

Auswirkungen des Flugverkehrs auf den Klimawandel unter Einbeziehung von Contrails und Zirren

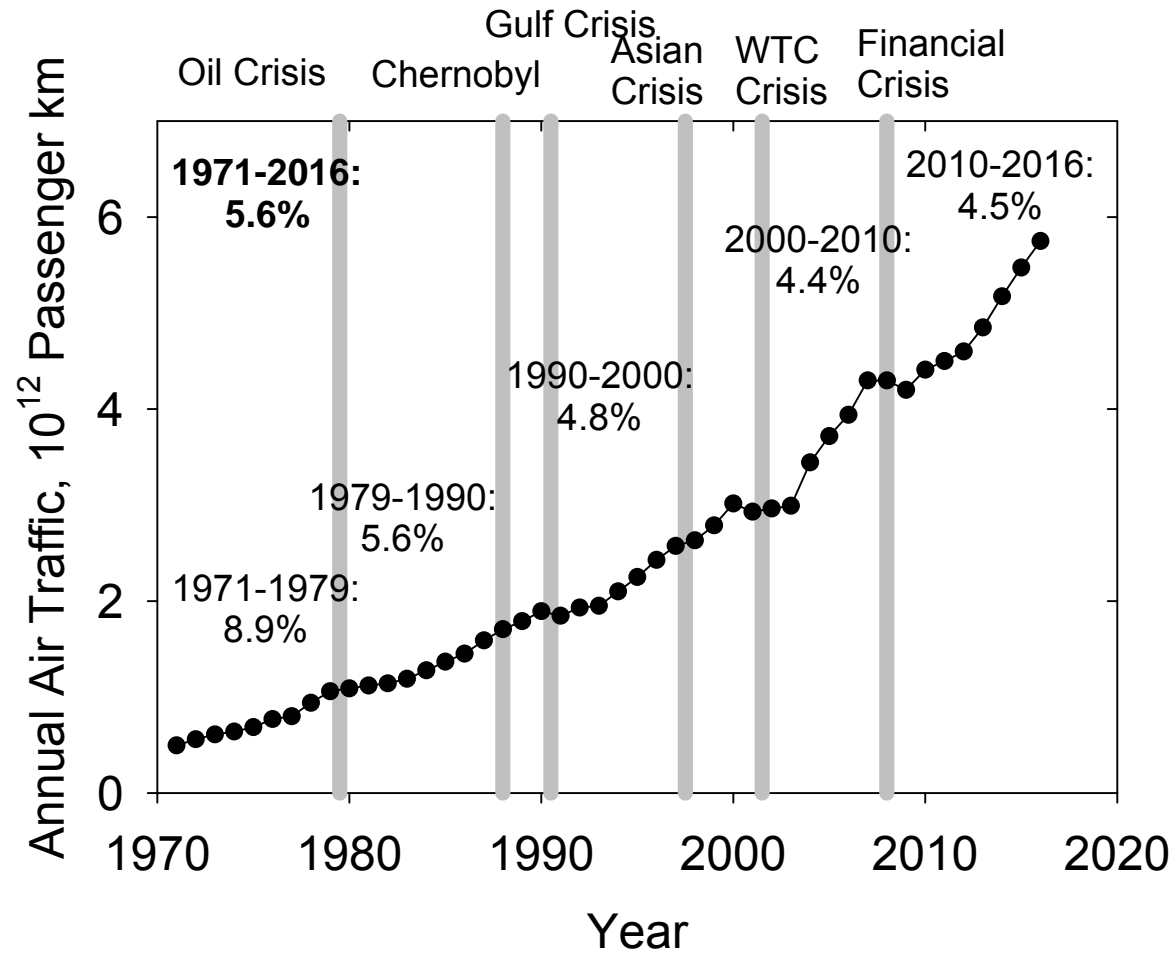
Ulrich Schumann

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen, Germany

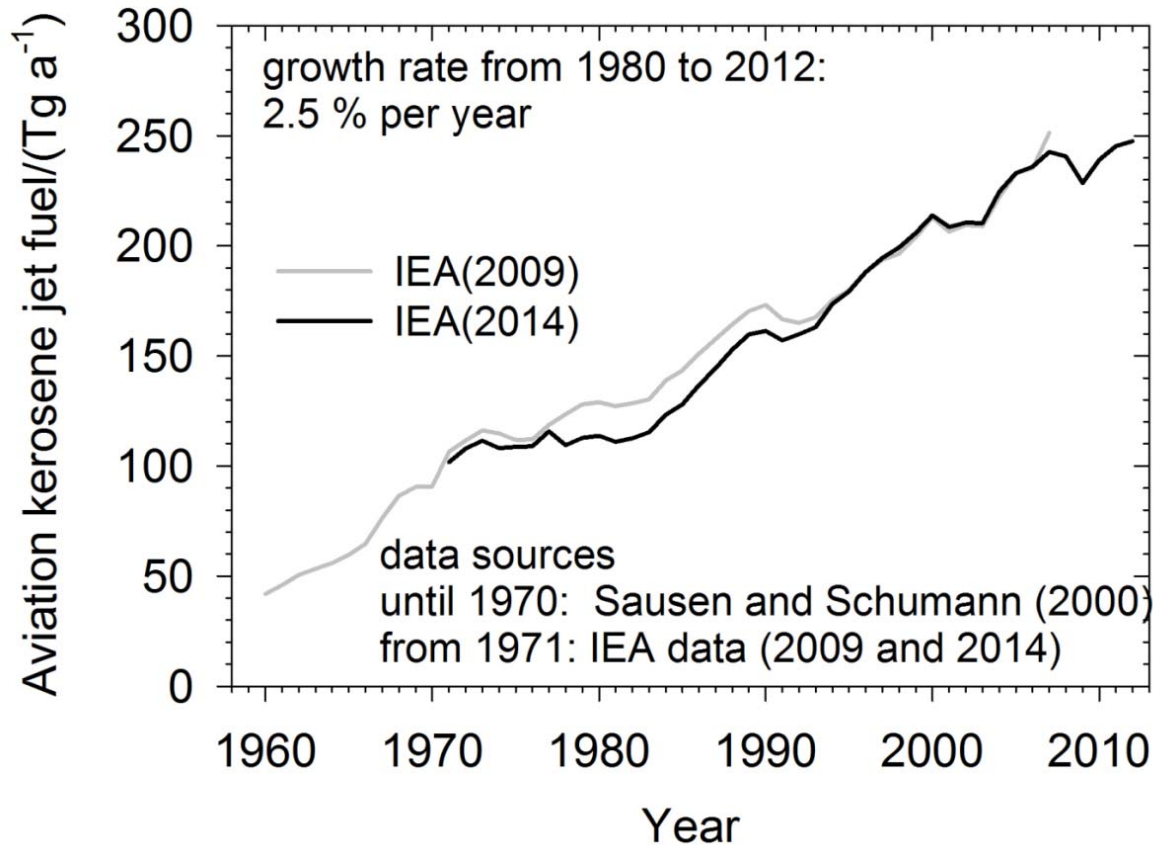
- Luftverkehr, seine Emissionen und zeitliche Entwicklung
- Klimawirkung von kurz- und langlebigen Störungen (CO_2 , NO_x (CH_4 , O_3), Ruß, Sulfate, H_2O + Ruß \rightarrow Contrail-Cirrus)
- Kondensstreifen und Zirren (Contrail-Cirrus)
- Überlegungen zur Efficacy: $\Delta T_x(t \rightarrow \infty) = \lambda_x \text{RF}_x$, "efficacy" = $\lambda_x / \lambda_{\text{CO}_2}$
- Möglichkeiten zur Verminderung der Klimawirkung

Passagier-Transport, global: + 5.6 %/Jahr seit 1971



Sources: ICAO 1971-2010, IATA 2012-2016, Fischer et al. (GAIA, 2009), Schumann, DLR

Kerosin-Produktion: 2.5%/Jahr seit 1980



2015: 290 Tg/a

Source: International Energy Agency: World Energy Outlook 2016

Zukunft: “New policy scenario”

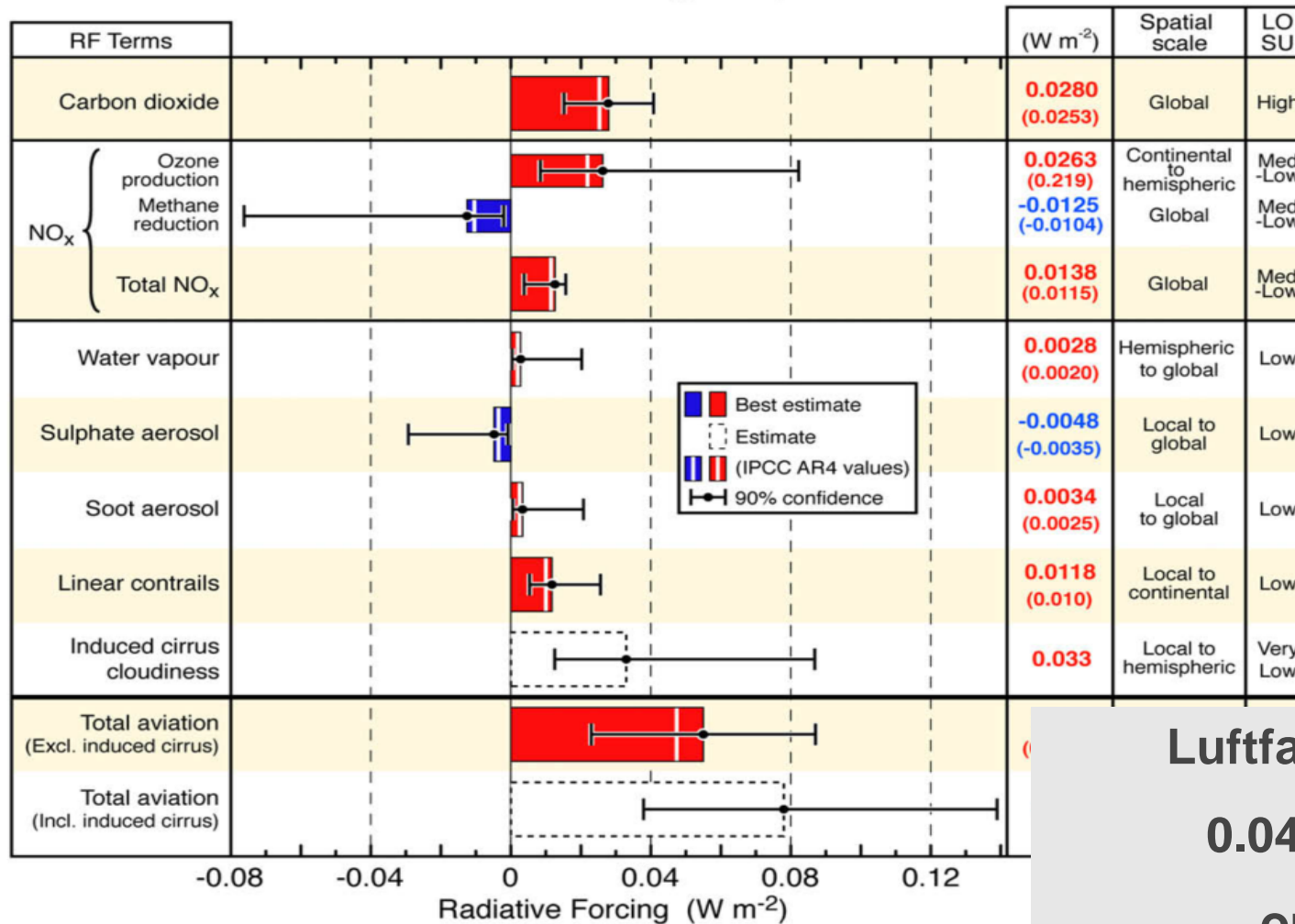
aviation oil demand increases by factor 2 from year 2000 to 2040

total: increase by factor 1.34

Source: International Energy Agency: World Energy Outlook 2016

Strahlungsantrieb aus Luftfahrt bis 2005: 0.04 - 0.14 W/m²

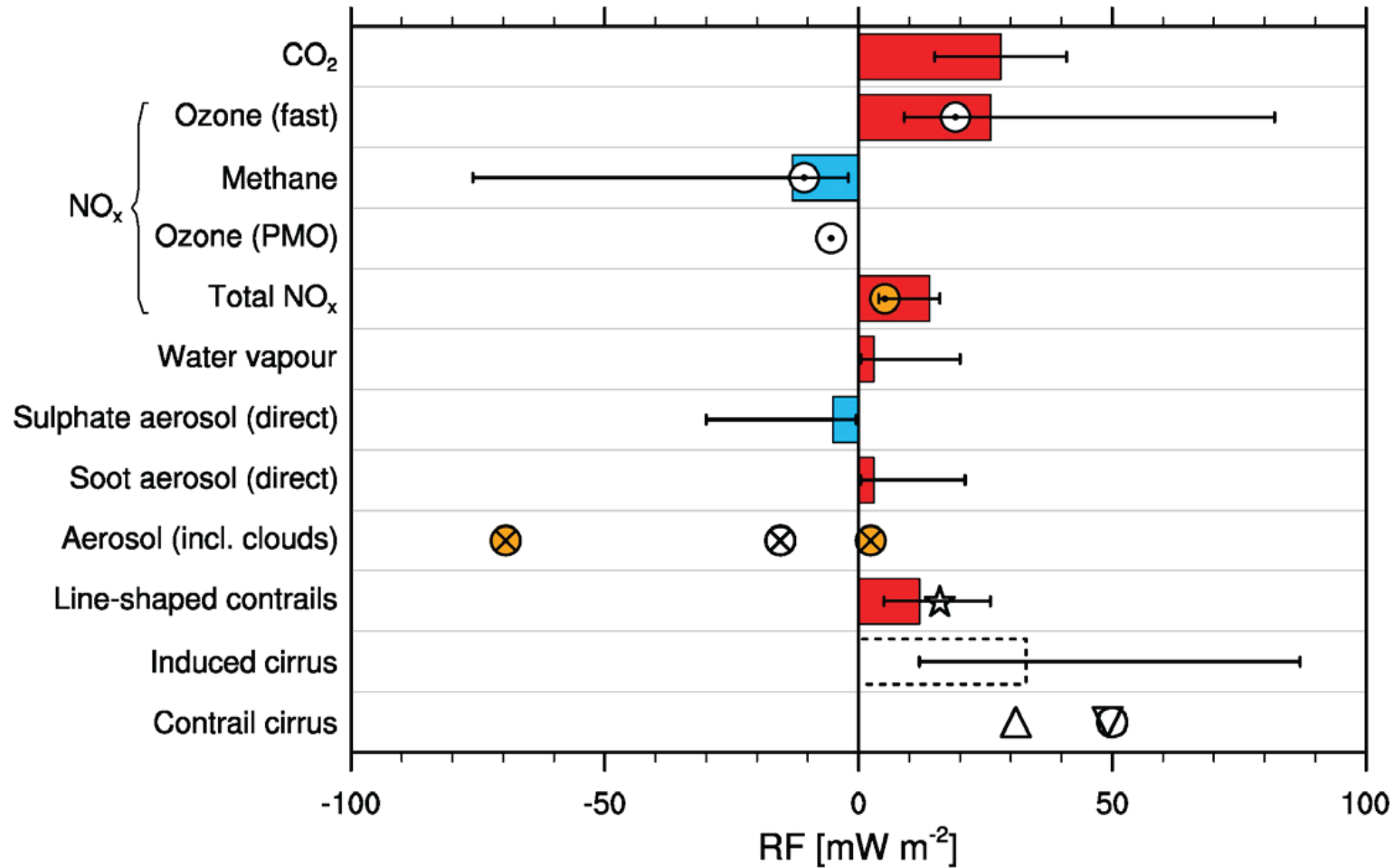
Aviation Radiative Forcing Components in 2005



