

# Fortbildungstag der DMG Sektion München, 22.11.2019 **Aerosol-Wolken-Wechselwirkungen**

**Matthias Tesche**

[matthias.tesche@uni-leipzig.de](mailto:matthias.tesche@uni-leipzig.de)

<http://research.uni-leipzig.de/aerocloud>

**Institute für Meteorologie | Fakultät für Physik und Geowissenschaften  
Universität Leipzig**



UNIVERSITÄT  
LEIPZIG

**MAKE OUR  
PLANET  
GREAT AGAIN**



GEFÖRDERT VOM

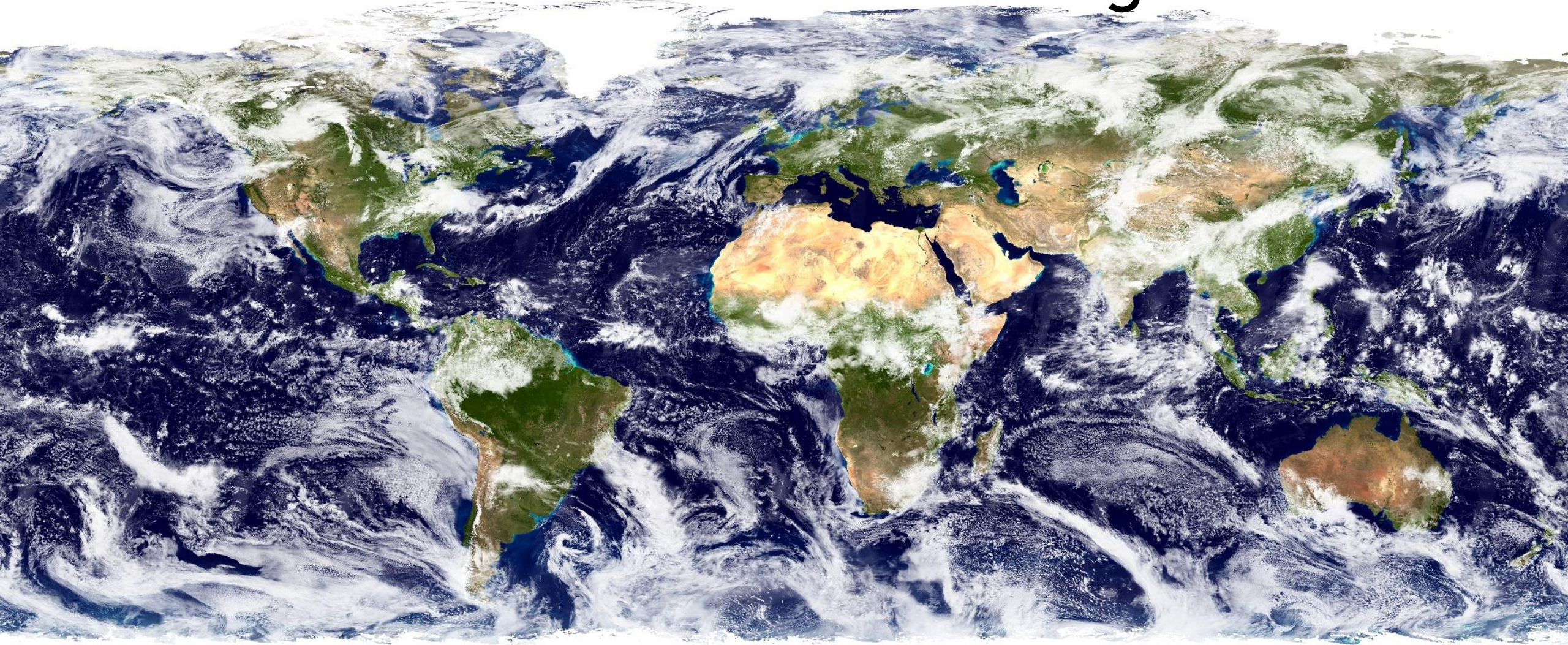
Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



