

# Auswirkungen des Luftverkehrs auf die Zusammensetzung der Atmosphäre und das Klima

DMG Fortbildungstag

30.09.2022

Katrin Dahlmann

DLR

Institut für Physik der Atmosphäre

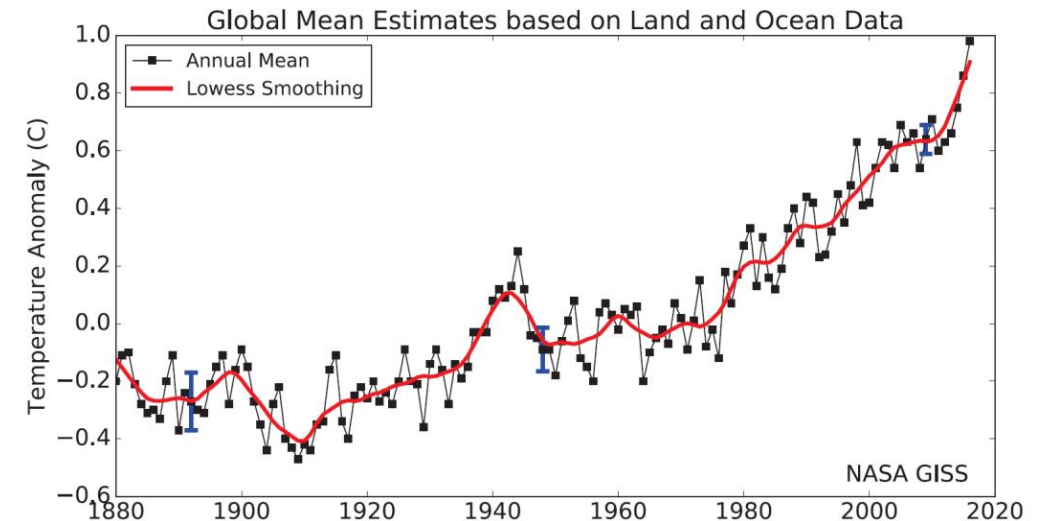


Knowledge for Tomorrow



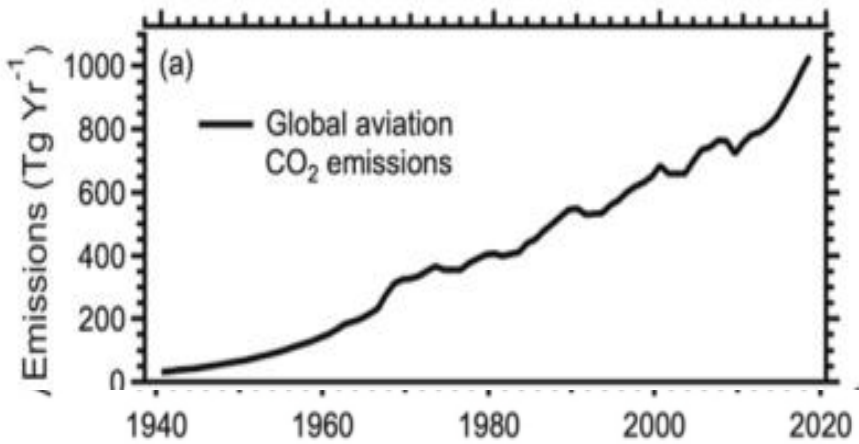
## Einleitung

- Auswirkungen des Klimawandels werden immer deutlicher
- Klimawandel immer stärker im Fokus des öffentlichen Interesses
- Luftverkehr trägt zum Klimawandel bei
- Immer mehr Menschen versuchen Fliegen zu vermeiden - Stichwort Flugscham
- Wie wirkt der Luftverkehr auf das Klima und was ist besonders am Luftverkehr?

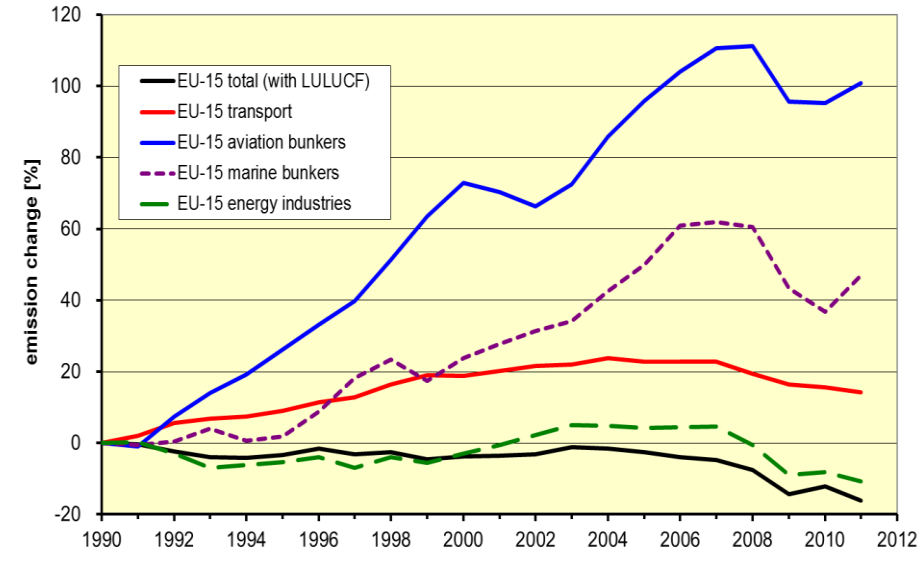


# Emissionen Luftverkehr

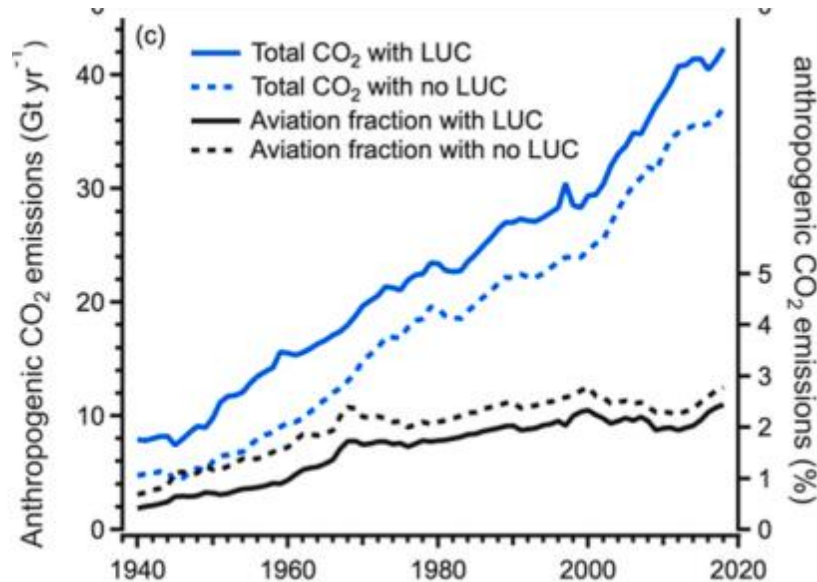
- Starke Zunahme der Emissionen
- Weiteres Wachstum wird erwartet
- Aktueller Beitrag zum gesamten anthropogenen CO<sub>2</sub> bei 2.5 %
- Stärkeres Wachstum als in anderen Sektoren