Luftfahrt- Anteil:
0.04-0.14 W/m²
or 4 – 9 % of
total (1.6 W m⁻²)

Lee, Fahey, Forster, Newton, Wit, Lim, Owen, Sausen (2009)

Neue Ergebnisse zum Strahlungsantrieb aus Luftfahrt

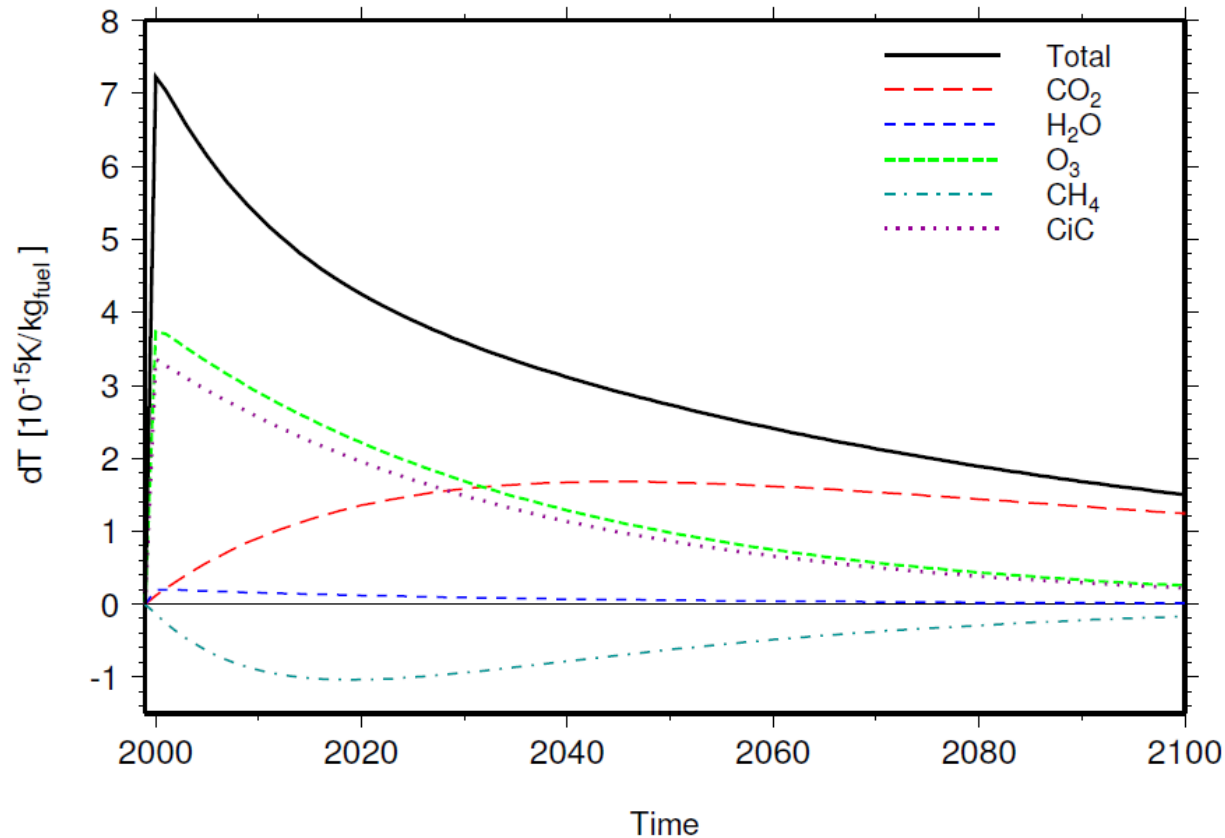


- ⊙ Sovde et al. (2014): EMAC, multi-model mean
- ⊗ Righi et al. (2013): reference case, parameter span
- ☆ Voigt et al. (2011)

- △ Burkhardt and Kärcher (2011)
- Schumann and Graf (2013)
- ▽ Bock (2014)

Rapp, Sausen et al., DLR-IPA (2015)

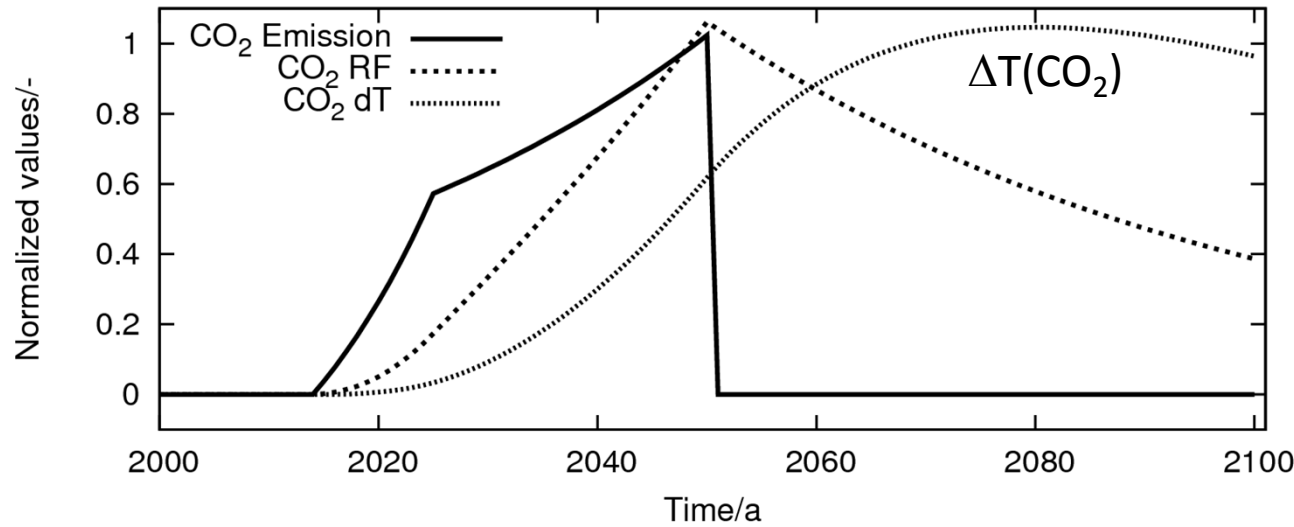
Temperaturänderung je kg Treibstoff für ein einziges Jahr: Langlebige und Kurzlebige Emissionen



lineares Response-
Modells AirClim
(Grewe et al. 2007)

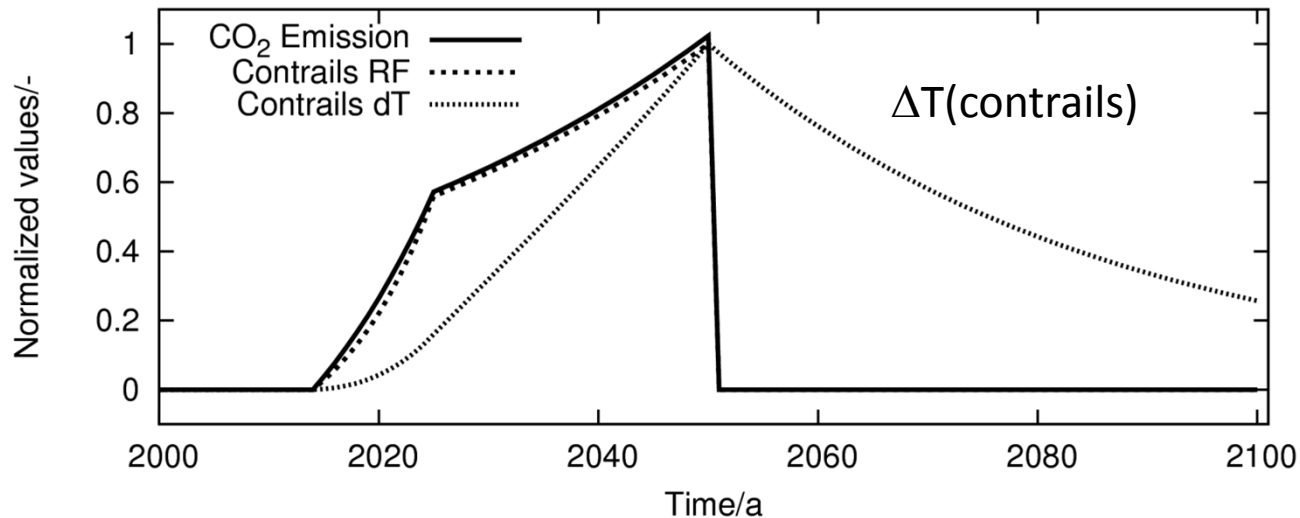
Dahlmann et al. (2016)

Klima-Response auf Emissionsszenario für CO₂ und (Contrails)



normiert!
Klimawirkung eines
Flugzeugtyps über seine
Lebensdauer (2010 bis
2050)

Emission (vorgegeben)
RF (folgt Konzentration)
dT (Ozeanträgheit!)

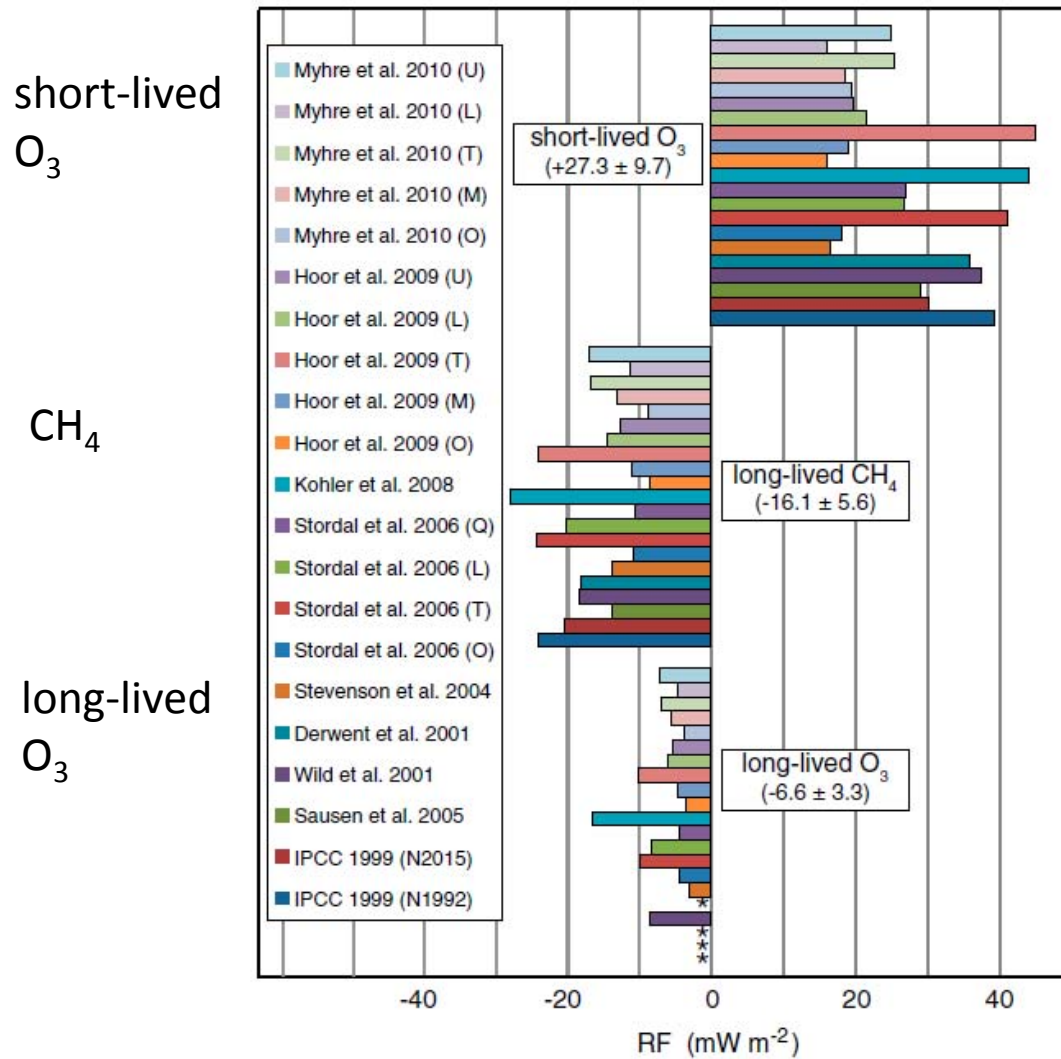


Response auf Contrails:

- schneller wachsend
- stärker wachsend
- schneller abklingend als CO₂.

(Grewe and Stenke, 2008)

RF aus 1 Tg/a NOx Luftfahrt-NOx



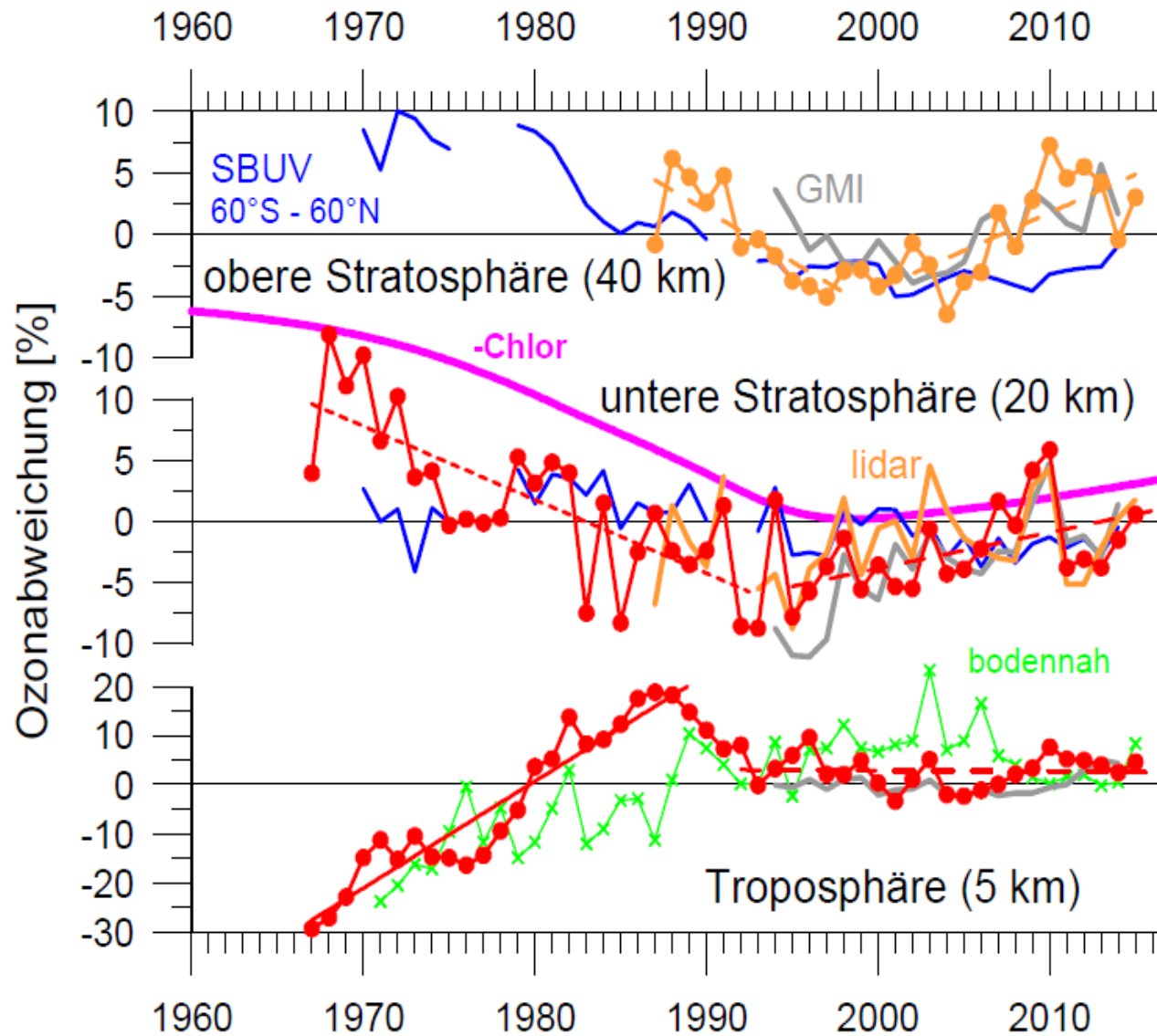
Fehler für O_3 and CH_4 korreliert

abhängig von Hintergrundkonzentrationen (NO_x , CO , H_2O , O_3 , HCs).