# Inhalt

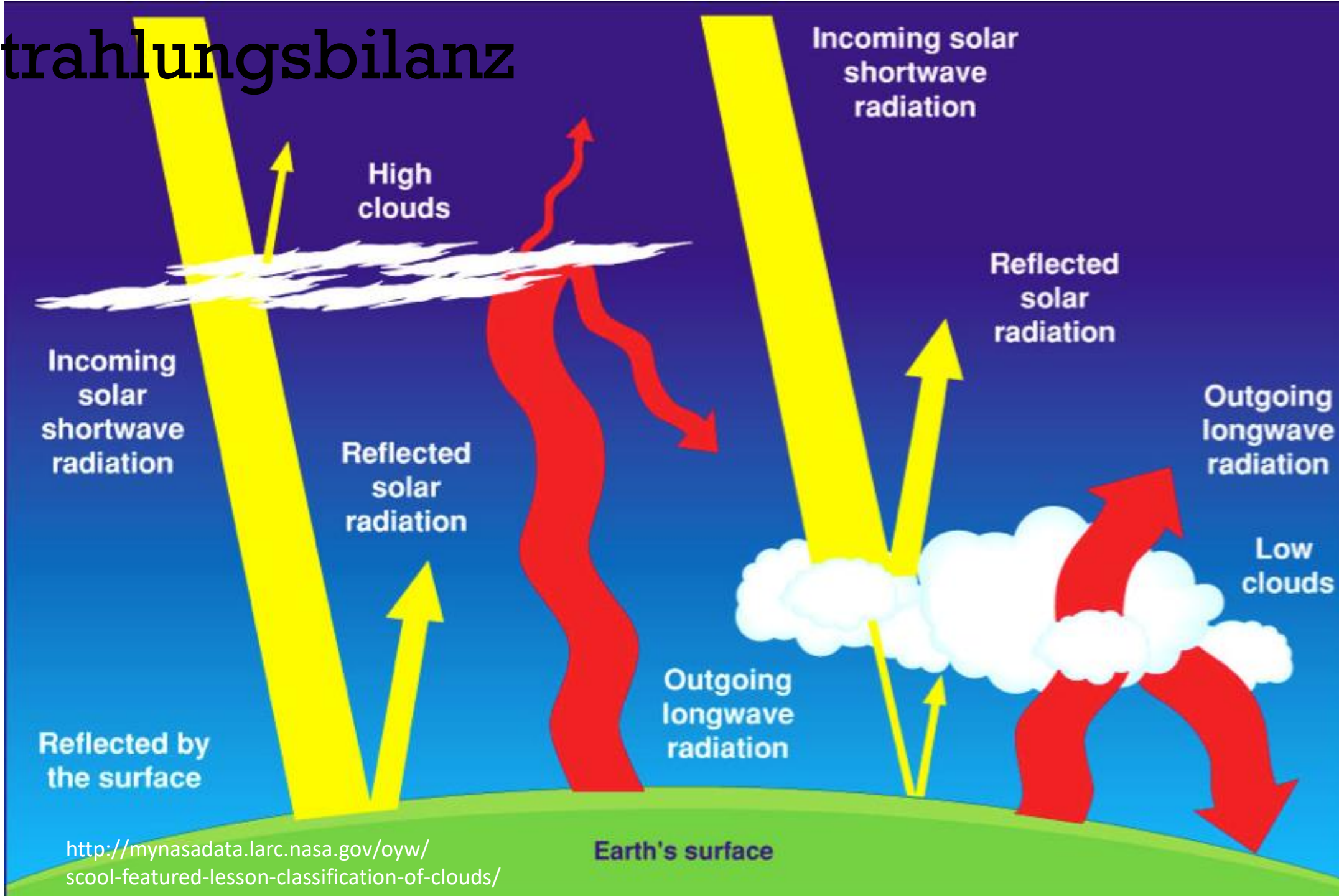
- **Motivation und Hintergrund**
  - Wolken
  - Einfluss auf die Strahlungsbilanz der Erde
  - Wolkenbildung
  - Klimateffekte und Strahlungsantrieb
- **Aerosol-Wolken-Wechselwirkungen**
  - in warmen Wolken
  - in eisenthaltenden Wolken
- **Zusammenfassung**

