luftfahrt und Klima im Wandel - Zusammenfassung

1. Das Klima der Erde ändert sich zunehmend, insbesondere aufgrund der Verbrennung fossiler Treibstoffe etc.; Die Erdölvorräte sind begrenzt; Rohöl wird laufend teurer.
2. Der Luftverkehr trägt zunehmend zum Klimawandel bei; selbst mit ACARE kann er alleine die Klimaschutzziele nicht erreichen; ACARE muss bald konsequent umgesetzt werden.
3. Die Luftfahrt sollte zudem revolutionäre Maßnahmen zum Klimaschutz ergreifen (Klimaoptimierter Luftverkehr, CO<sub>2</sub>-Reduktions-Sharing; LH<sub>2</sub> aus Kernkraft, ...)
4. Wichtige offene Fragen erfordern erheblich mehr Forschung als bisher; erfordert Verbund aller am Luftfahrtsystem Beteiligten
5. DLR: Reduktion der Unsicherheiten in der Klimawirkung + Projekt „Klimaoptimierter Luftverkehr“ (Climate optimized air traffic, CAT)



## Referenzen

- Hansen, J., M. Sato, R. Ruedy, L. Nazarenko, A. Lacis, et al. (2005), Efficacy of climate forcings, *J. Geophys. Res.*, **110**, D18104.
- Hasselmann, K., R. Sausen, E. Maier-Reimer, and R. Voss (1993), On the cold start problem in transient simulations with coupled atmosphere-ocean models, *Climate Dynamics*, **9**, 53-61.
- IEA (2007), *Oil Information, Table 9*, 746 pp., International Energy Agency (IEA), Paris.
- IPCC (1999), *Aviation and the Global Atmosphere*, 373 pp., Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.
- IPCC (2007), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 996 pp., Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K.
- Marquart, S., M. Ponater, F. Mager, and R. Sausen (2003), Future development of contrail cover, optical depth, and radiative forcing: impacts of increasing air traffic and climate change, *J. Clim.*, **16**, 2890-2904.
- Ponater, M., S. Marquart, R. Sausen, and U. Schumann (2005), On contrail climate sensitivity, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L10706.
- Ponater, M., S. Pechtl, R. Sausen, U. Schumann, and G. Hüttig (2006), Potential of the cryoplane technology to reduce aircraft climate impact: A state-of-the-art assessment, *Atmos. Env.*, **40**, 6928-6944.
- Sausen, R., and U. Schumann (2000), Estimates of the climate response to aircraft CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub>-emission scenarios, *Climatic Change*, **44**, 27 - 58.
- Sausen, R., I. Isaksen, D. Hauglustaine, V. Grewe, D. S. Lee, et al. (2005), Aviation radiative forcing in 2000: An update on IPCC (1999), *Meteorol. Z.*, **14**, 555 - 561.
- Schumann, U. (1996), On conditions for contrail formation from aircraft exhausts, *Meteorol. Z.*, **5**(1), 4-23.
- Schumann, U. (2000), Influence of propulsion efficiency on contrail formation, *Aerosp. Sci. Techn.*, **4**, 391-401.
- Schumann, U. (2005), Formation, properties and climate effects of contrails, *Compt. Rend. Phys.*, **6**, 549 - 565.