Netto
 >0 bei wachsenden Emissionen,
nahe 0 bei konstanten Emissionen.

(Holmes, Tang, and Prather, 2011)

Die Änderung der Ozonschicht: wo ist Beitrag der Luftfahrt?



Beitrag Luftverkehr
nur aus
Modellrechnungen
bekannt

Steinbrecht and Köhler (Ozonbulletin des DWD Nr. 133, 2. November 2016)

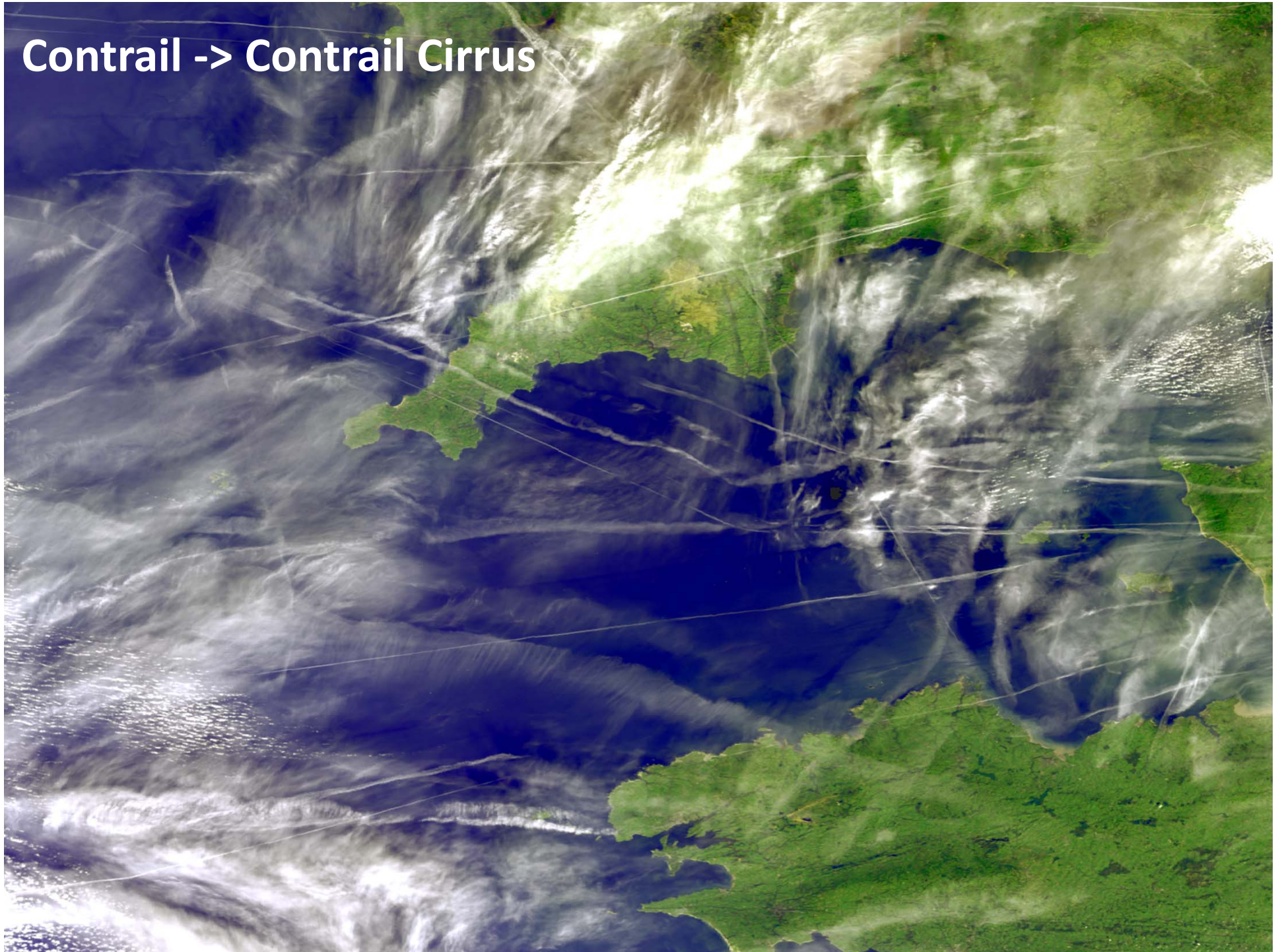


Unübersehbar: Der Luftverkehr verändert Bewölkung

Wenn es kalt genug ist, bilden sich Contrails, anfangs aus dem emittierten Wasserdampf und Partikeln (Ruß)

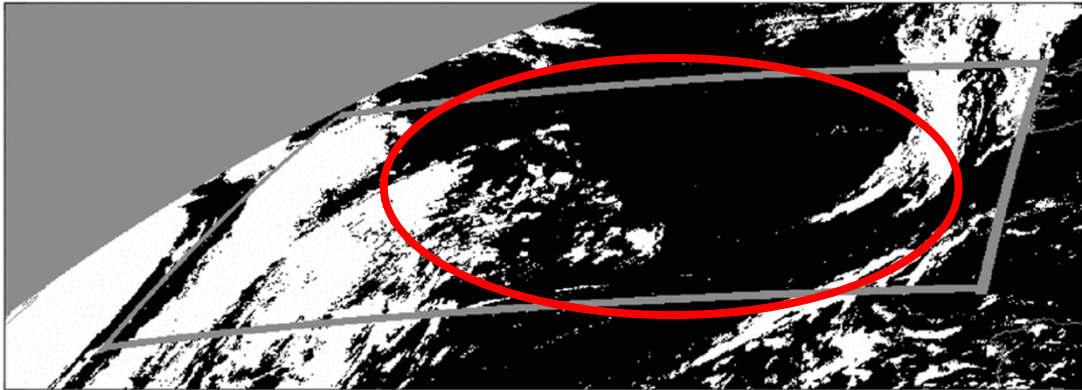


Contrail -> Contrail Cirrus

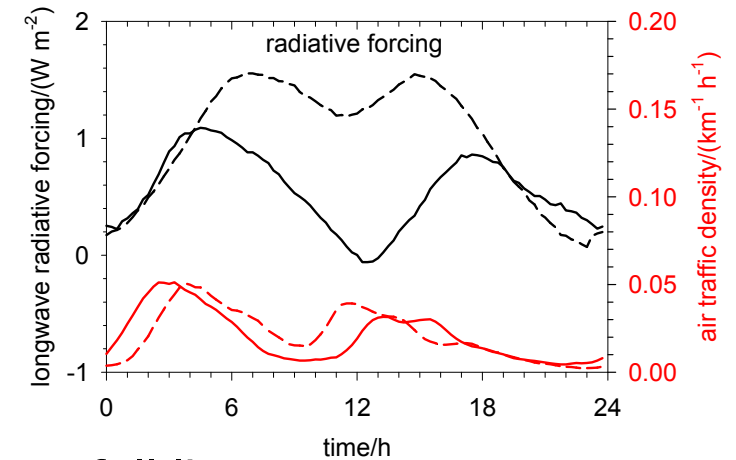
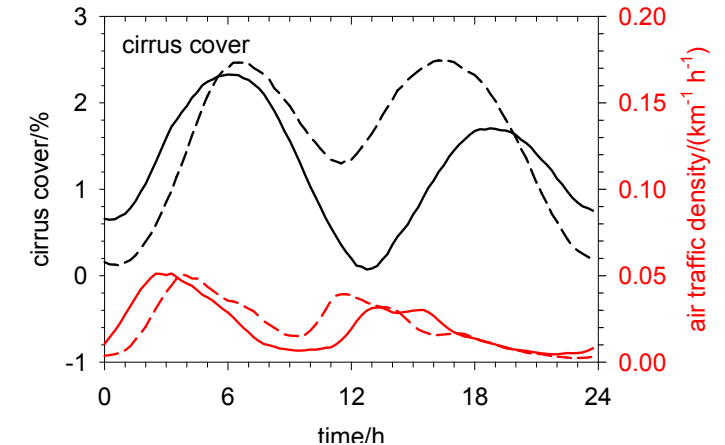
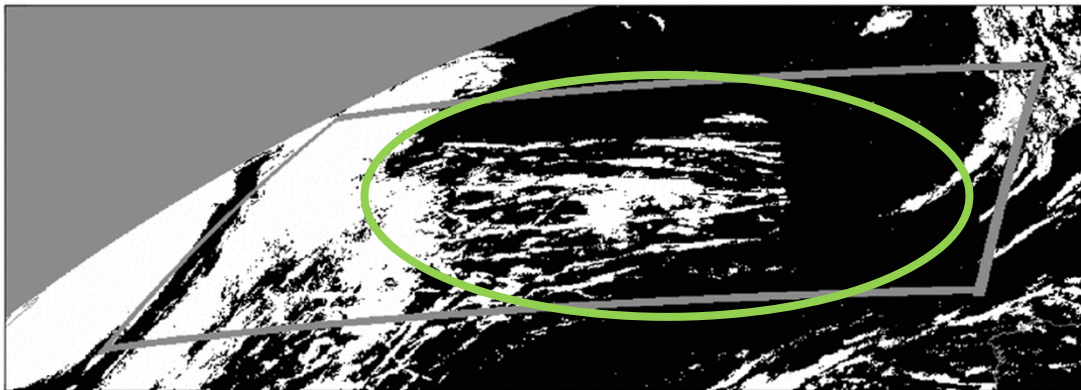


Meteosat Cirrus: Korrelation mit Nord-Atlantik-Verkehr

MeCiDA cirrus classification, 26.04.2004, 00:00 UTC



MeCiDA cirrus classification, 26.04.2004, 04:45 UTC



full lines: west part
dashed lines: east part

Graf et al. (GRL; 2012);
Schumann and Graf (JGR, 2013)

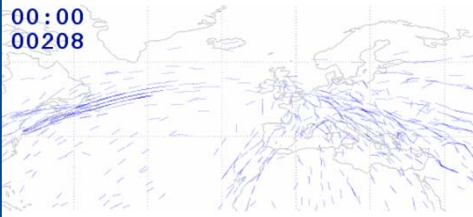
Contrail Cirrus Prediction Model (CoCiP)

Input:

Aircraft (BADA)



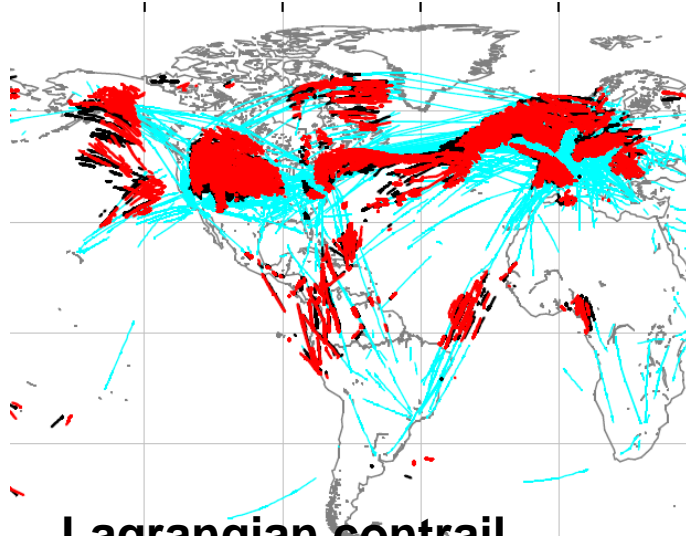
Traffic (e.g., ACCRI)



**Meteorology (e.g.:
CAM, ECMWF)**



**Contrail formation (SAC)
and contrail properties for
given T, RH_i, wind, mixing,
 m_F , PEI_{soot}**



**Lagrangian contrail
segments (mixing,
advection, sedimentation)
Here persistent contrail
positions**

Output:

**Contrail life cycle,
cover, τ , RF, EF, ...**

Cirrus

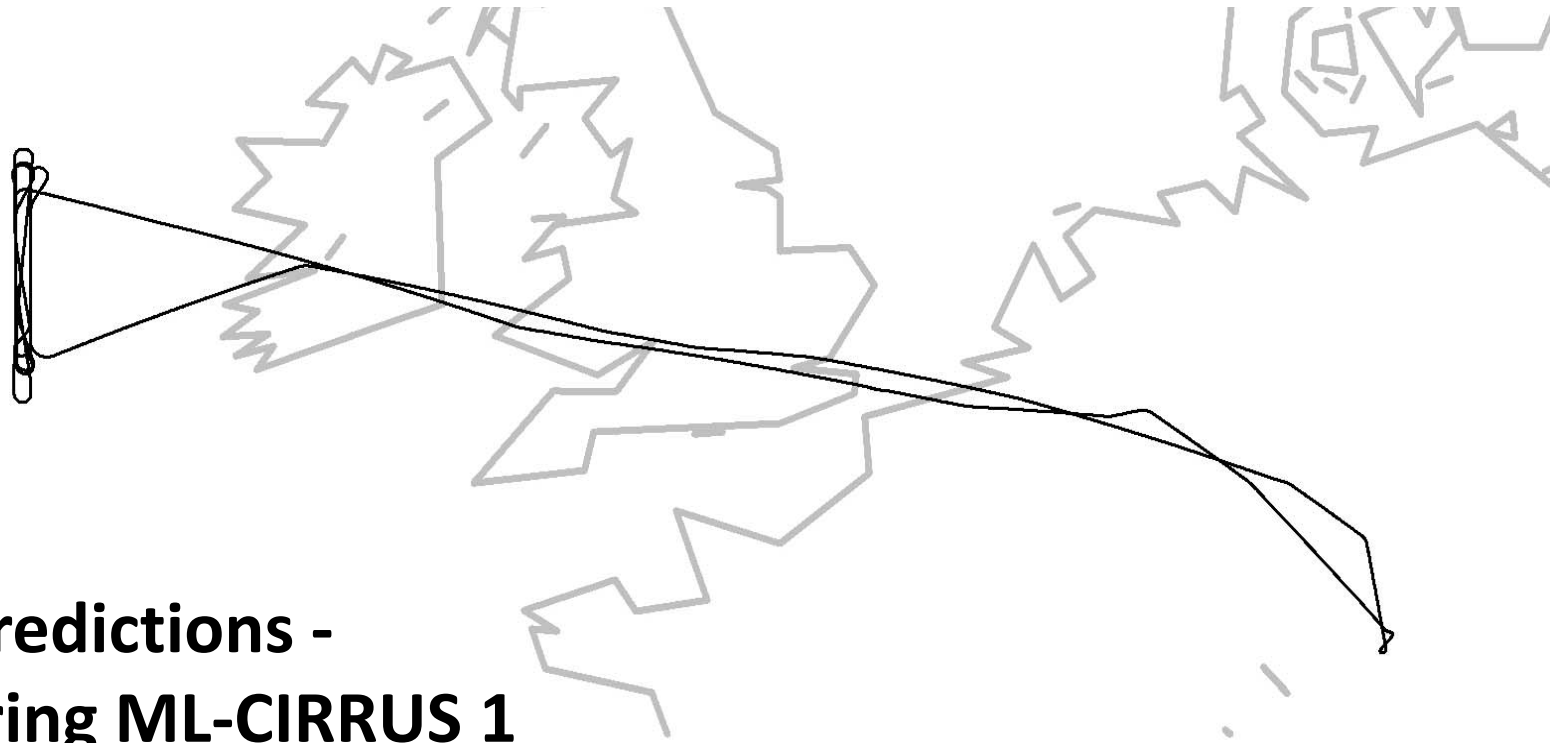
**Comparisons
(insitu, lidar,
satellites, models)**