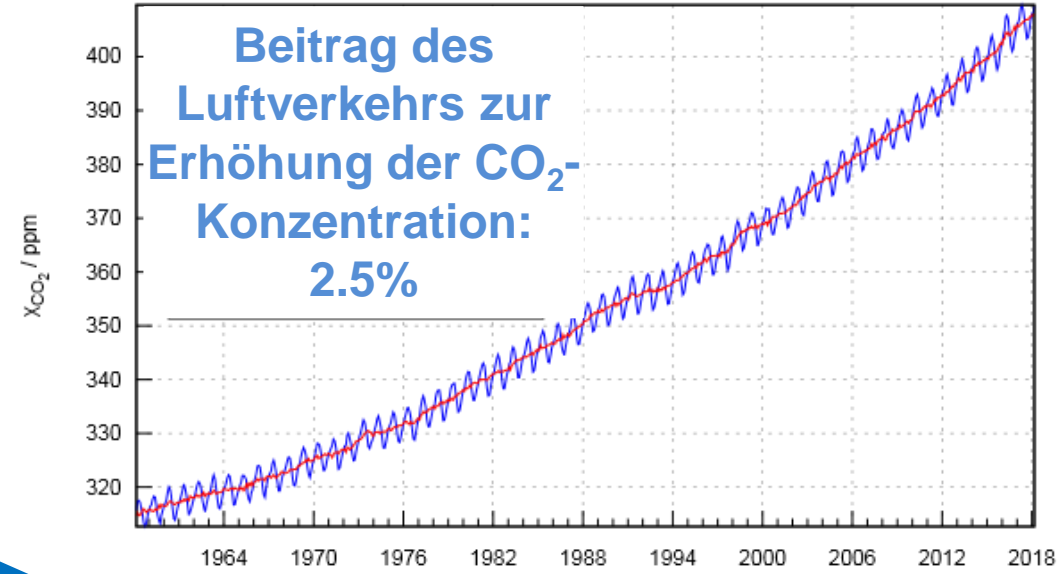
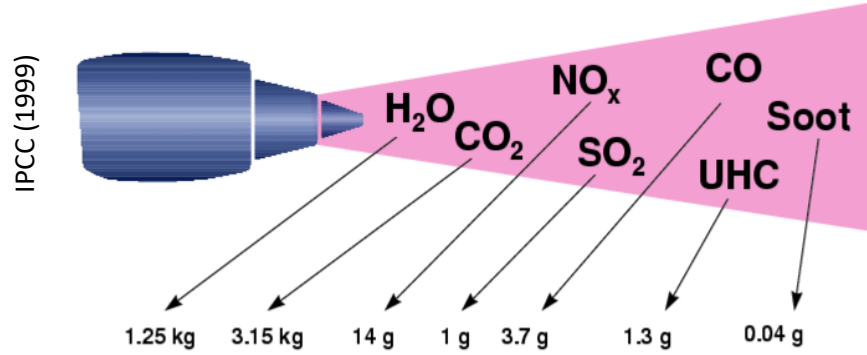
Lee et al, 2021



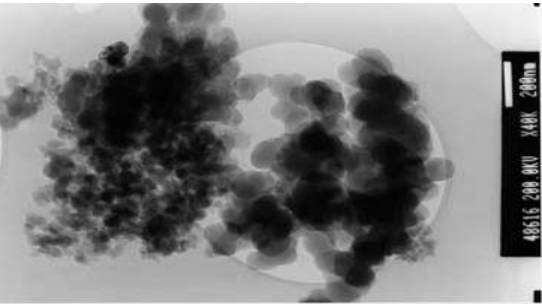
year  
data: <http://unfccc.int/>



# Klimawirkung von Luftverkehrsemissionen



Direkter Aerosol-Effect



Popovicheva et al. (2004)