# Wolken und Wolkenbeobachtungen

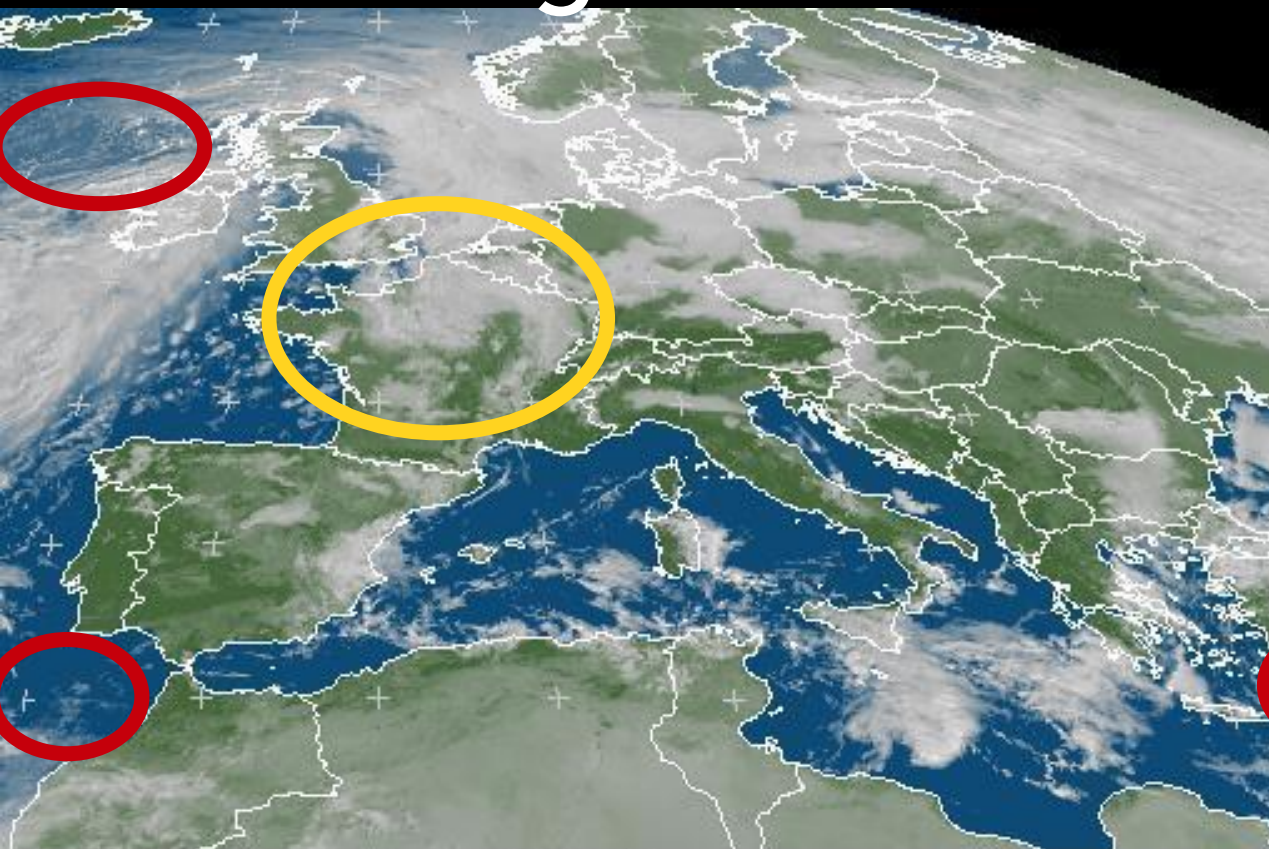


- **Im Durchschnitt sind zwei Drittel der Erde von Wolken bedeckt.**
- **Tiefe Wasserwolken sind sehr hell und verdoppeln die Erdalbedo auf etwa 0.31.**
- **Wolken reflektieren etwa die Hälfte der einfallenden Sonnenstrahlung.**