Sensitivity studies

**Prediction &
Mitigation**

Global or Regional

(Schumann, 2012)



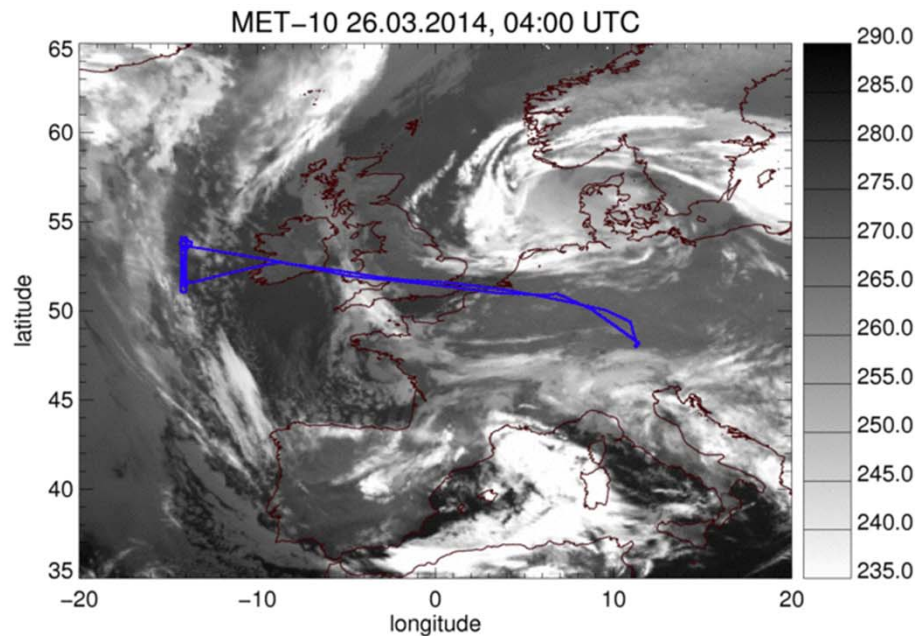
**Contrail predictions -
tested during ML-CIRRUS 1**

26 March 20

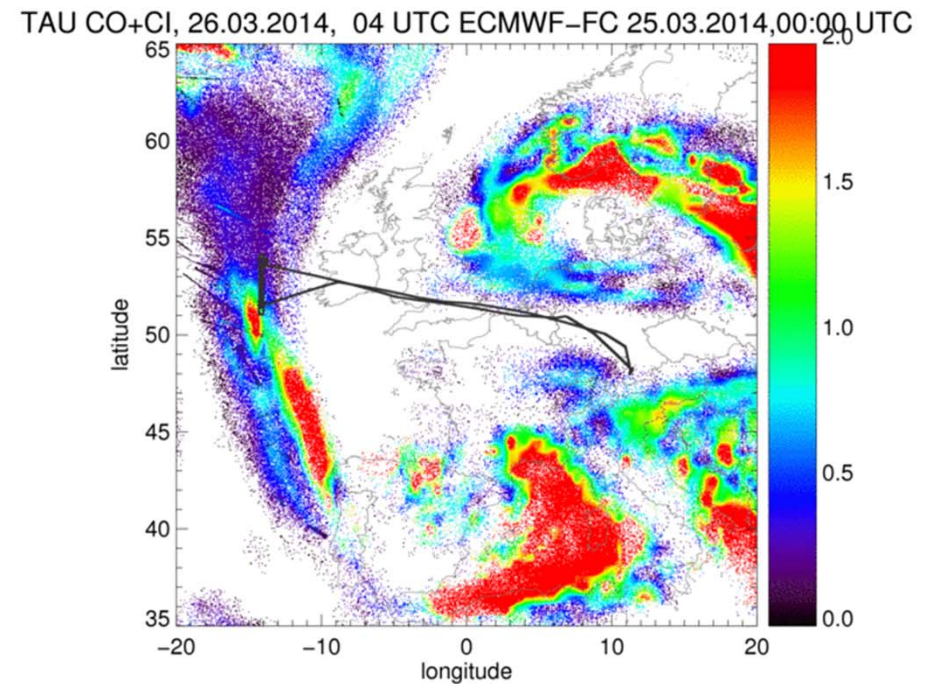


Contrail-Vorhersagen für ersten ML-CIRRUS Meßflug

26 March 2014: North Atlantic within Shannon Radar Control Zone



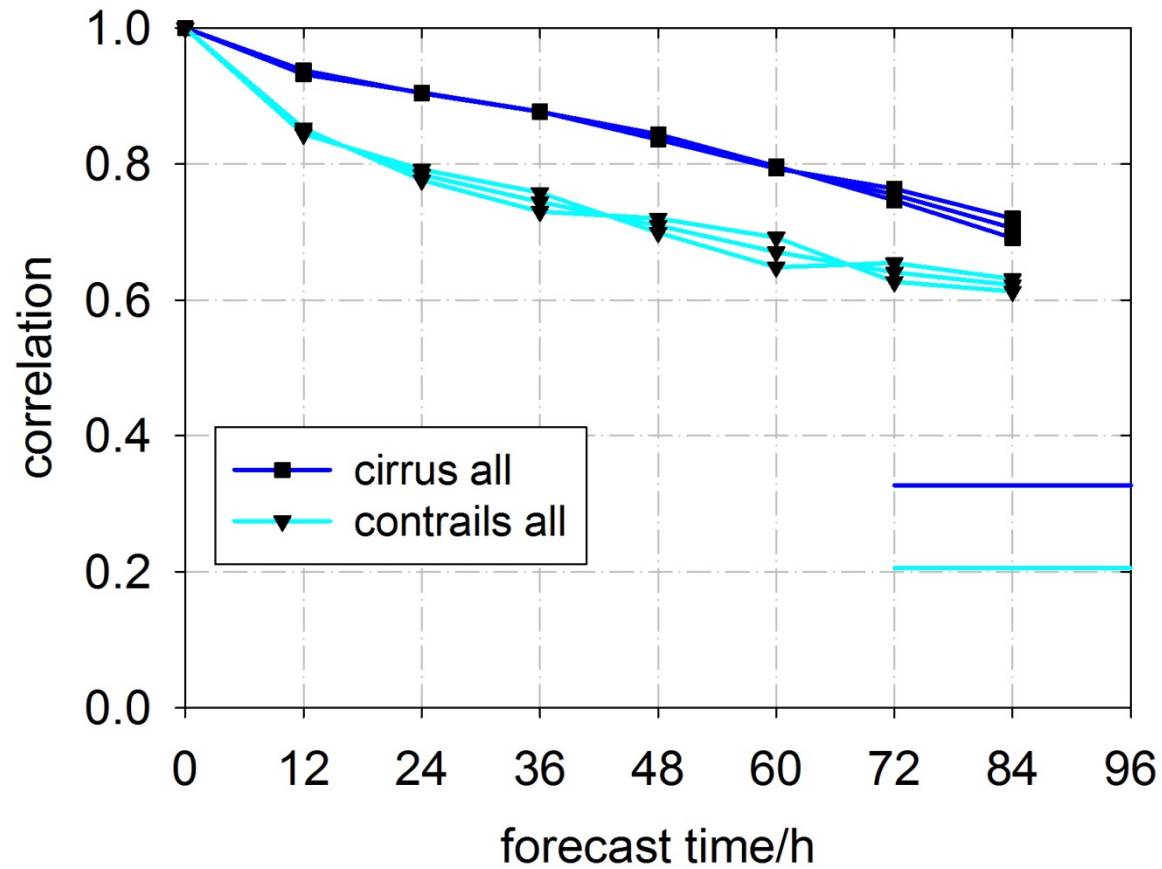
EUMETSAT
Meteosat SEVIRI IR
Brightness temperature at 10.8 μm
Blue: HALO flight path



CoCiP with ECMWF and ACCRI data:
optical depth of contrails+cirrus
Blue: HALO flight path

Voigt et al. (BAMS 2016)

Vorhersage-Autokorrelation



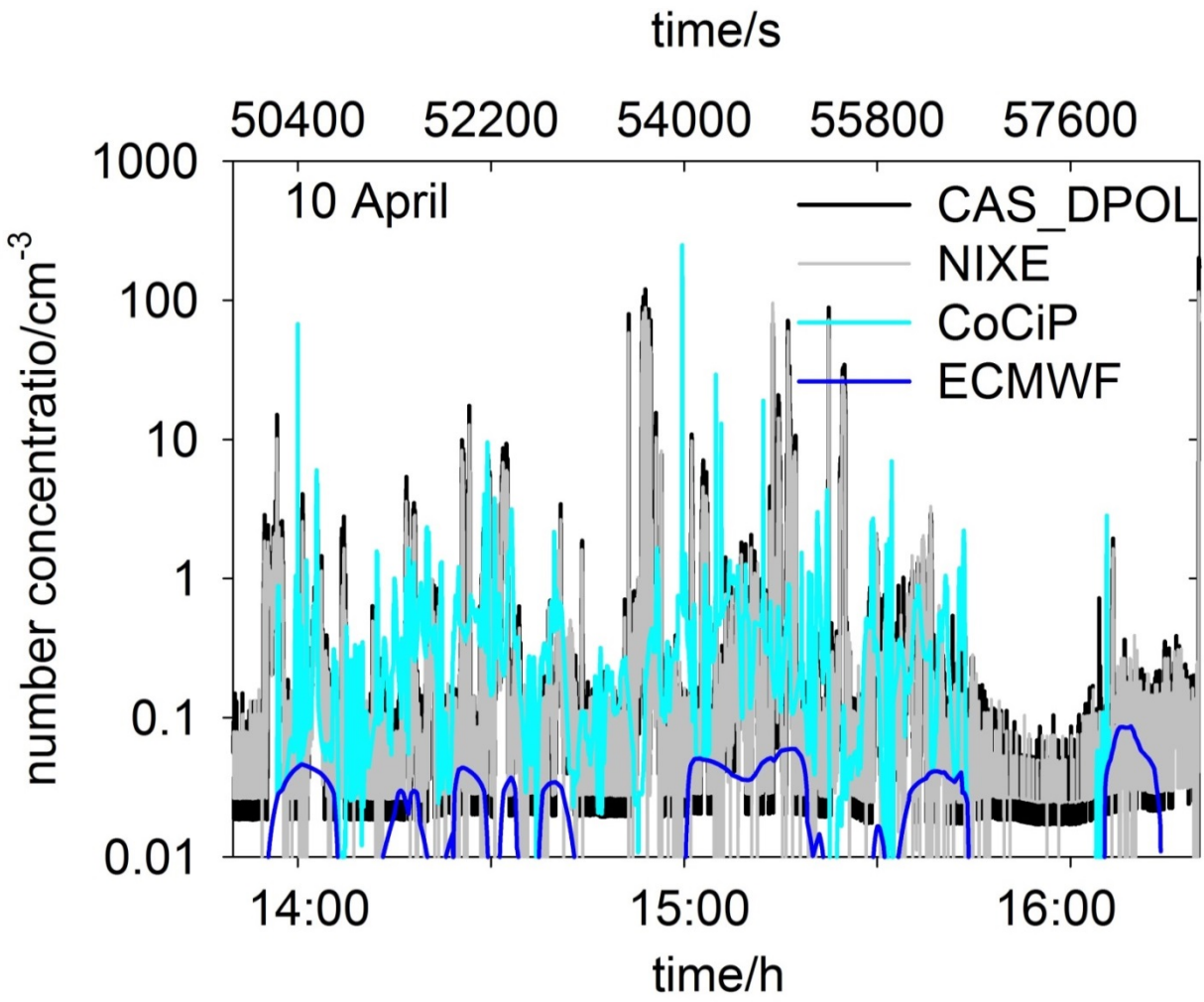
27 Tage,
gerade und
ungerade
Tage

70 % nach
72 h (3 Tagen)