Aerosol-Effects auf Wolken



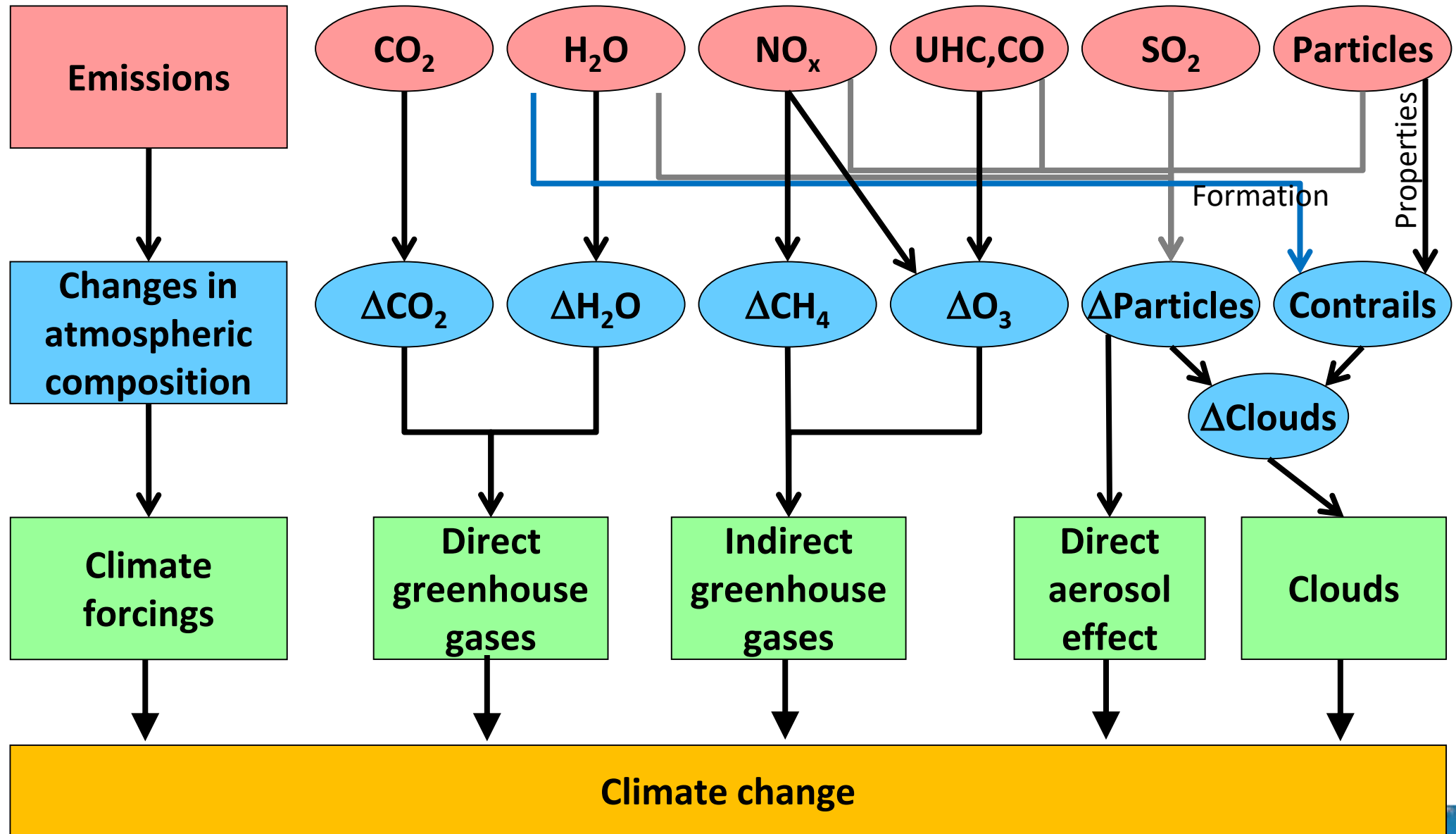
Kondensstreifen



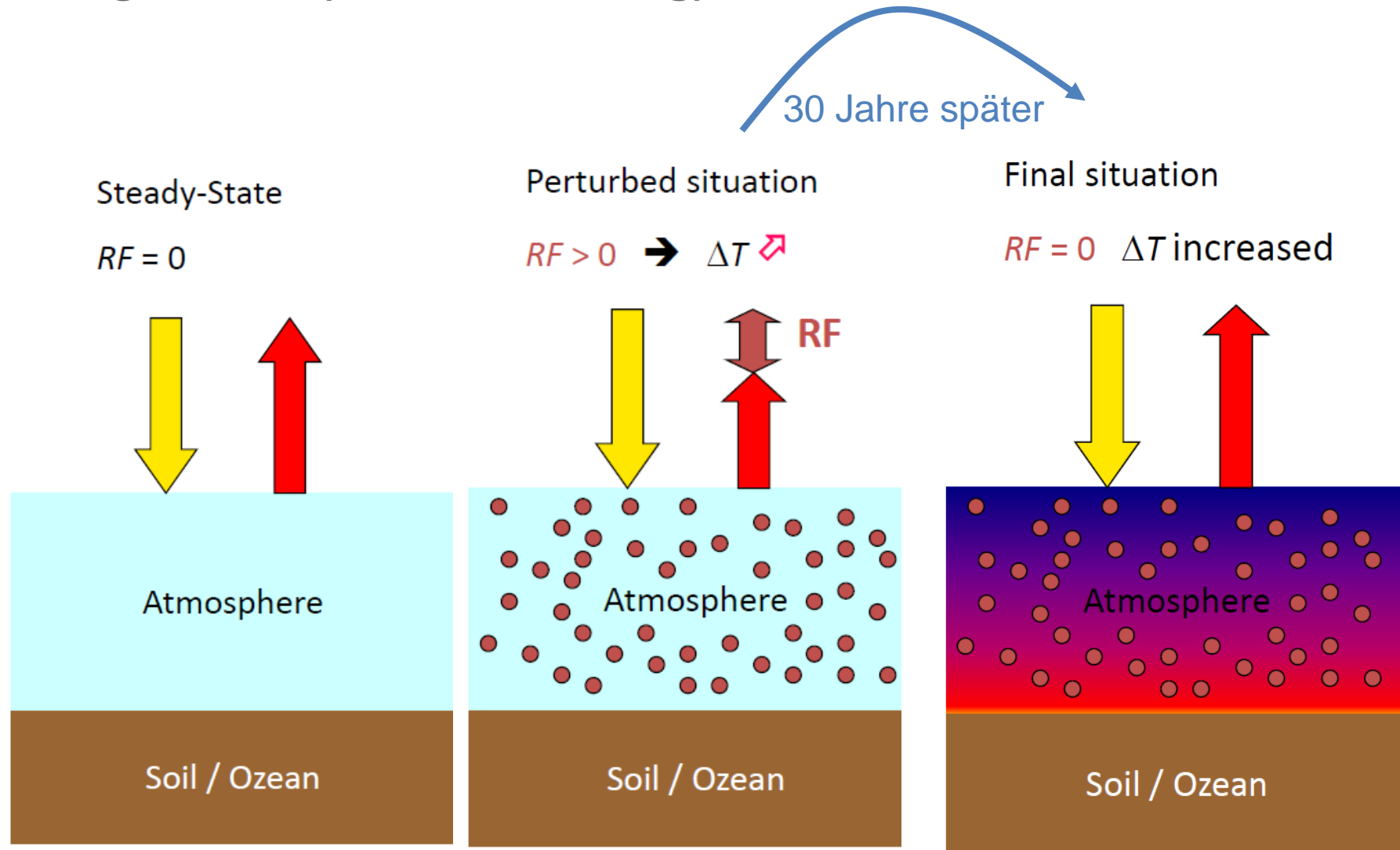
Indirekte Treibhausgas-Chemie



# Überblick: Klimawirkung des Luftverkehrs



# Strahlungsantrieb (Radiative Forcing)



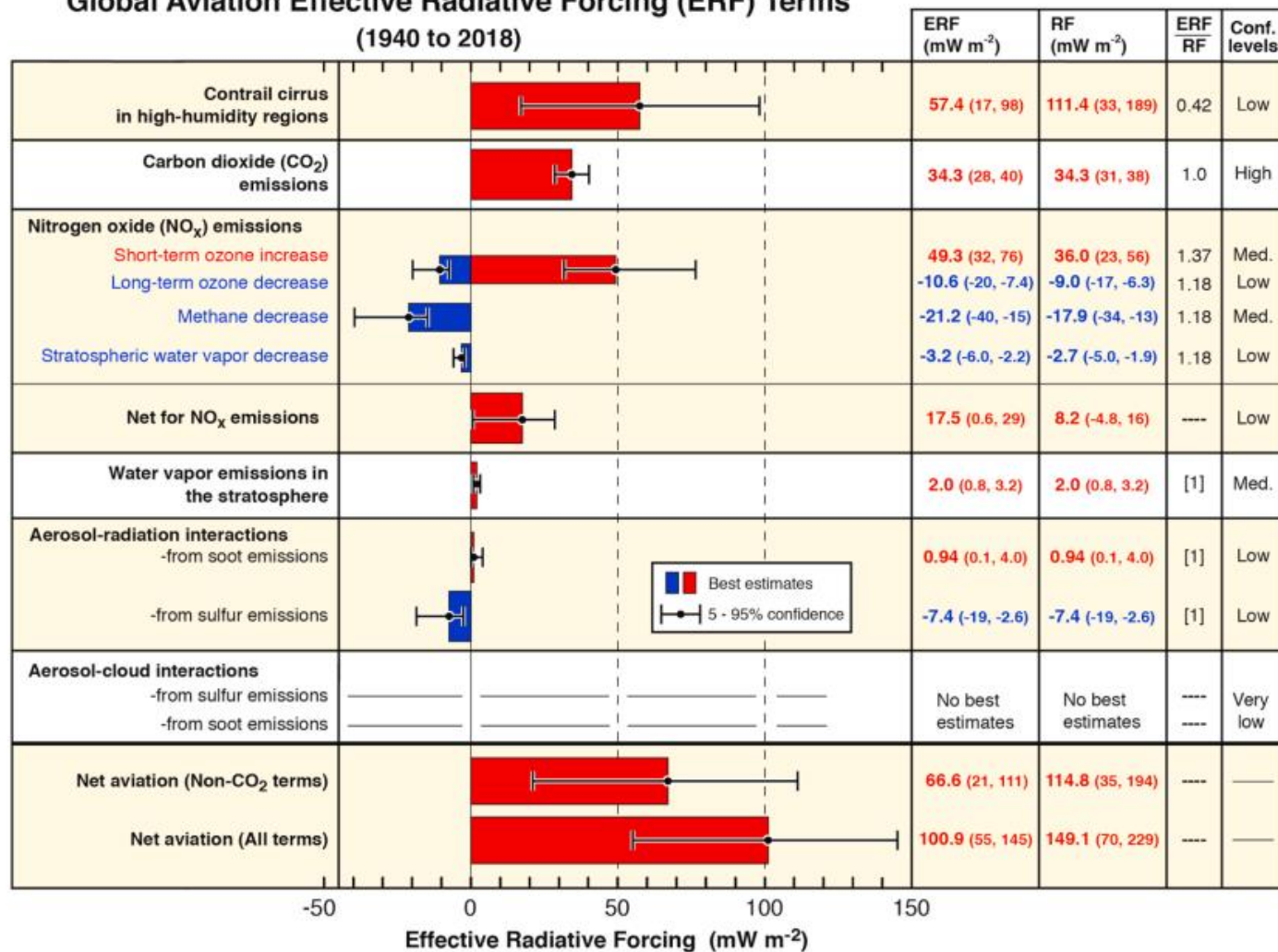
$$\Delta T = \lambda_x RF$$

Klimasensitivität  
(verschiedene für  
unterschiedliche  
Klimaspezies)



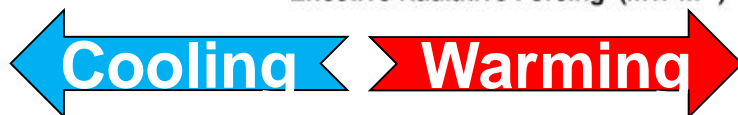
# Wie wichtig sind die Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte?