# Strahlungsbilanz



# Strahlungsbilanz



MET9 VIS006 2011-11-17 10:00 UTC

EUMETSAT

Sichtbares Licht (0.6 μm)  
manche Wolken erhöhen die  
Albedo

$$\frac{\partial R}{\partial C} < 0$$



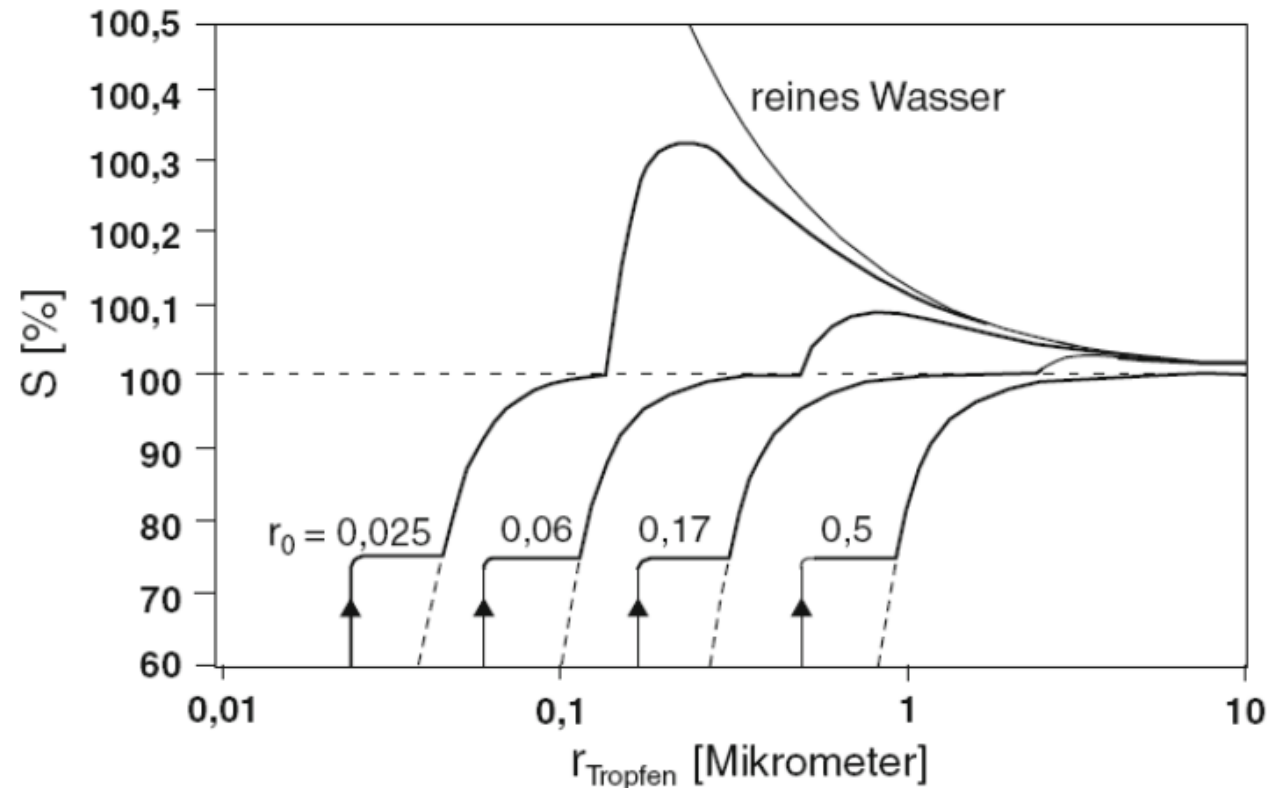
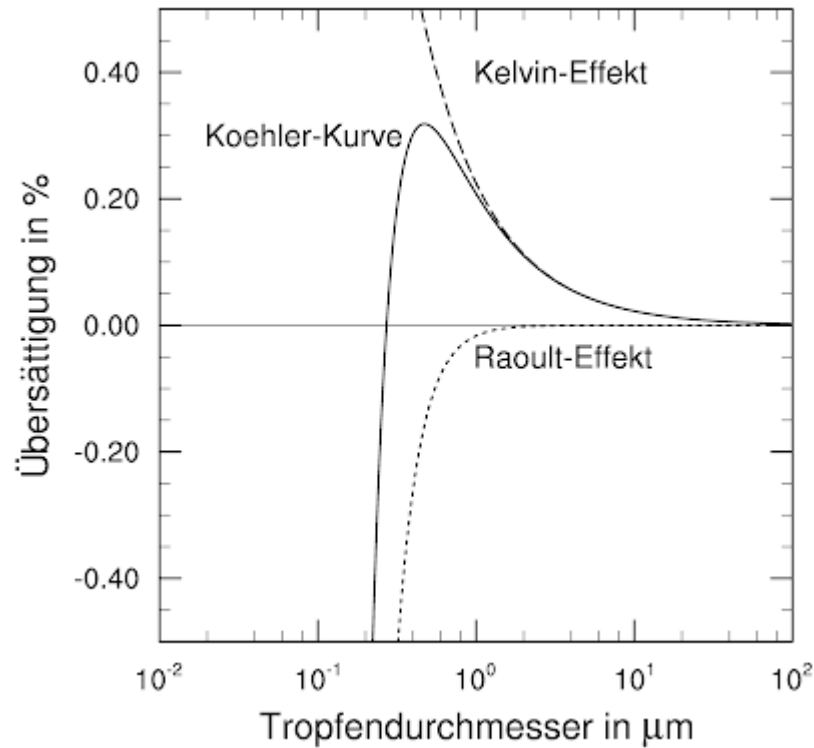
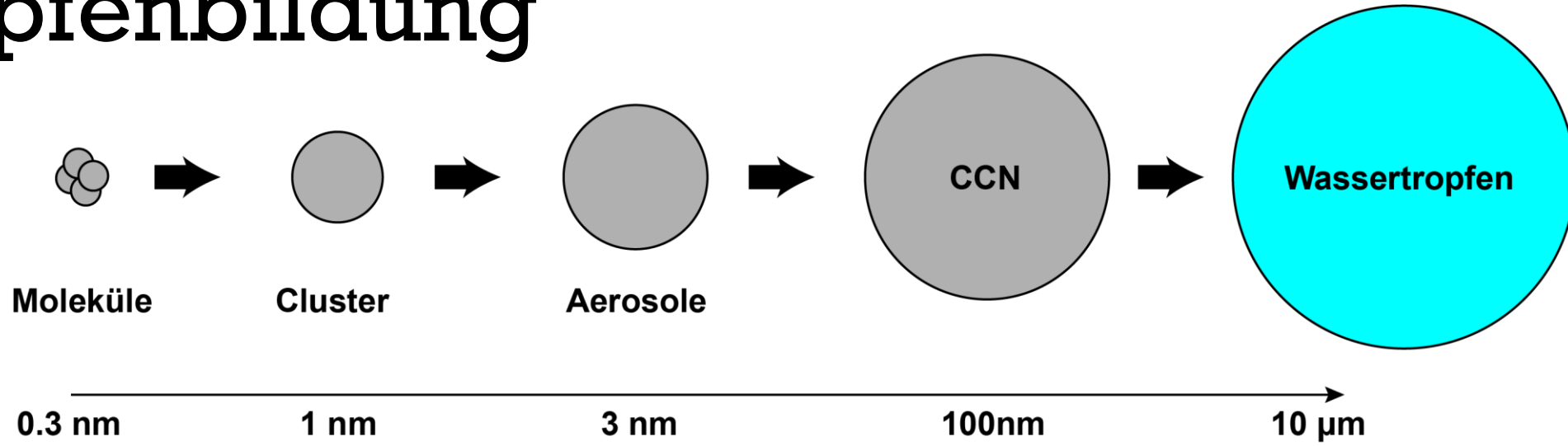
MET9 IR108 2011-11-17 10:00 UTC