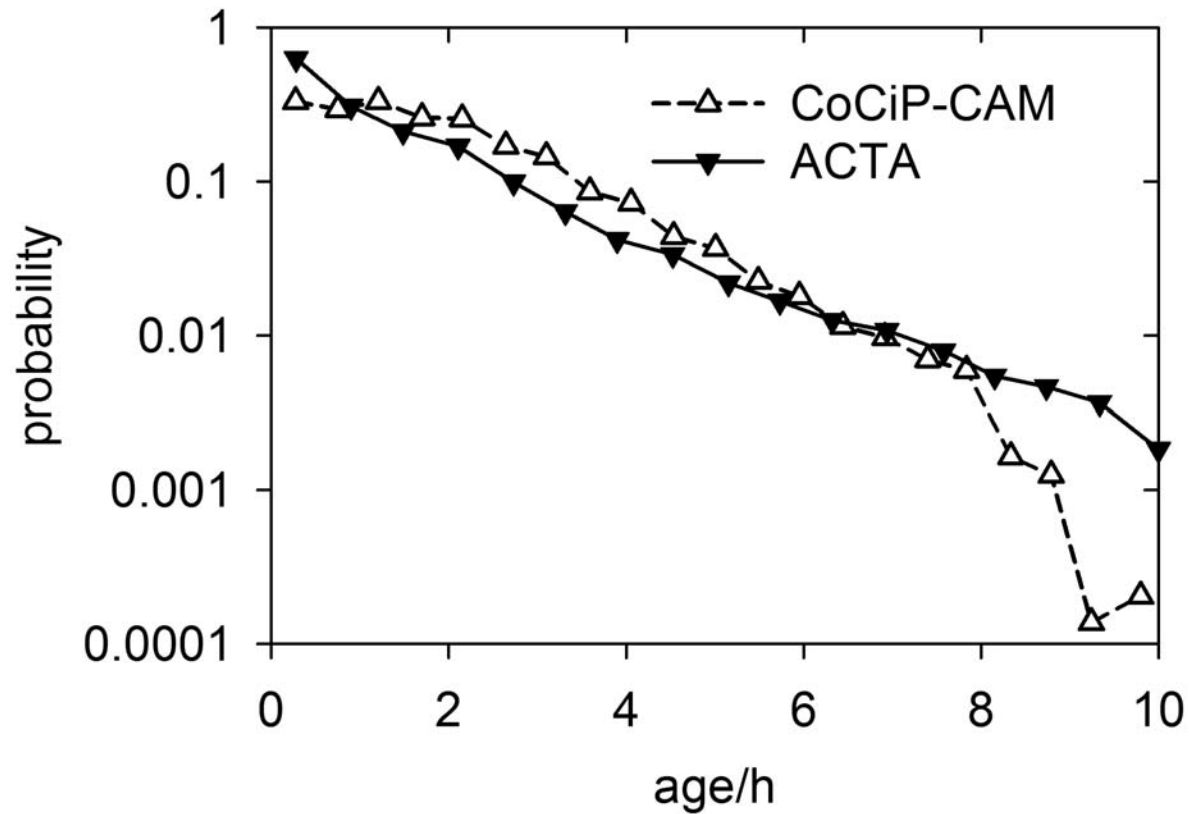
Langzeit-
Autokorrelation

Vergleich Messung- Rechnung bei ML-CIRRUS. Eispartikelkonzentration



preliminary data, Schumann, Voigt, Jurkat, Krämer et al.: ML-CIRRUS

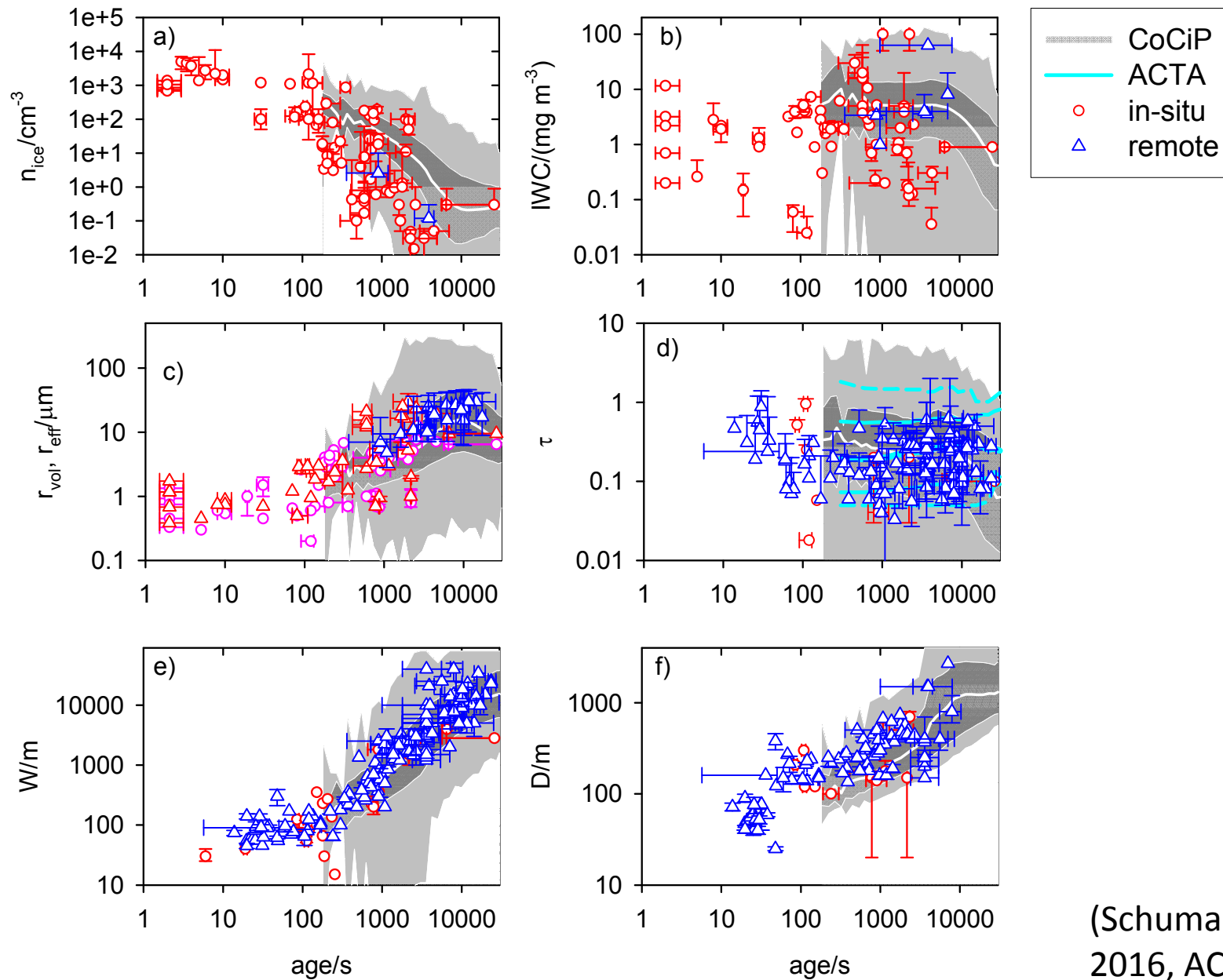
Vergleich der simulierten Lebensdauern mit Beobachtungen



Simulations with CoCiP-CAM for ACCRI traffic (Schumann , Penner et al., 2015)

Observations from Meteosat satellite observations (ACTA) (Vázquez-Navarro et al., 2015).

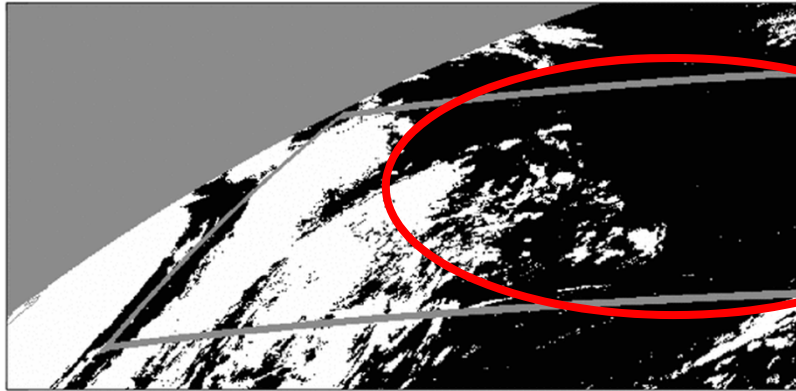
Vergleich CoCiP - 230 Messungen aus 34 Projekten für einzelne Contrails mit bekanntem Alter



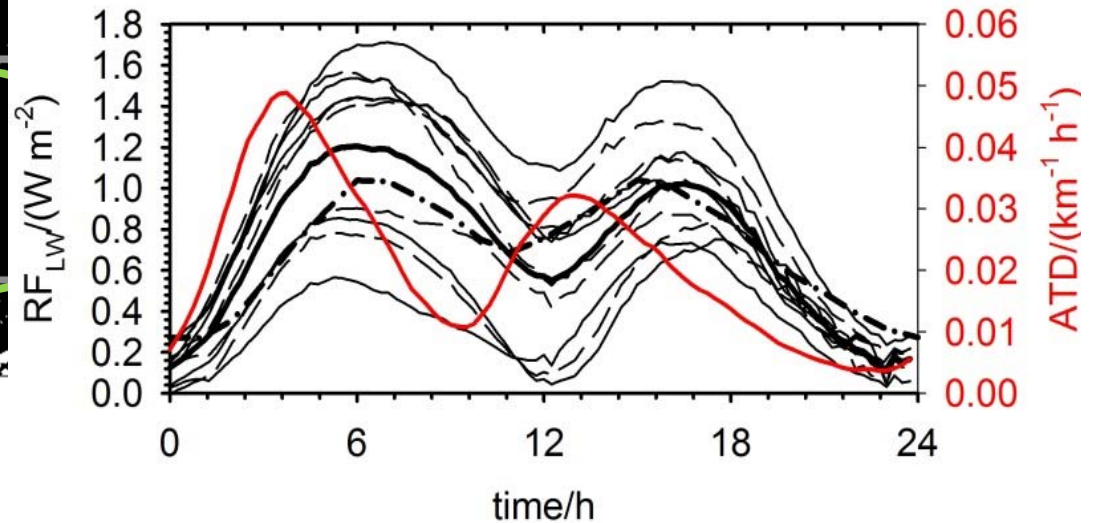
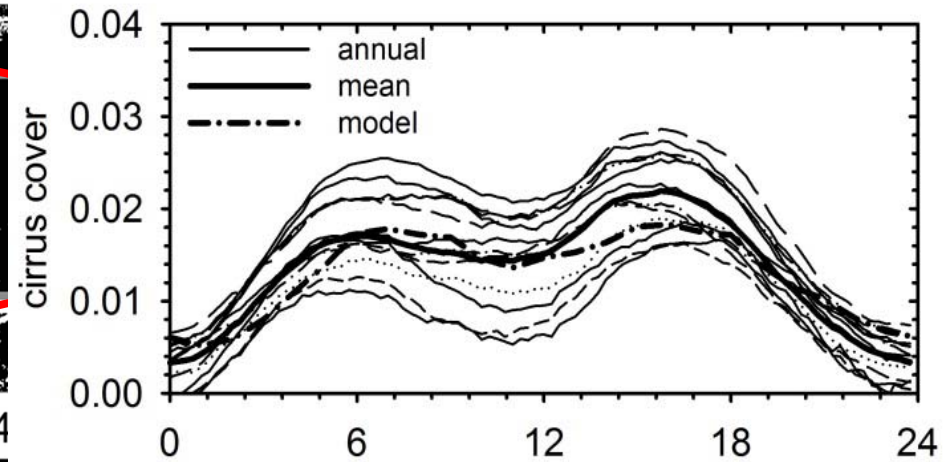
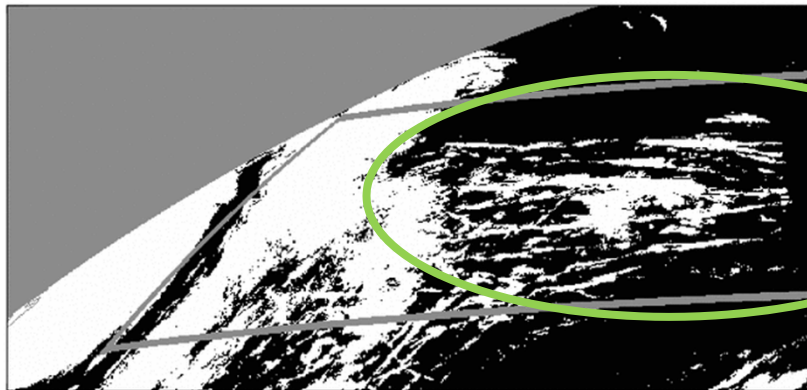
(Schumann et al., 2016, ACPD)

Aviation - Δ Cirrus-cover + RF aus 8 Jahren Meteosat + CoCiP

MeCiDA cirrus classification, 26.04.2000.

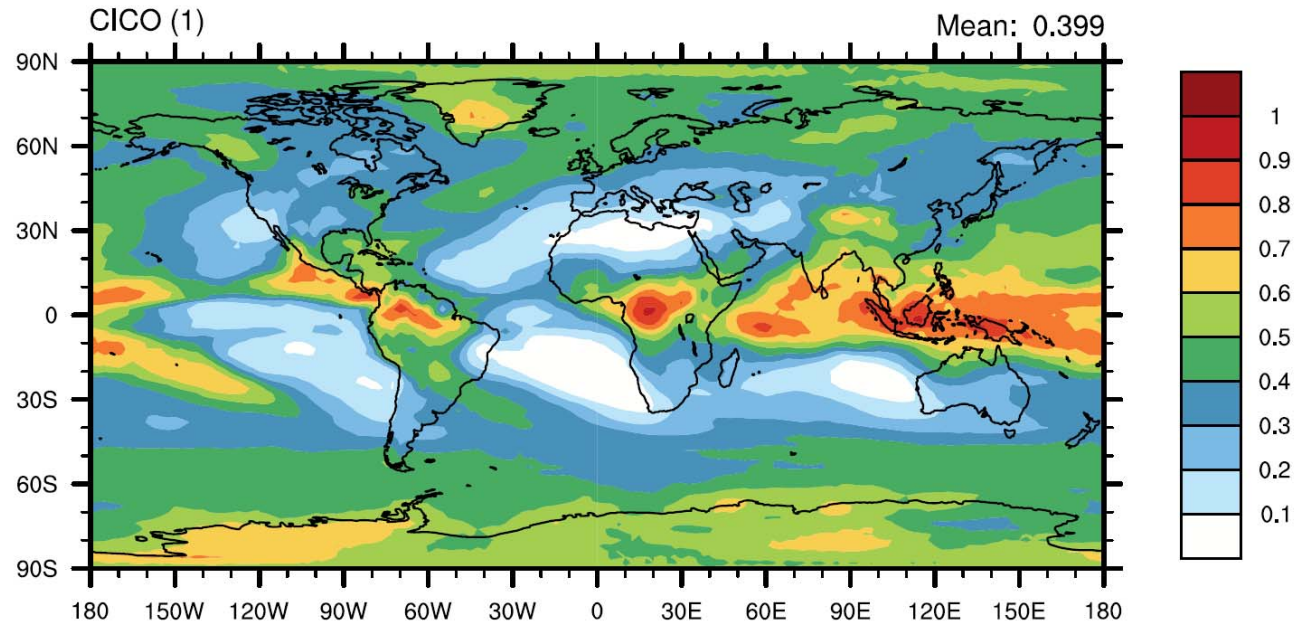


MeCiDA cirrus classification, 26.04.2004

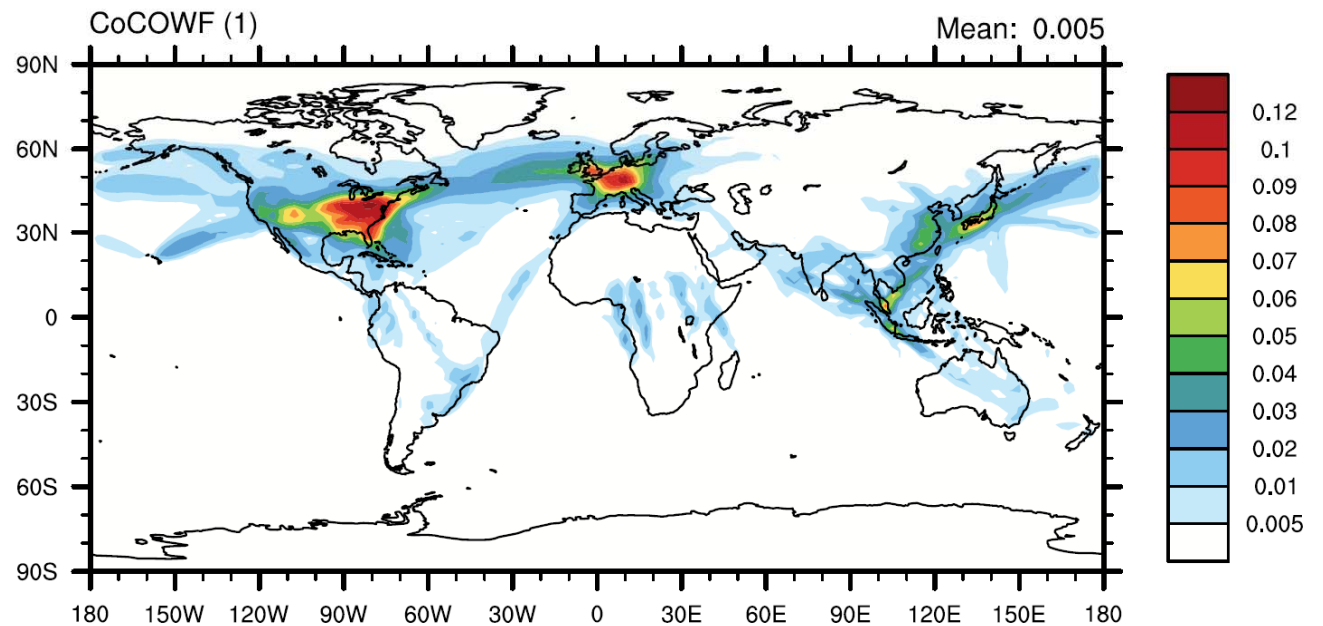


Graf et al. (2012); Schumann and Graf, (2013).