Global Aviation Effective Radiative Forcing (ERF) Terms  
(1940 to 2018)



$$\Delta T = \lambda_x RF$$

Klimasensitivität  
(verschiedene für  
unterschiedliche  
Klimaspezies)

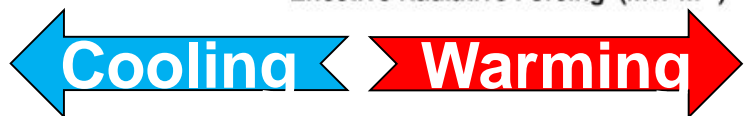
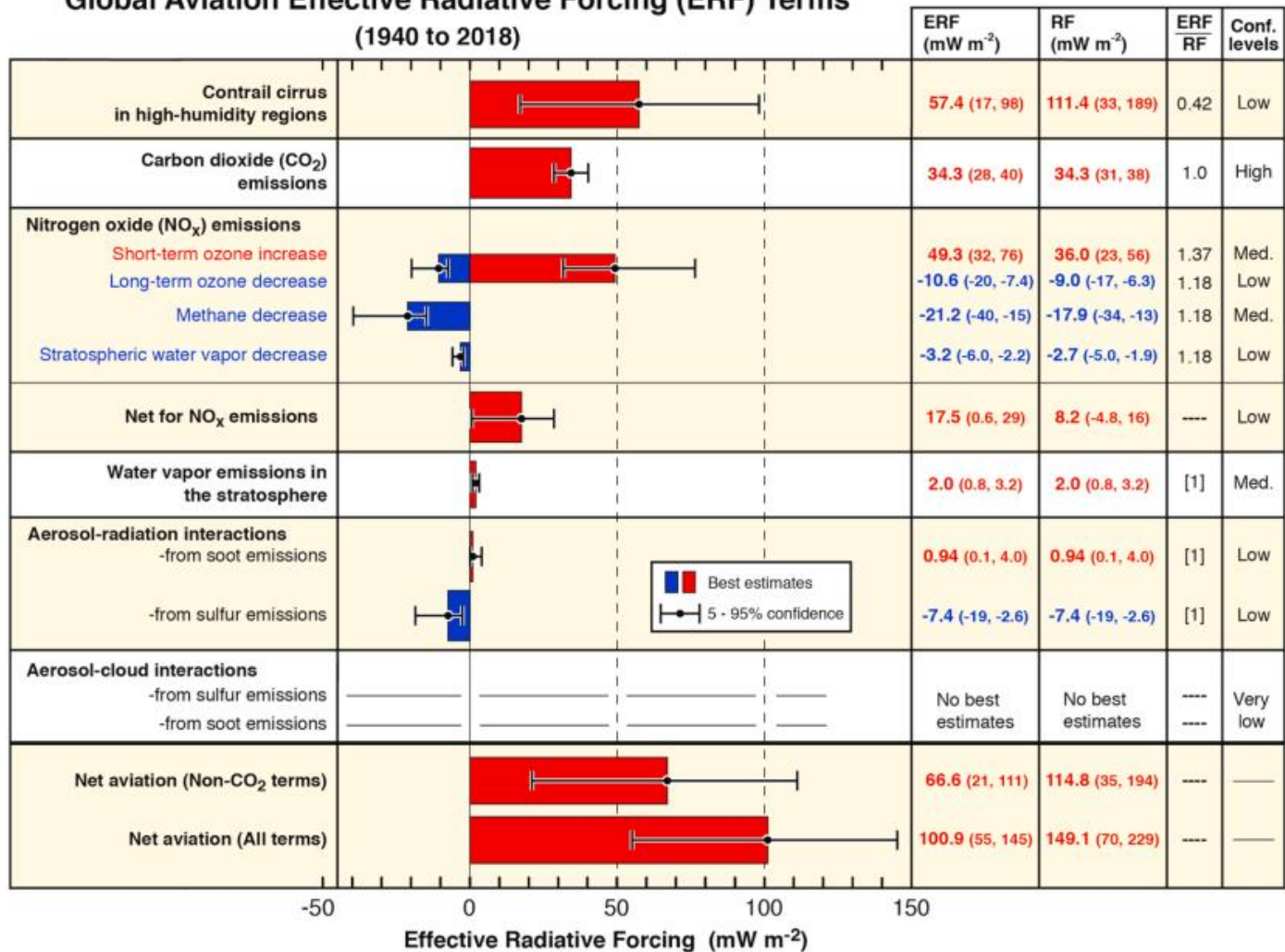


Lee et al. 2021



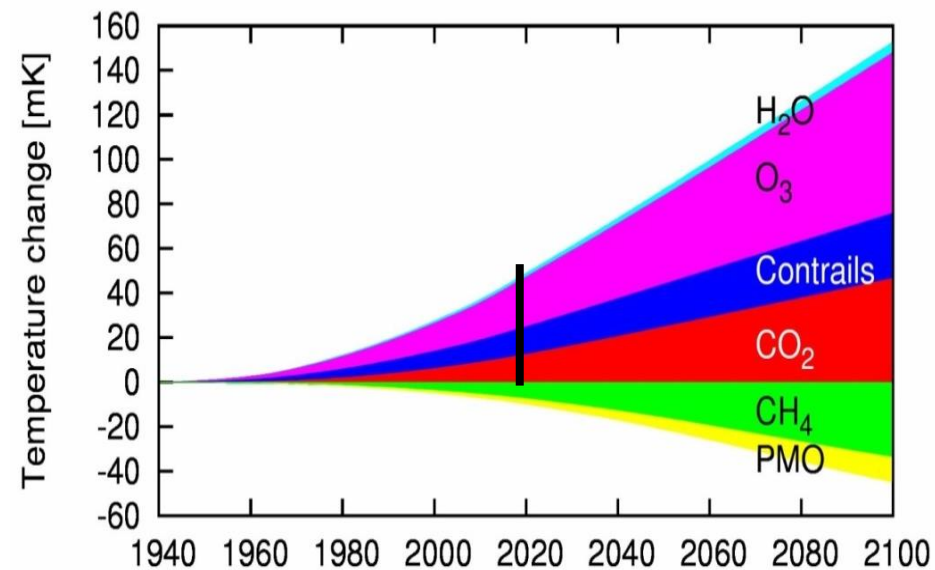
# Wie wichtig sind die Nicht-CO2-Effekte?

Global Aviation Effective Radiative Forcing (ERF) Terms (1940 to 2018)



Lee et al. 2021

## Temperaturänderung



Grewe et al. (2020)

2018 etwa 50 mK von 1K  $\cong$  5%  
 Mehr als 50% der Klimawirkung  
 des Luftverkehrs resultieren von  
 Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekten

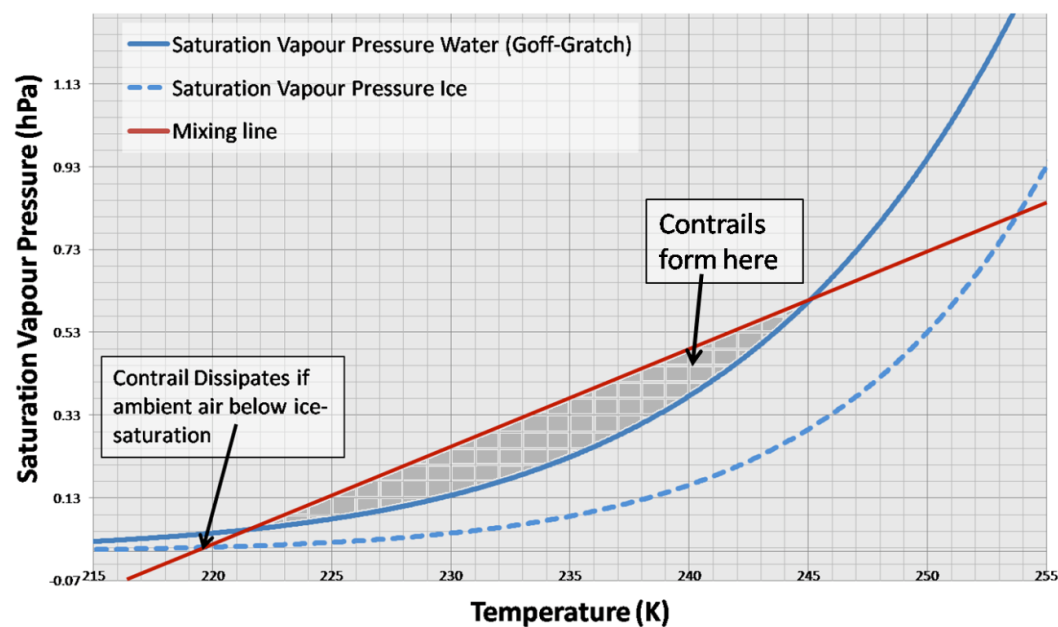




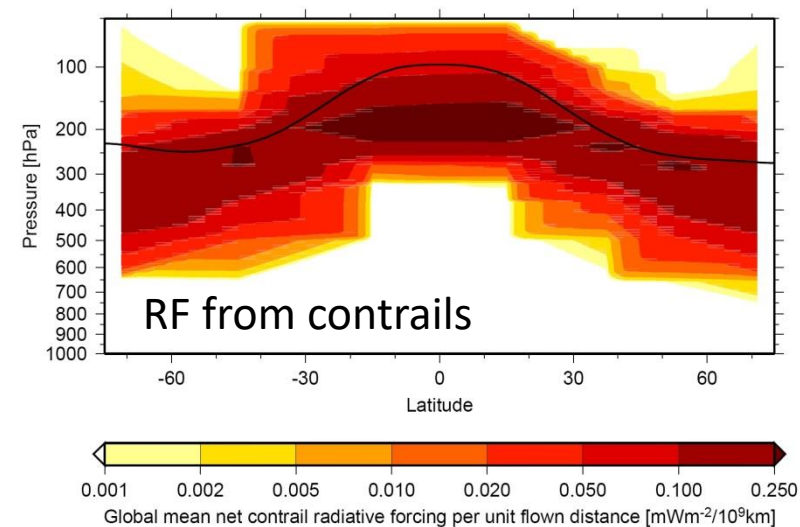
# Kondensstreifen

- entstehen bei hinreichend kalten Temperaturen (Schmidt-Appleman-Kriterium)
- wachsen bei hinreichend feuchtem Hintergrund
- wirken im Einzelfall erwärmend oder kühlend (im Mittel Erwärmung)

## Schmidt-Appleman

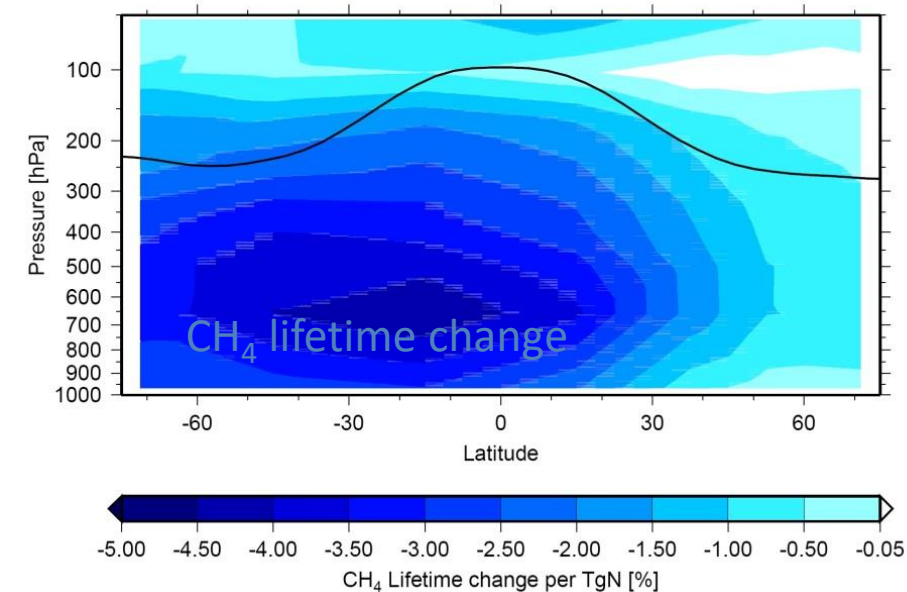
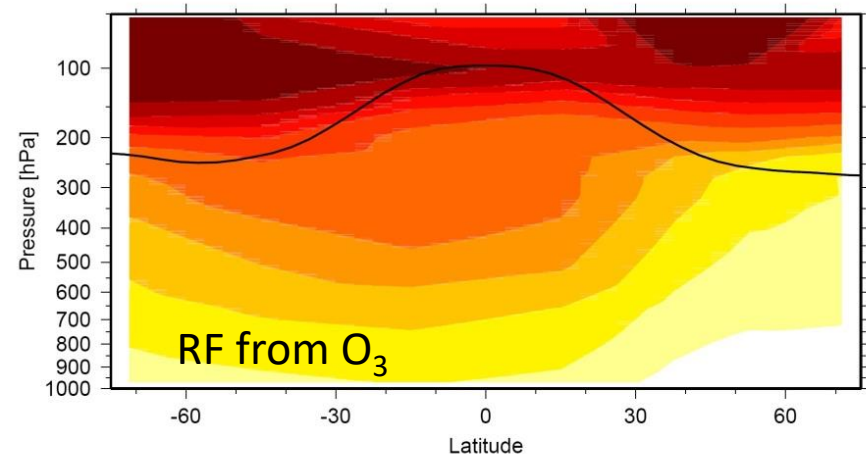
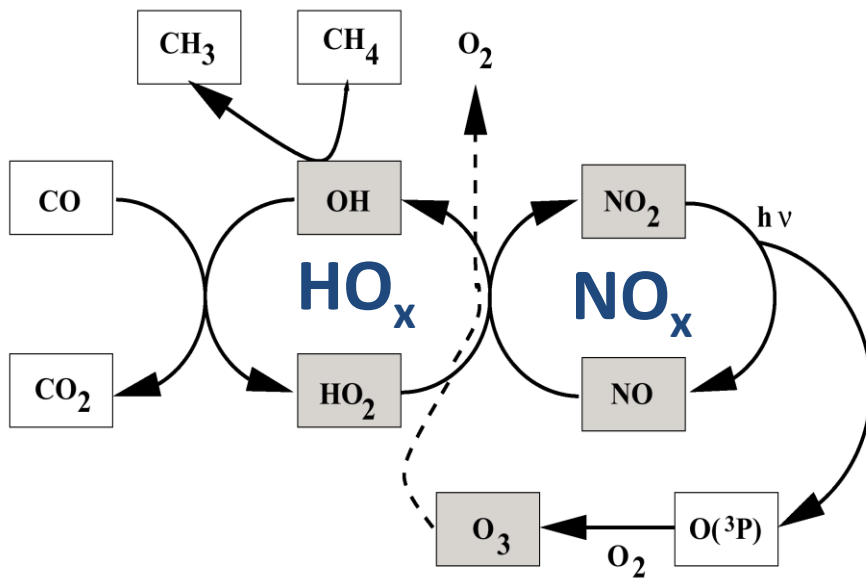
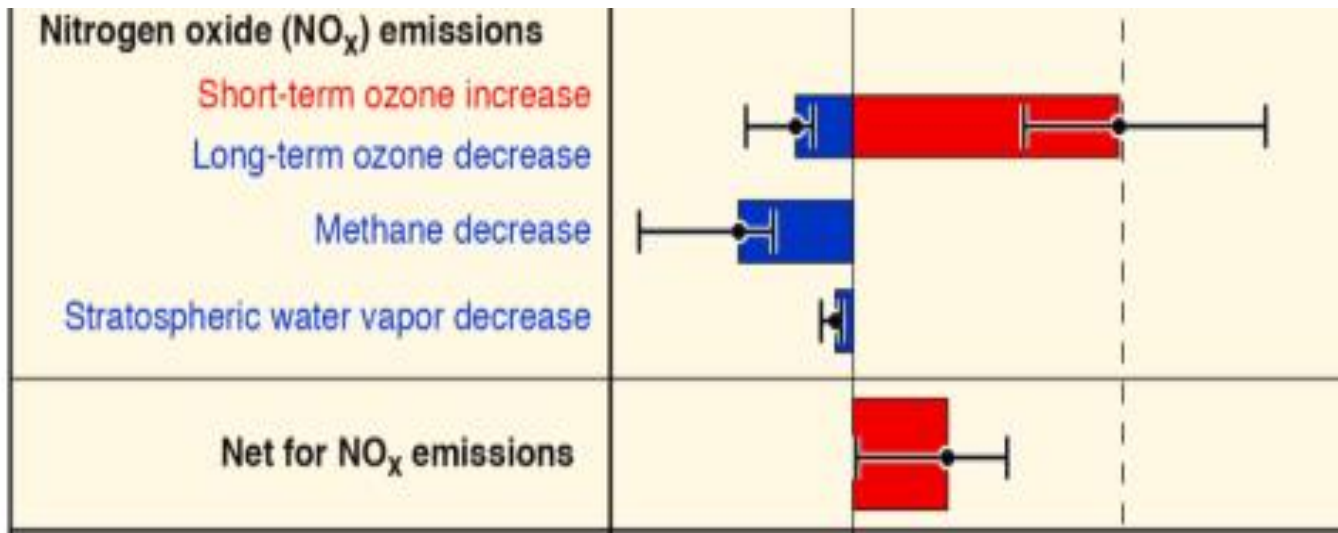