EUMETSAT

Infrarot/Wärmestrahlung (10.8 μm)  
manche Wolken erhöhen den  
Treibhauseffekt

$$\frac{\partial R}{\partial C} > 0$$

# Tropfenbildung



# Und wenn keine Partikel da sind?

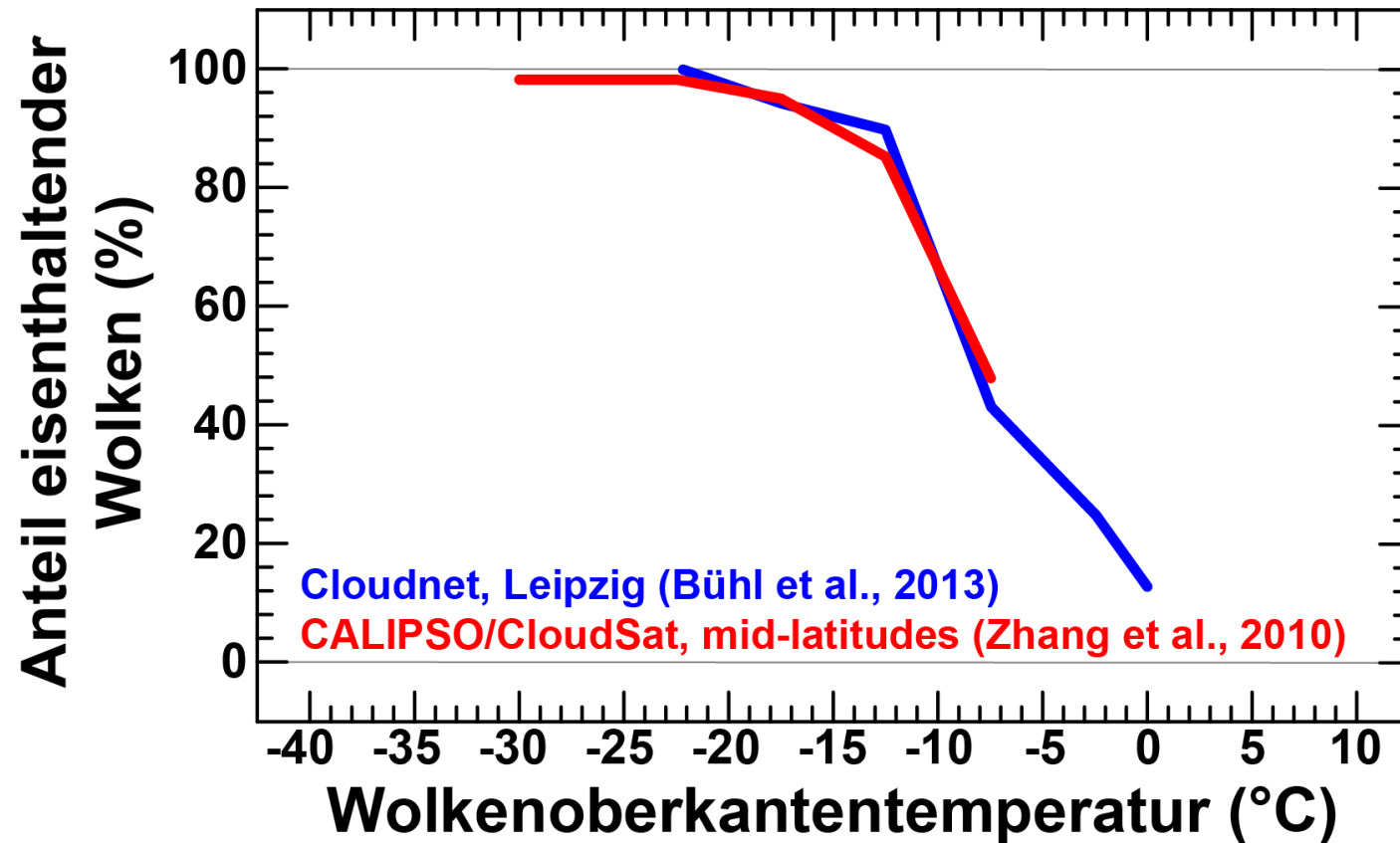
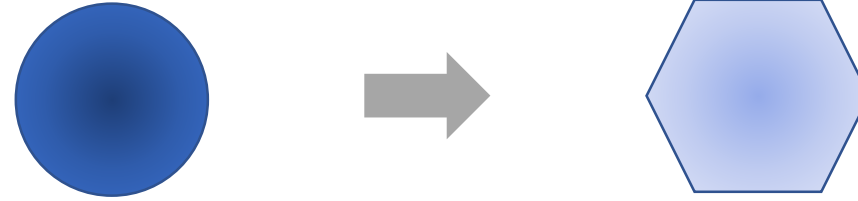