**CoCiP interaktiv
gekoppelt mit
CAM-
Klimamodell:
Cirrus**

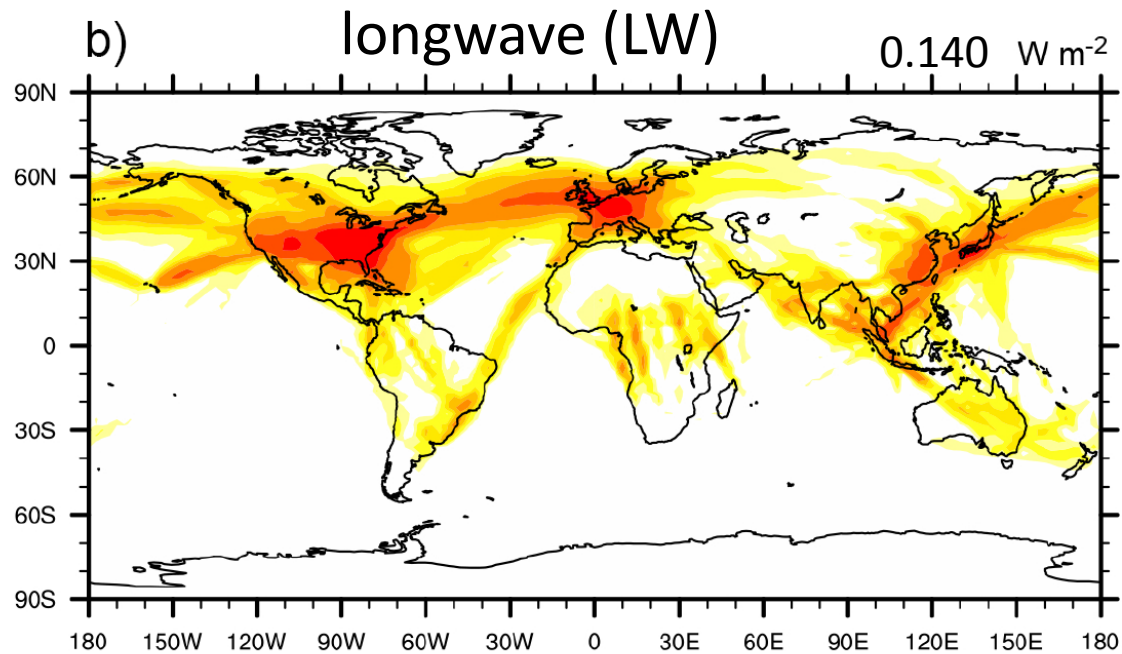
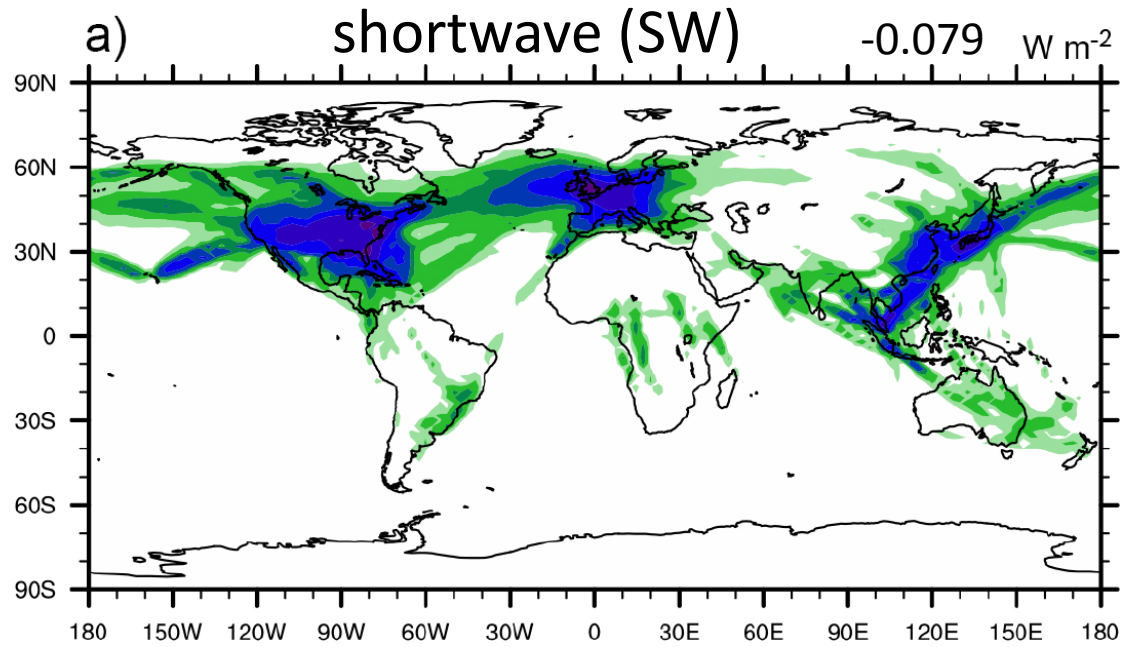


**und
Contrail-cirrus
Bedeckungsgrad**



Schumann, Penner, Chen,
Zhou, Graf (ACP, 2015)

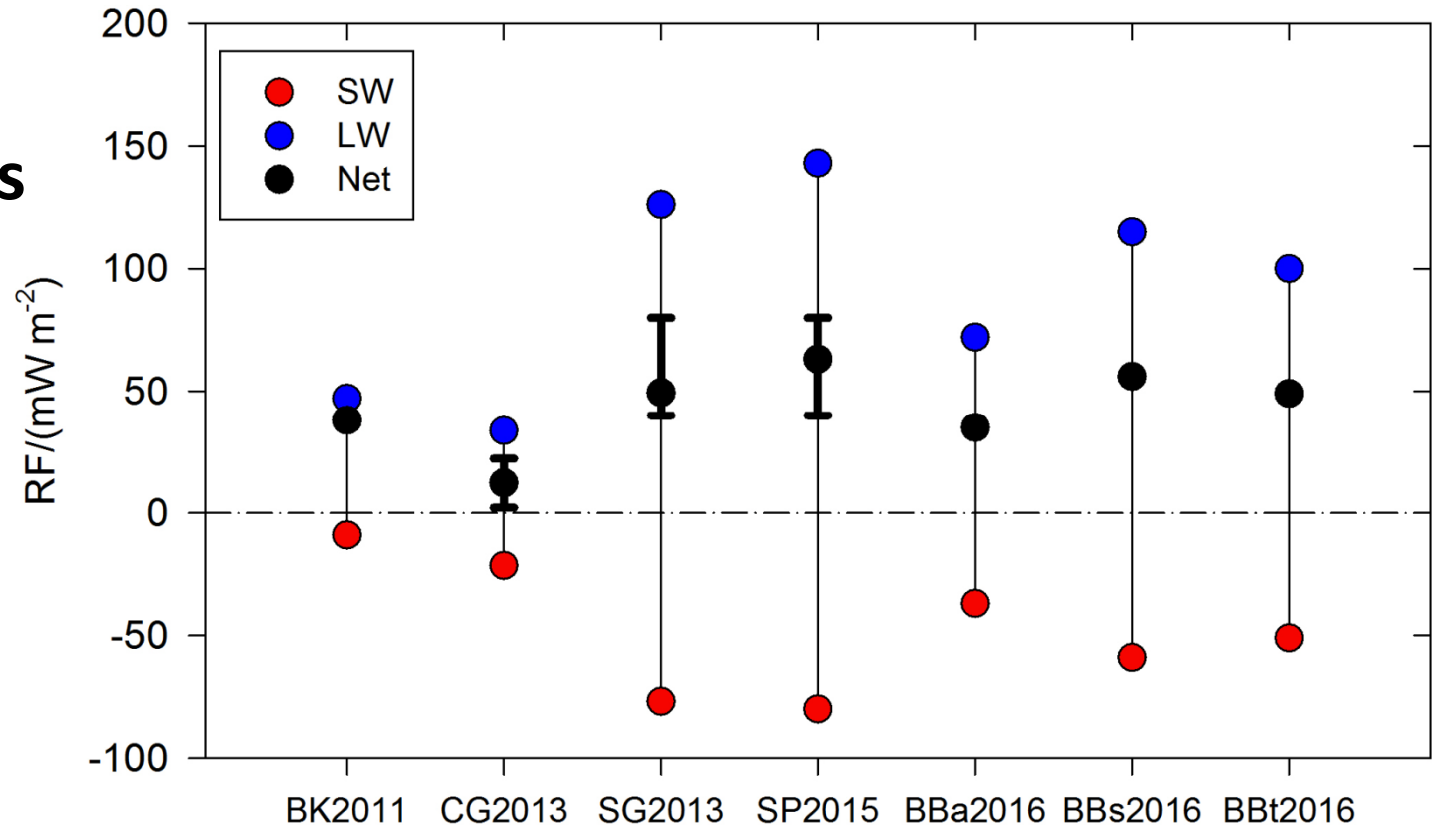
**Contrail-Cirrus
RF
aus
CoCiP+CAM**



Schumann, Penner, Chen,
Zhou, Graf (ACP, 2015)

Contrail cirrus RF from various studies:

net = LW + SW
net > 0



offen:
Contrail-
preaktivierte
Partikel.

Sulfate-Effekte

Reference	Model/Traffic	Symbol
Burkhardt and Kärcher (2011)	ECHAM4 CCmod / AERO2K 2002	BK2011
Chen and Gettelman (2013)	CAM5-SD / AEDT 2006	CG2013
Schumann and Graf (2013)	Meteosat+ECMWF+CoCiP / 2006	SG2013
Schumann, Penner et al. (2015)	CAM+CoCiP/ 2006	SP2015
Bock and Burkhardt (2016)	ECHAM5 CCmod / AERO2K 2002	BBa2016
Bock and Burkhardt (2016)	ECHAM5 CCmod /AEDT 2006 slant	BBs2016
Bock and Burkhardt (2016)	ECHAM5 CCmod /AEDT 2006 track	BBt2016

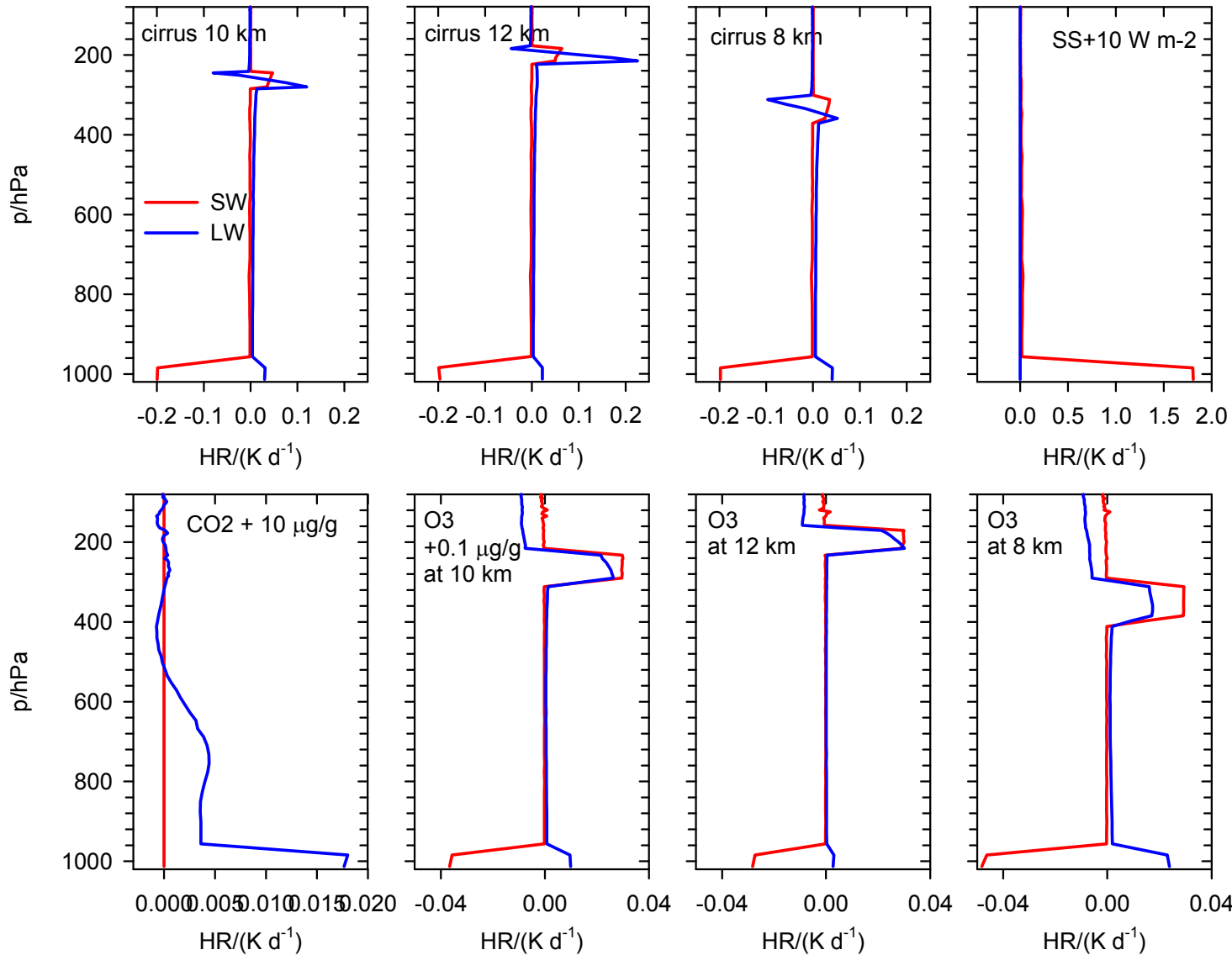
Welches Gleichgewichts - ΔT folgt für gegebenes RF? Die Wirksamkeit (“Efficacy”) von Luftverkehrs-Klimaeffekten

$$\Delta T_x(t \rightarrow \infty) = \lambda_x \text{RF}_x, \text{ “efficacy”} = \lambda_x / \lambda_{\text{CO}_2}$$

	Radiative Forcing [mW m ⁻²]	Efficacy
CO ₂	28.0	1.0
CH ₄	-12.5	1.04
O ₃	26.3	1.05
H ₂ O	2.8	0.7
lin. contrails	11.8	0.6

nach Ponater et al. (2012); IPA Statusreport 2015

Verschiedene Störungen -> sehr verschiedene Profile der Erwärmungsraten HR, insbesondere am Boden