Whelan et al., 2009



Fichter 2009

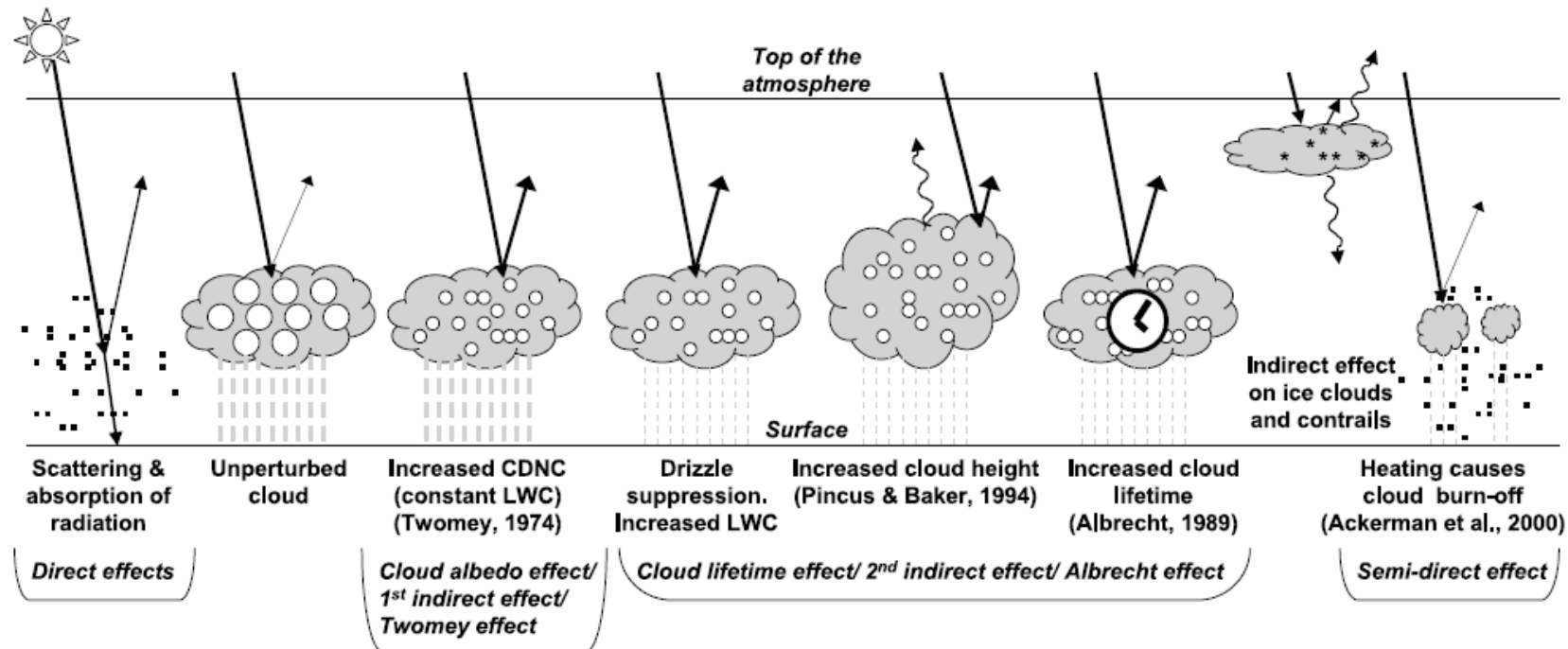
# Wirkung von Stickoxidemissionen (NO<sub>x</sub>)



Fichter 2009

# Aerosole

- Direkter Effekt durch Absorption, Streuung und Reflektion
- Indirekter Effekt durch Beeinflussung von Wolkenbildung und -eigenschaften



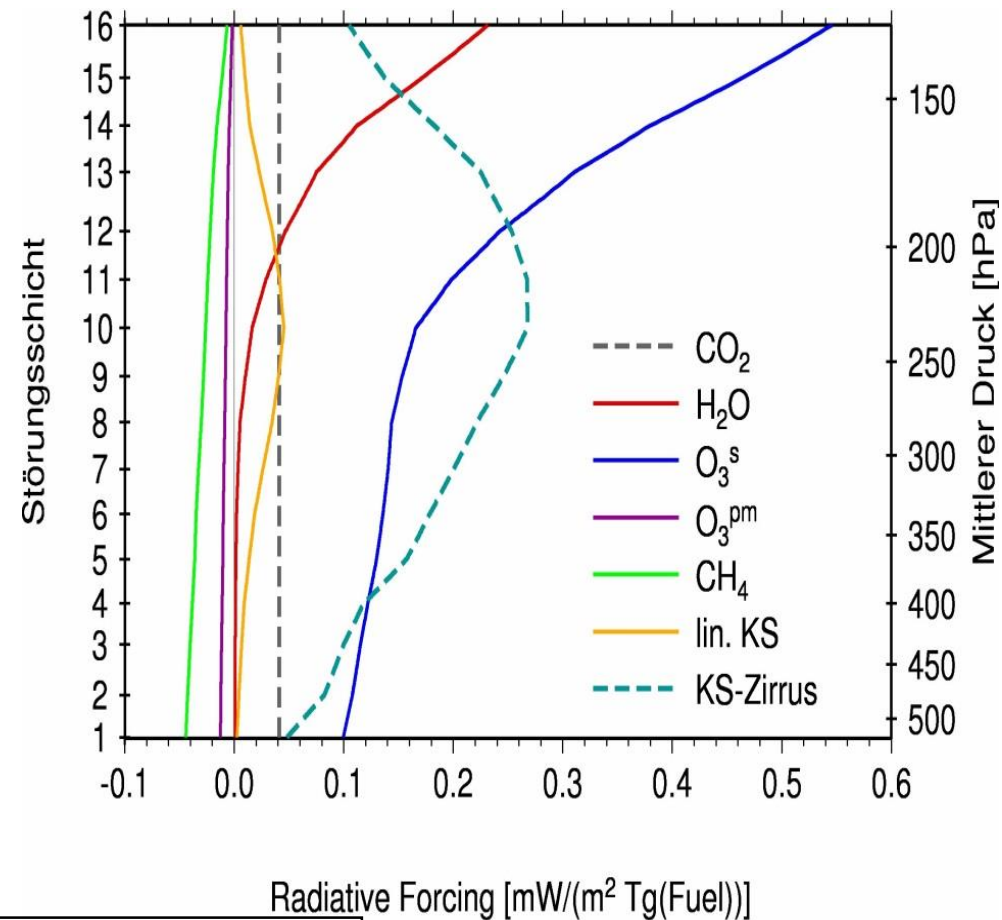
**Figure 2.10.** Schematic diagram showing the various radiative mechanisms associated with cloud effects that have been identified as significant in relation to aerosols (modified from Haywood and Boucher, 2000). The small black dots represent aerosol particles; the larger open circles cloud droplets. Straight lines represent the incident and reflected solar radiation, and wavy lines represent terrestrial radiation. The filled white circles indicate cloud droplet number concentration (CDNC). The unperturbed cloud contains larger cloud drops as only natural aerosols are available as cloud condensation nuclei, while the perturbed cloud contains a greater number of smaller cloud drops as both natural and anthropogenic aerosols are available as cloud condensation nuclei (CCN). The vertical grey dashes represent rainfall, and LWC refers to the liquid water content.