*"No particles no fog"* <http://www.youtube.com/watch?v=EneDwu0HrVg>  
Thorsten Mauritsen, Stockholm University; Zoran Ristovski, Queensland University

# Eisbildung

## homogenes Gefrieren

$T < -38^{\circ}\text{C}$ , ohne Eiskeime

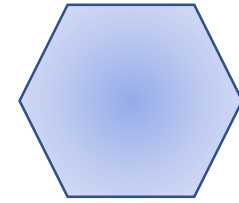
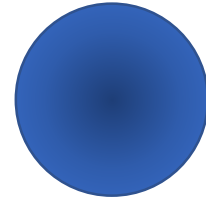




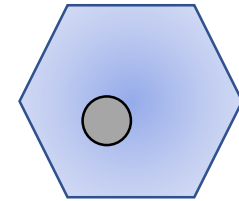
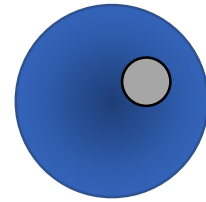
# Eisbildung

**homogenes Gefrieren**

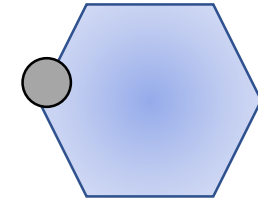
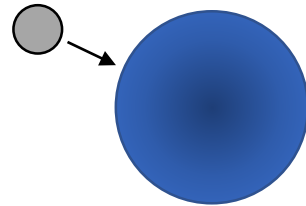
$T < -38^{\circ}\text{C}$ , ohne Eiskeime