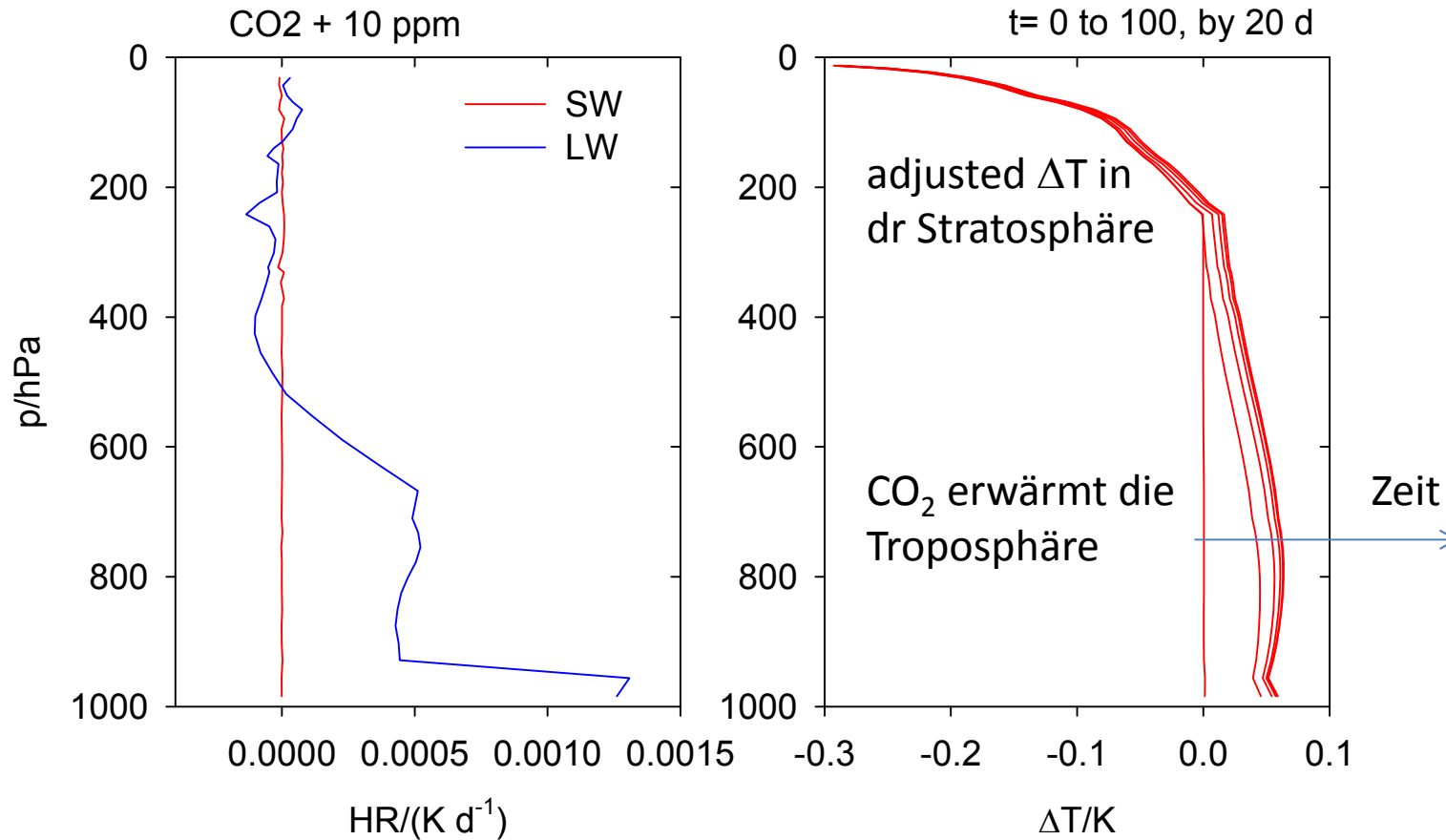
HR= Erwärmungsrate aus Differenz der vertikalen netto Flußdivergenz mit und ohne Störungen.

Strahlungs-transfermodell von Fu & Liou (1995)

Für Sommer-Standard-atmosphäre

Boden:
Albedo 0.2.
Adiabat
Bodenerwärmung verteilt über untere 500 m.

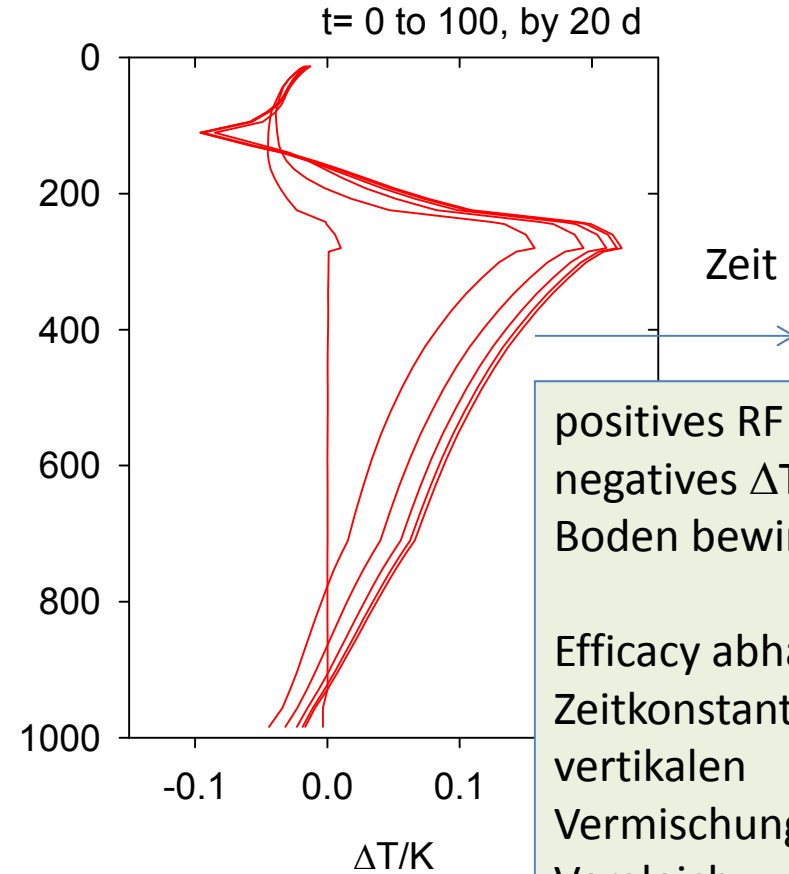
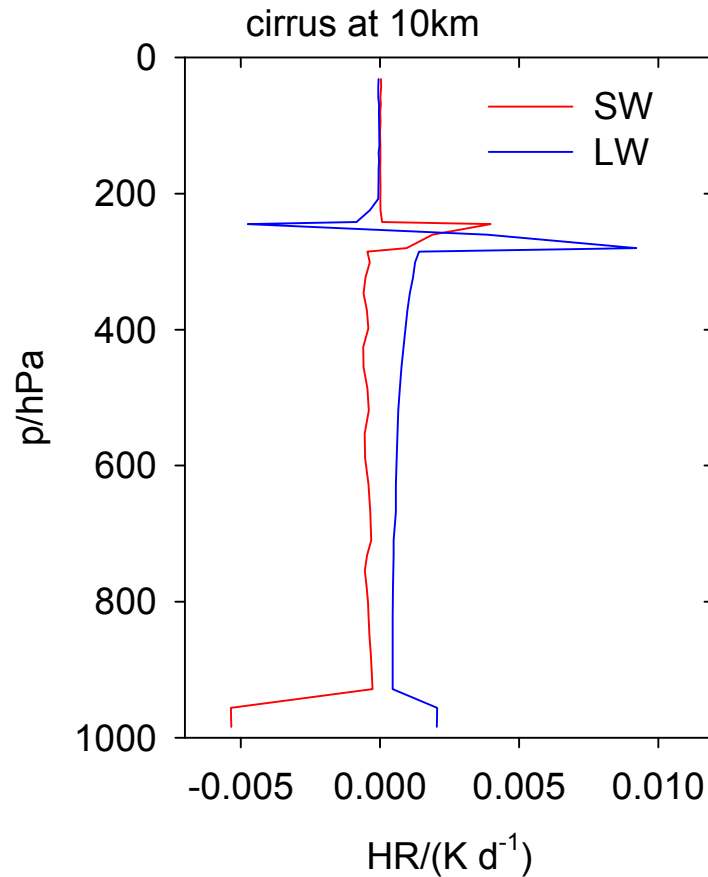
$$\Delta T_{\text{CO}_2}(t \rightarrow \infty) = \lambda_{\text{CO}_2} \text{RF}_{\text{CO}_2}, \quad \lambda_{\text{CO}_2} \cong 1 \pm 0.5 \text{ K}/(\text{W m}^{-2})$$



$$\text{RF}_{\text{instantan}} = 11 \text{ mW m}^{-2}, \quad \text{RF}_{\text{adjusted}} = 210 \text{ mW m}^{-2}, \quad \lambda = 0.28 \text{ K}/(\text{W m}^{-2})$$

wolkenfreie Sommeratmosphäre, Strahlungstransport nach Fu and Liou (1995), adiabte Erdoberfläche; konstante Atmosphäre (keine feedbacks), vertikale Vermischung in ca. 10 d

$$\Delta T_{\text{cirrus}}(t \rightarrow \infty) = \lambda_{\text{cirrus}} \text{RF}_{\text{cirrus}}? \quad \text{“efficacy”} = \lambda_{\text{cirrus}} / \lambda_{\text{CO}_2} \neq 1$$



positives RF kann negatives ΔT am Boden bewirken

Efficacy abhängig von Zeitkonstante der vertikalen Vermischung im Vergleich zur Zeitkonstanten des Strahlungstransportes

Sommeratmosphäre mit 1% Cirrusbedeckung, optische Dicke = 1, Oberfläche
 SZA = 75°, $\text{RF}_{\text{instantan}} = 93 \text{ mW m}^{-2}$, $\text{RF}_{\text{adjusted}} = 109 \text{ mW m}^{-2}$, $\lambda = -0.18 \text{ K/}$

Wie kann der Klimaeffekt vermindert werden?

- Weniger Emissionen (technisch)
- regenerierbare Treibstoffe (weniger fossiles CO₂) und weniger Ruß → weniger Contrail Cirrus
- **Tiefer (oder höher?) fliegen mit vorhandenem oder mit dafür optimiertem Fluggerät**
- Minimierung des Treibstoffverbrauchs durch wetteroptimierte Routen
- **Wetterabhängige Routen-Klimaoptimierung: weniger Flüge in Regionen mit positivem Klimaeffekt und mehr Flügen in Regionen mit negativem Klimaeffekt**



Article

Climate-Compatible Aircraft Impact Mitigation Potential of Future Aircraft

Katrin Dahlmann ^{1,*,\dagger}, Alexander Koch ^{2,\dagger}, Tom Otten ⁴, Doreen Seider ⁵, Volker Gollr

Redesigned aircraft with $Ma = 0.72$ instead of 0.8 and altitude 8000 m instead of 11300 m could provide 32 % temperature response reduction for 0 % operating cost increase

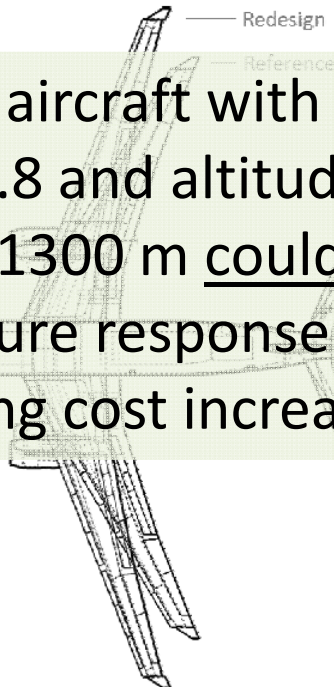


Figure 12. Geometrical dimensions of the reference and redesigned aircraft [48].

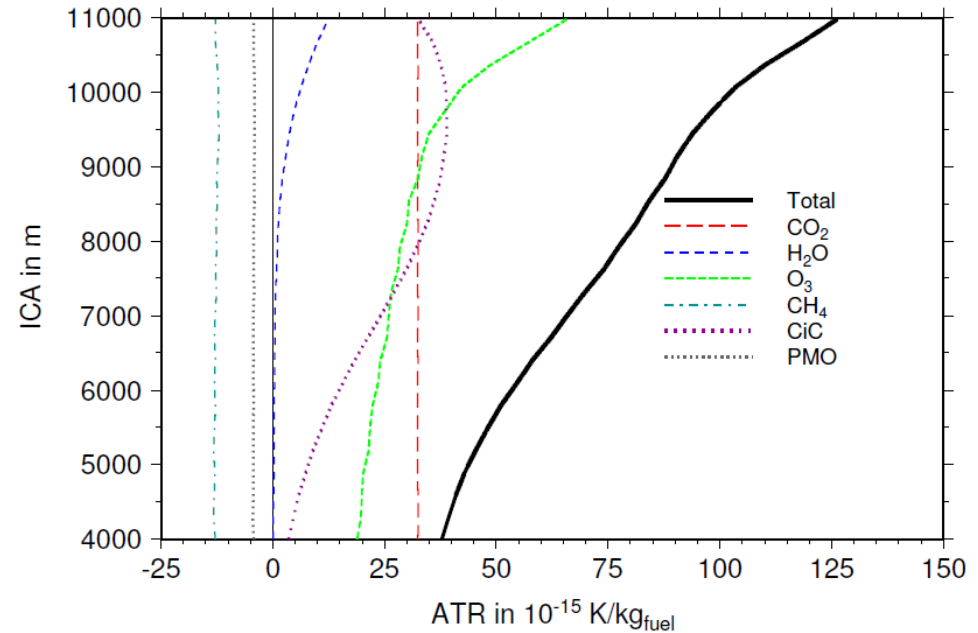


Figure 9. ATR per kg fuel in dependency of ICA for the route DTW-FRA.