## Höhenabhängigkeit der Klimawirkung

- Abhängigkeit der Klimawirkung vom Emissionsort
  - ⇒ Klimawirkung nicht direkt proportional zur Emission
- Konkurrierende Effekte:
  - Triebwerkseffizienz:
    - Verbrauch  $\leftrightarrow$  O<sub>3</sub>, Kondensstreifen-Zirren



Schumann et al., 2000

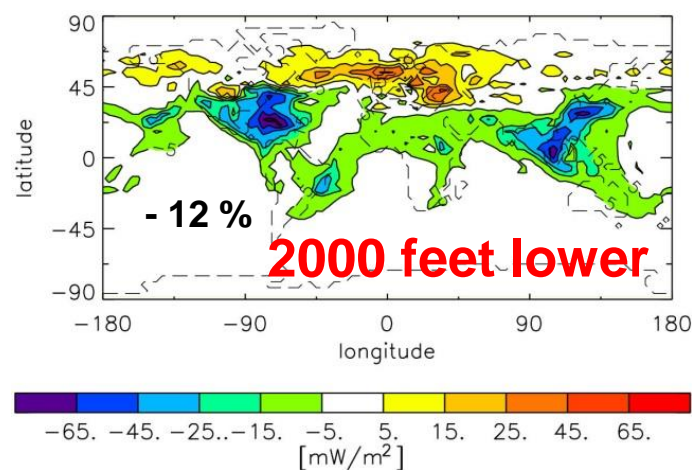
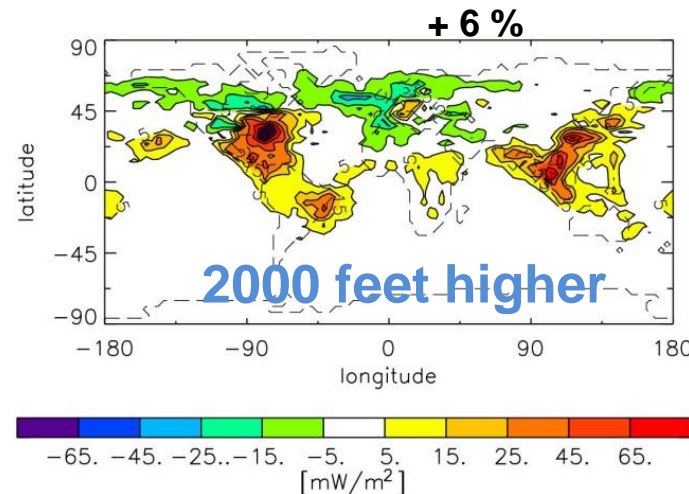


Abgasstrahl moderner Triebwerke ist kälter. Daher können Kondensstreifen auch in wärmeren Gebieten entstehen.

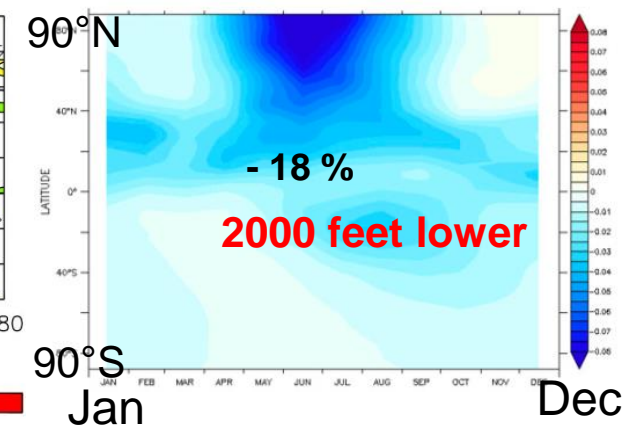
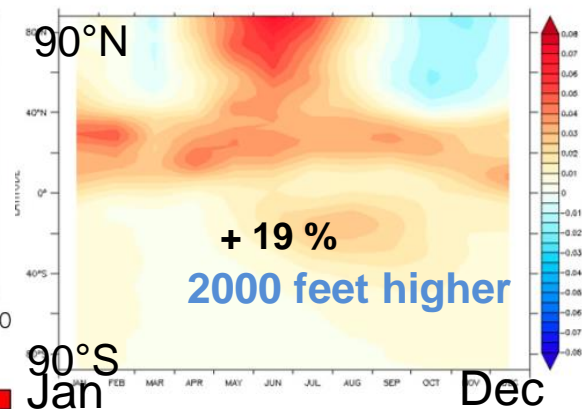
# Höhenabhängigkeit der Klimawirkung

- Abhängigkeit der Klimawirkung vom Emissionsort
  - ⇒ Klimawirkung nicht direkt proportional zur Emission
- Konkurrierende Effekte:
  - Triebwerkseffizienz: Verbrauch  $\Leftrightarrow$  O<sub>3</sub>, Zirren
  - Höher fliegen: Verbrauch sinkt  $\Leftrightarrow$  Klimaeinfluss von Ozon und Kondensstreifen steigt