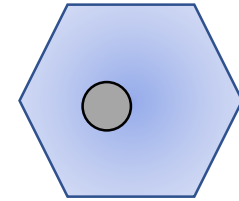
**Immersionsgefrieren**



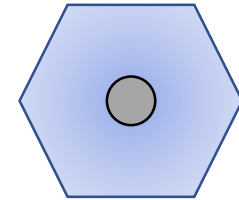
**Kontaktgefrieren**



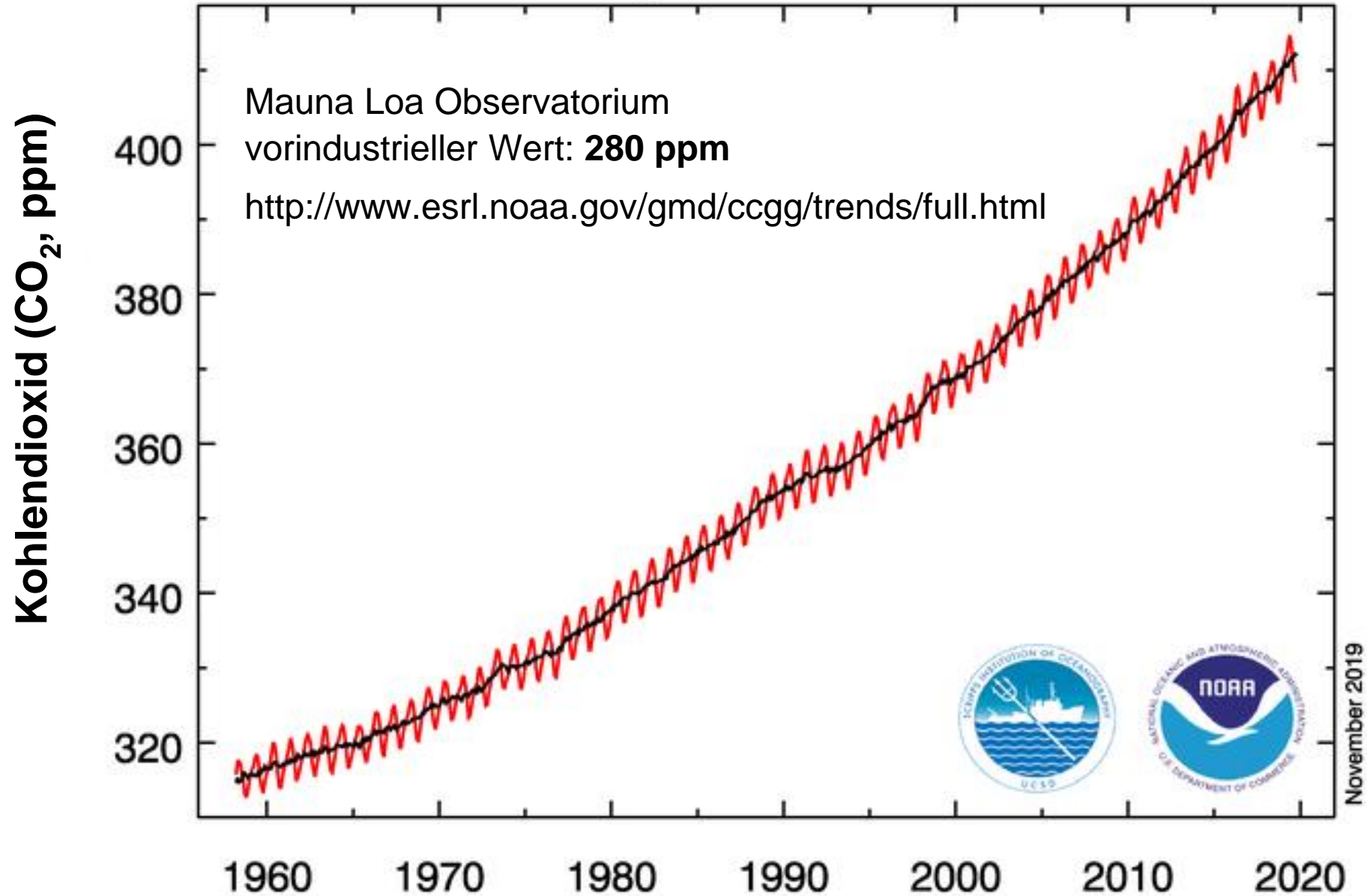