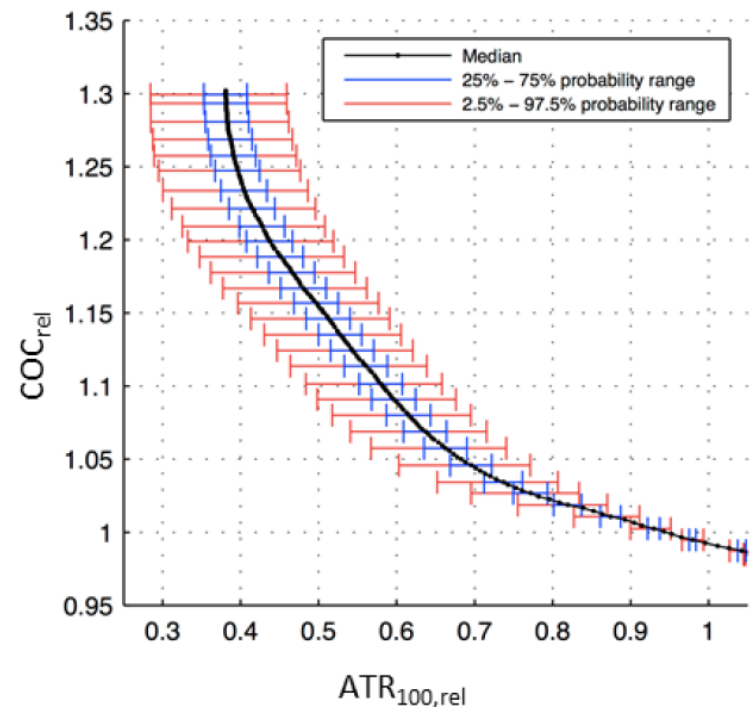
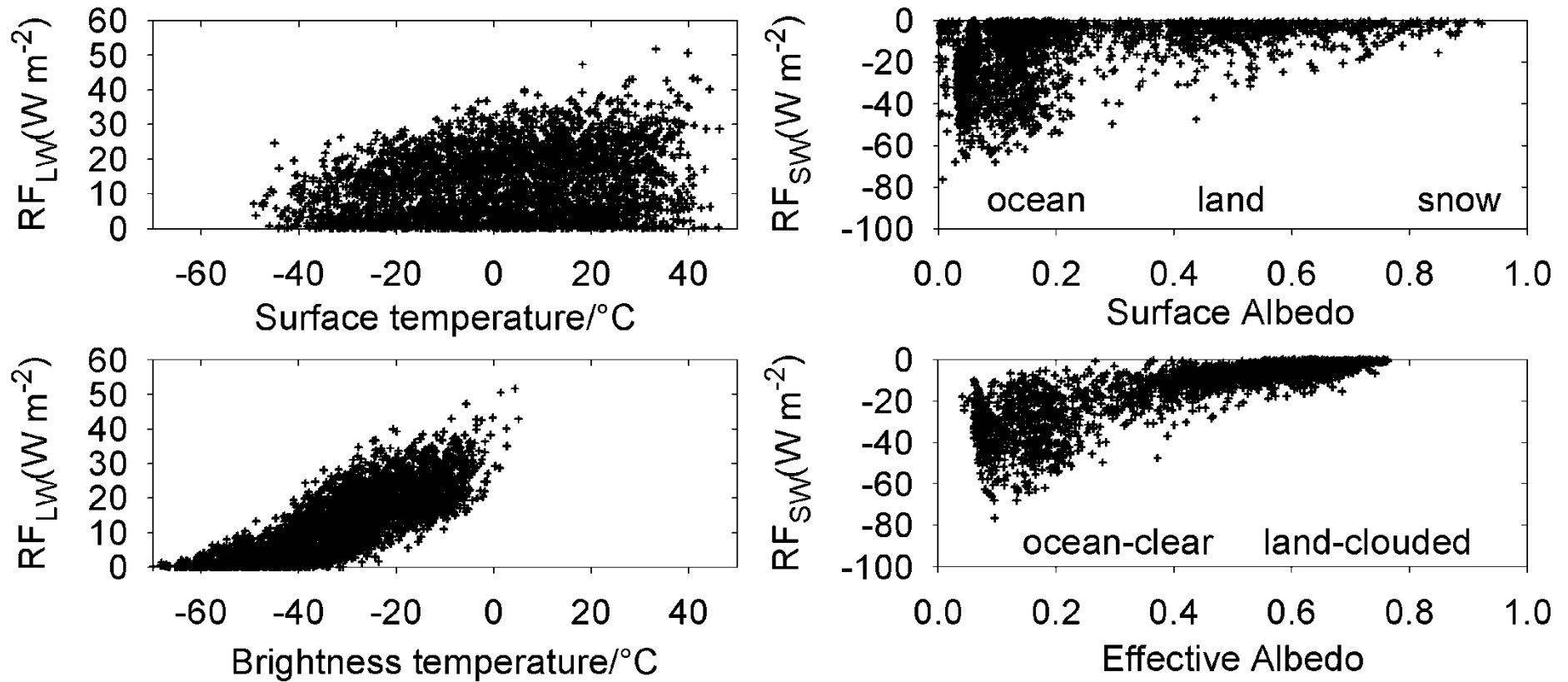
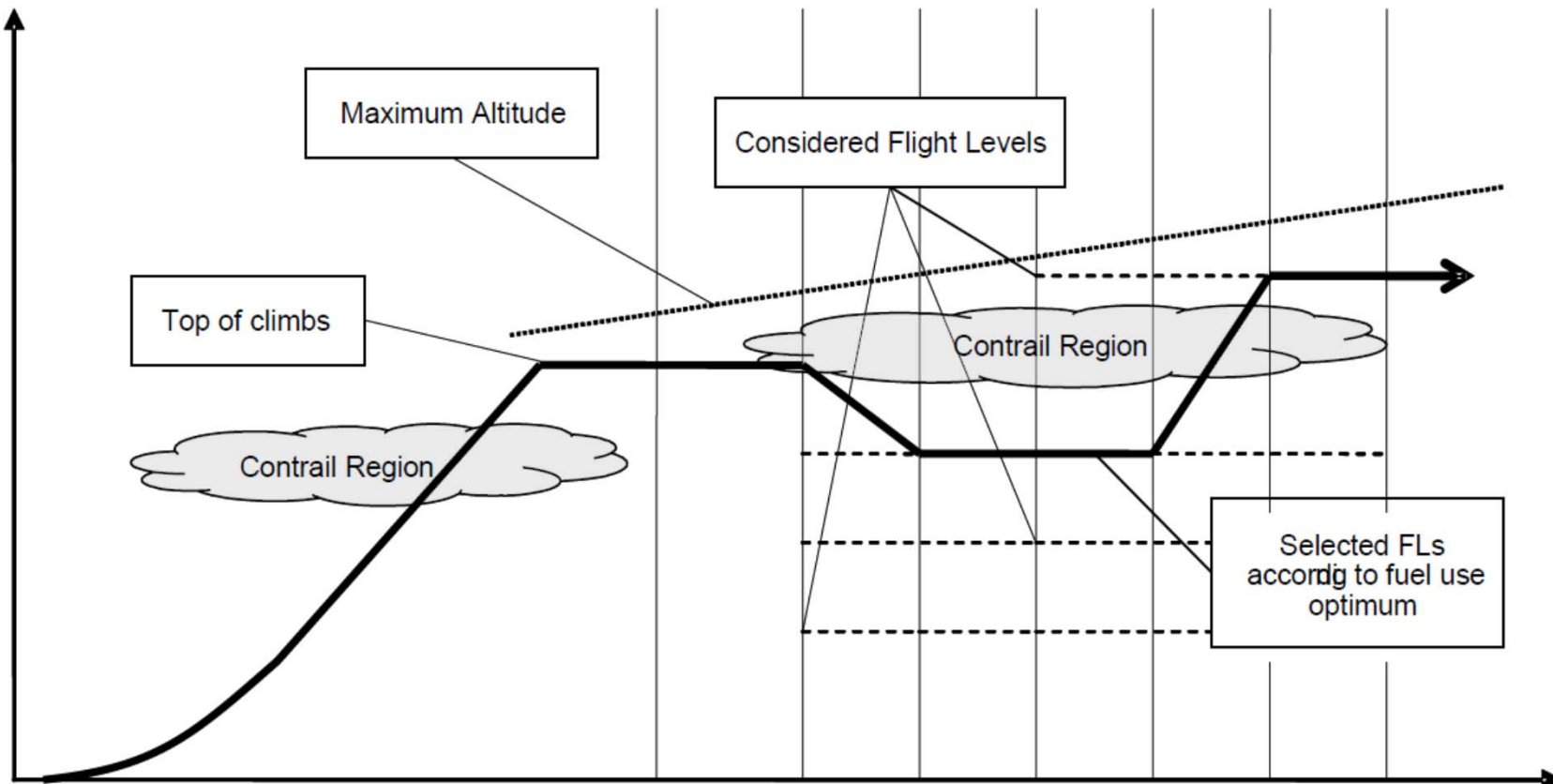


Figure 10. Relative COC vs relative ATR.

Contrail RF variiert stark mit Wetter, Route und Tageszeit -> großes Mitigation Potential

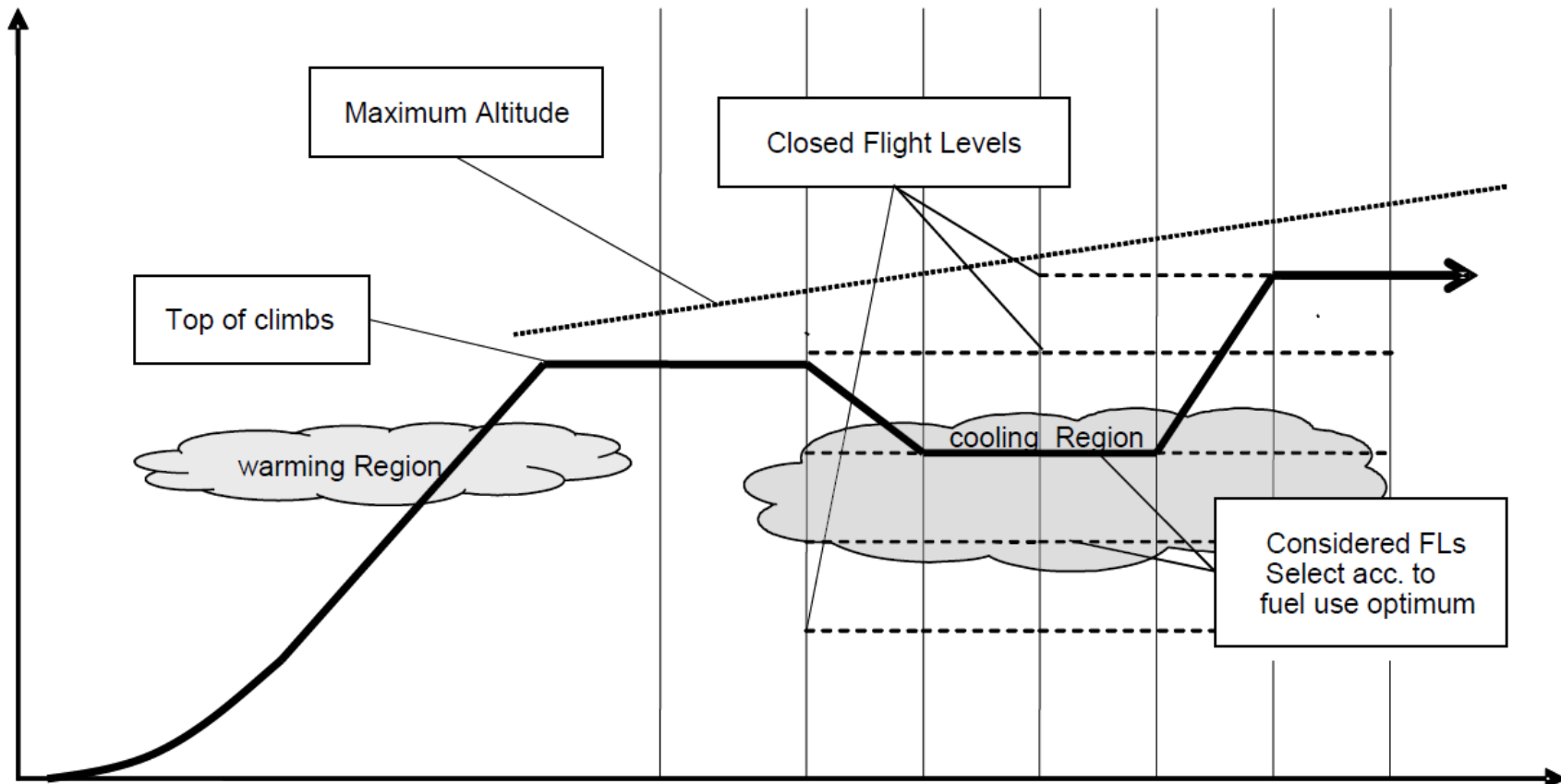


Route climate-optimisation: avoid contrails



Mannstein (unpubl., 2007); Schumann, Mannstein and Graf, (AIAA paper, 2011);
Matthes et al., (book, 2012)

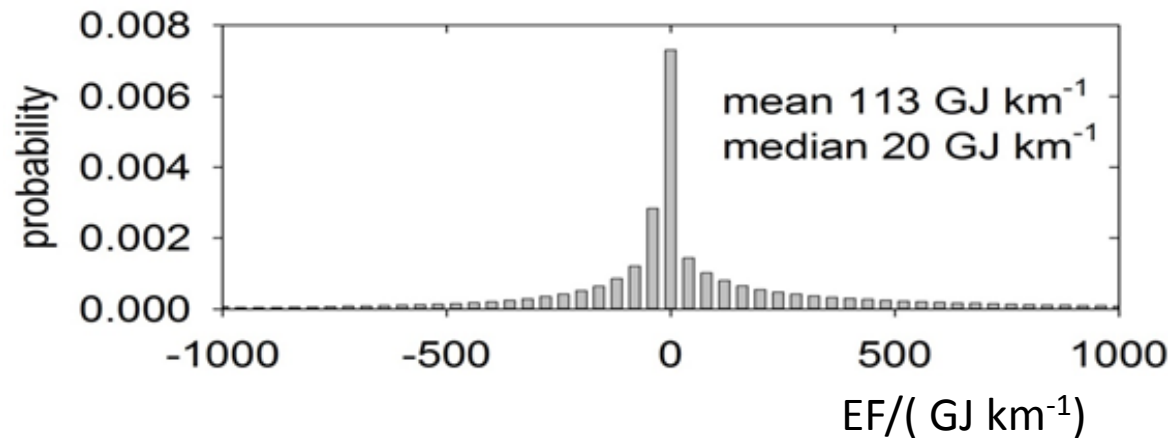
Better: avoid warming contrails but enforce cooling contrails



Metrik für Routen-Optimierung: Energy forcing (EF)

EF=RF*width*lifetime = energy input per flight distance

$$EF = \int_{\text{lifetime}} RF(t, s) \cdot W(t, s) dt$$



Data from Schumann, Penner et al., (ACP, 2015)

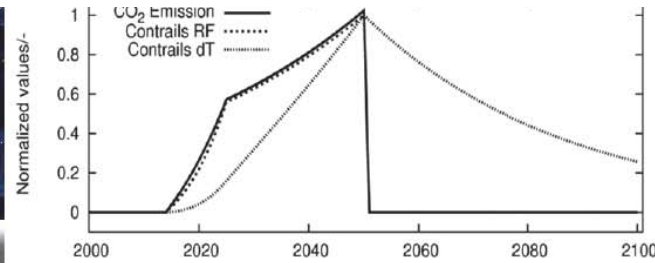
Es gibt Fälle mit EF>0 und EF<0

Ereignisse mit großem EF sind selten

->

Großes Potential für Klima-optimierte Routen

Voraussetzung:
Zuverlässige Vorhersage der Klimawirkung über die Lebensdauer der Antriebe



Zusammenfassung

- Luftverkehr nimmt zu und trägt über CO₂ langfristig zum Klimawandel bei.
- Inklusiv der kurzzeitigen Beiträge (insbesondere Contrails) erreicht der Luftfahrt-RF Anteil 4-8 % des anthropogenen Effekts und nimmt noch zu.
- Contrails wirken nachts wärmend, tags oft kühlend; sehr variabel.
- Je nach Efficacy (abhängig u.a. vom Ort des RF und Vermischungsrate), kann der kühlenden Effekt von Contrails den wärmenden überwiegen.
- Klimaschutz mit optimiertem Luftfahrtsystem/Verkehrsführung wird zunehmend dringlich, insbesondere bei wachsendem Verkehr und wenn die Klimaerwärmung rasch reduziert werden müssen (z.B. wegen 2-K-Ziel)
- Voraussetzung: verifizierbar gute Wettervorhersagen für Feuchte, Zirren und Vermischung, der Klimaeffekte und der Kosten
- Offen: Erprobung von Routenoptimierung mit Quantifizierung des Gewinns und Risikos bei unvollständigem Wissen