## Kondensstreifen-Zirren



## Luftverkehrsbedingtes O<sub>3</sub>

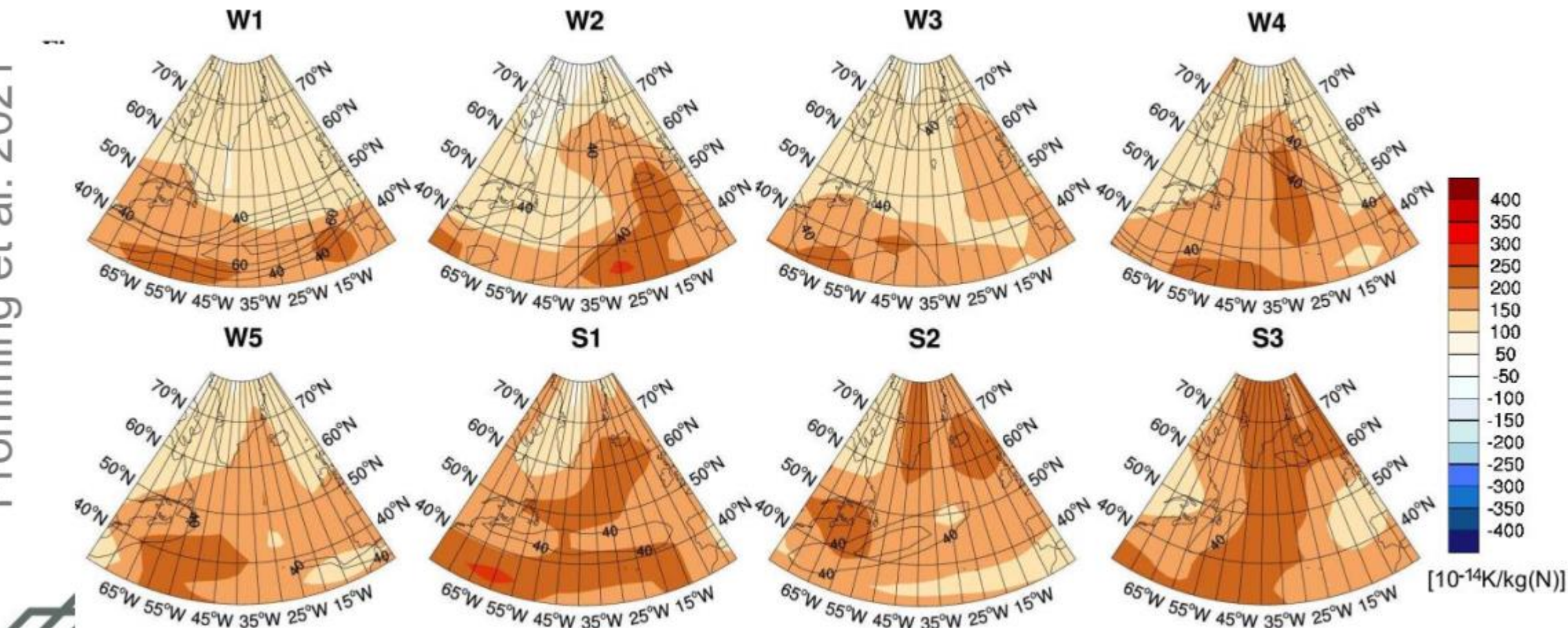


Matthes et al. 2021



# Wetterabhängigkeit der Klimawirkung

Frömming et al. 2021

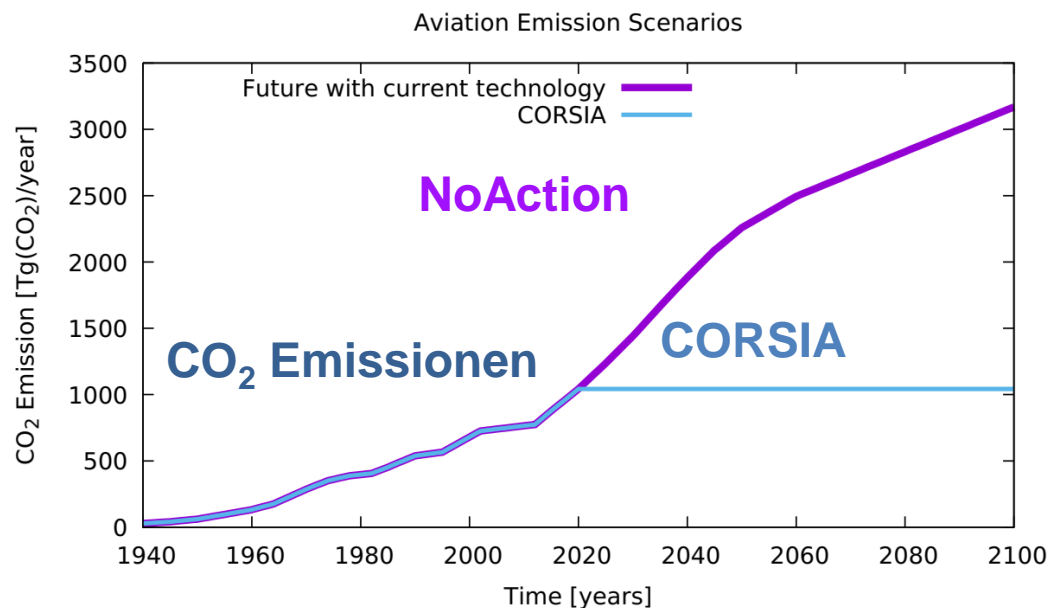


Ozon ATR20

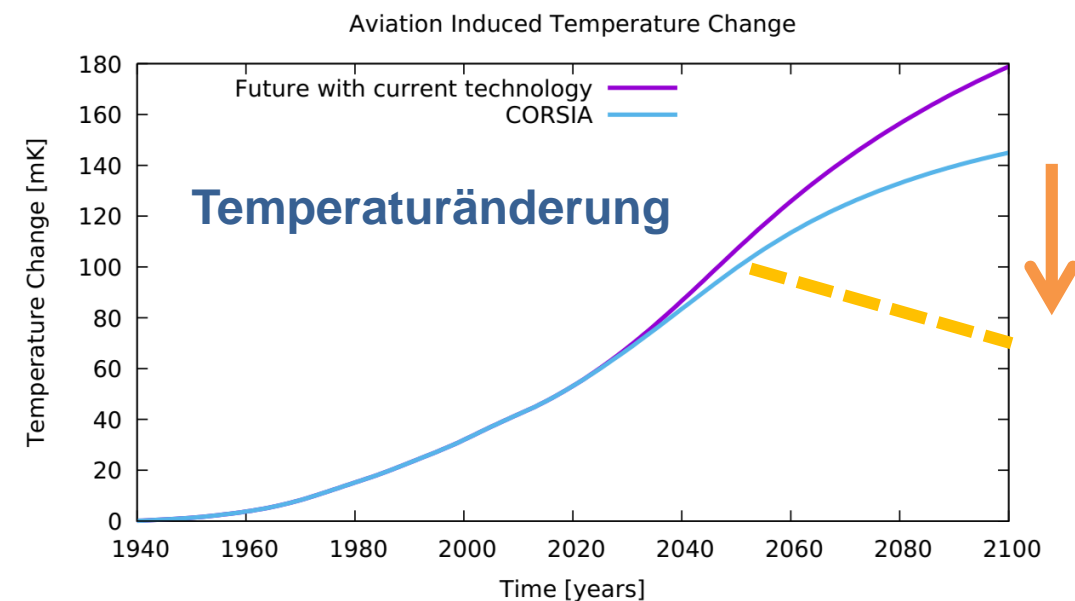




# Reicht CO<sub>2</sub>-neutrales Wachstum?



**Starke Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen**  
**Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte steigen weiter an**



**Geringe Reduktion der Temperaturänderung**

- CO<sub>2</sub> akkumuliert sich
- Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte wachsen weiter

**Reduktion der Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte kann Temperaturänderung weiter senken**







# Options to reduce the climate impact of aviation

## Technological measures


**Reduction of spec. Fuel consumption (SFC), weight ( $w_{OE}$ ) and aerodynamic (L/D)**



specific fuel consumption



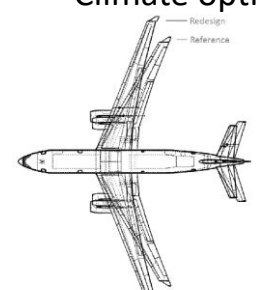
operational empty weight



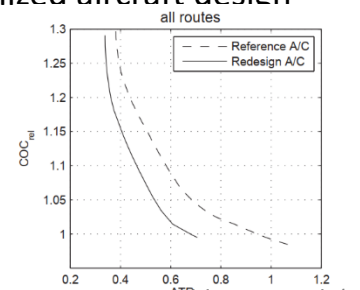
lift over drag ratio

Ghosh et al. (2017)

**Climate optimized aircraft design**



all routes




Dahlmann et al. (2016)

...


## Alternative Fuel

**Production of alternative fuel with climate neutral CO<sub>2</sub>**


Extraktion




Konversion




Distribution



Betrieb

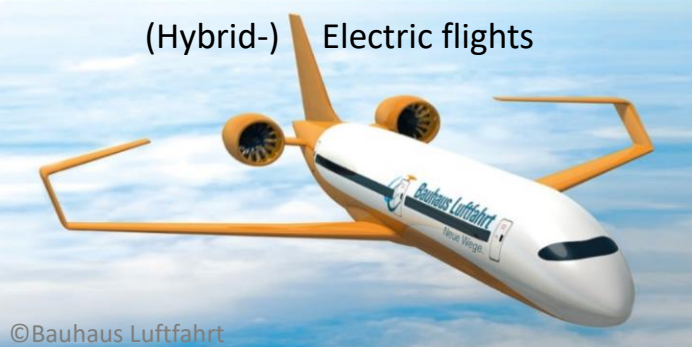


Blending



Niklaß und Meyer (2016)

**(Hybrid-) Electric flights**



©Bauhaus Luftfahrt

...

## Operational measures

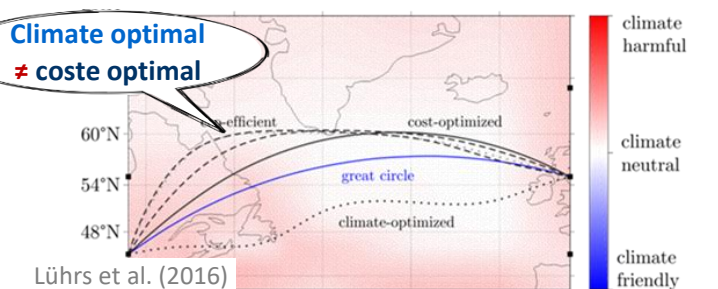
**Efficient flight guidance**



Eurocontrol (2014)

**Climate optimized flights**

Climate optimal  
≠ coste optimal



Lührs et al. (2016)

...



# Zusammenfassung

- Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekt spielen eine wichtige Rolle
- Klimawirkung von Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekten hängen vom Emissionsort und Wetter ab
  - ⇒ Klimawirkung nicht direkt proportional zur Emissionsmenge
  - ⇒ Sehr unterschiedliche Lebenszeiten
- Um das 1.5°C Ziel zu erreichen müssen auch Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte reduziert werden



# Danke für Ihre Aufmerksamkeit

## Fragen?

Dr. Katrin Dahlmann  
DLR Oberpfaffenhofen  
Phone +49 8153 28 2556  
Email [Katrin.Dahlmann@dlr.de](mailto:Katrin.Dahlmann@dlr.de)



Knowledge for Tomorrow