**Depositionsgefrieren**



**Kondensationsgefrieren**

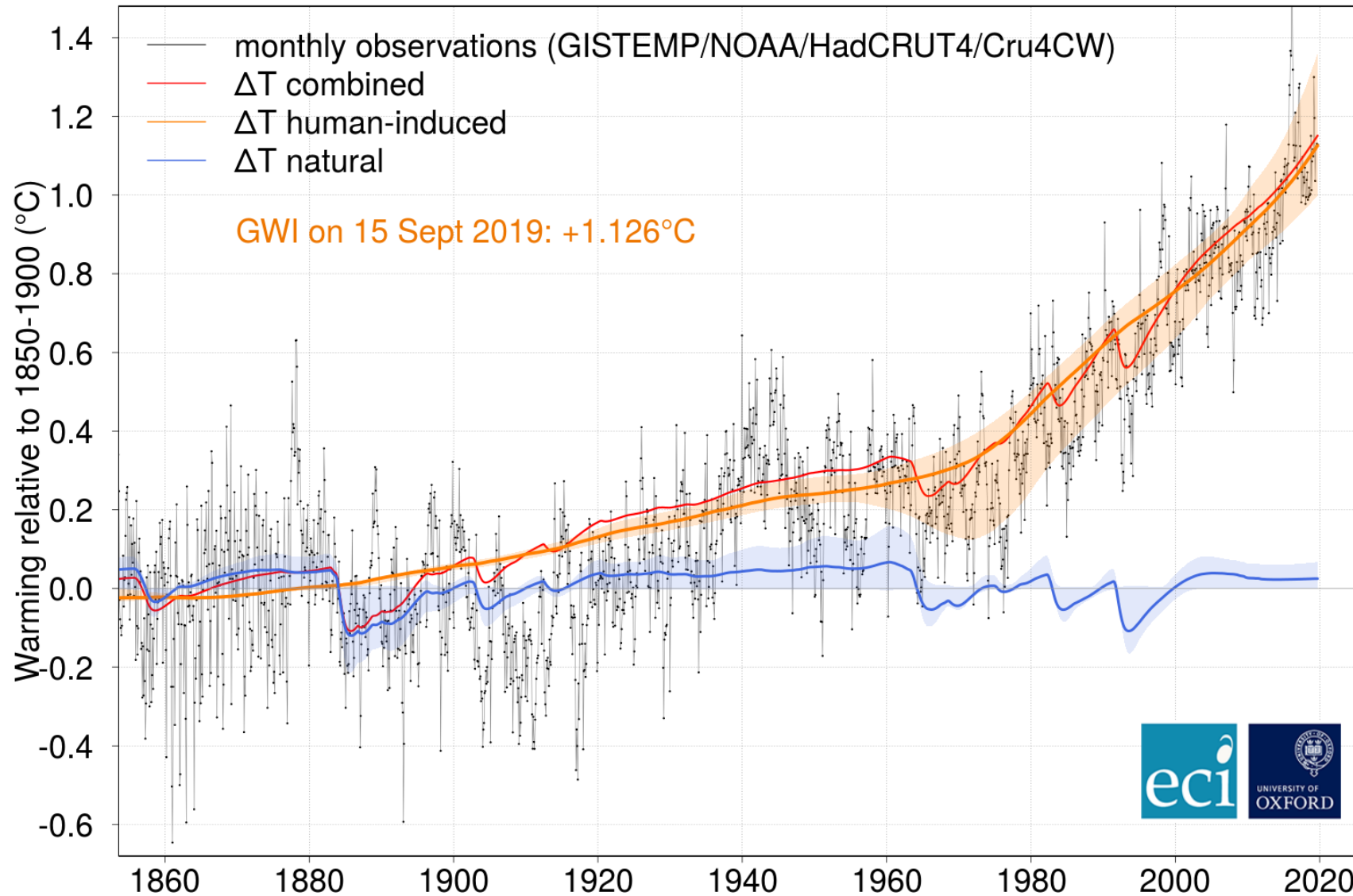


# Nun zum Klimawandel

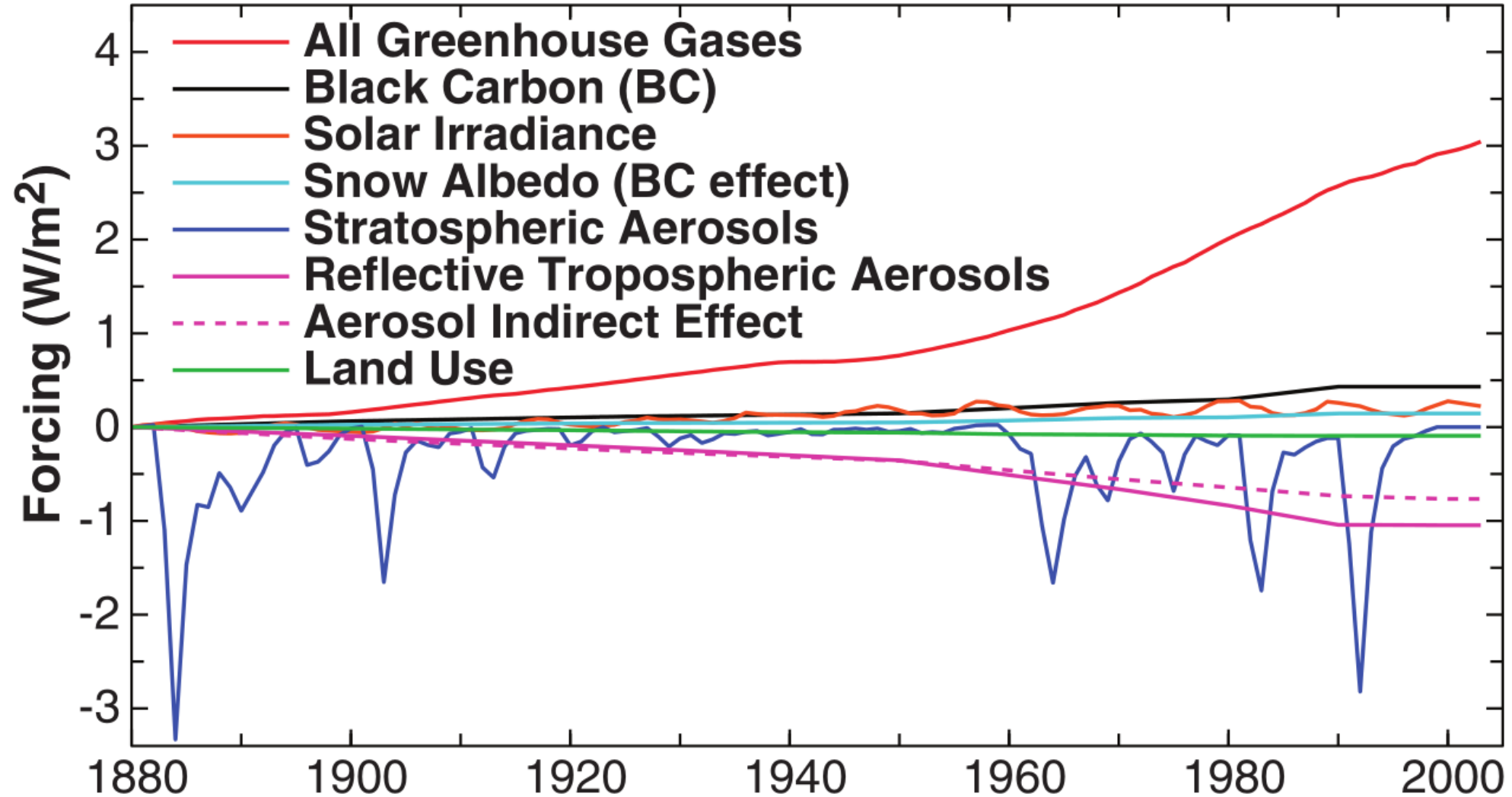


# Globaler Temperaturanstieg

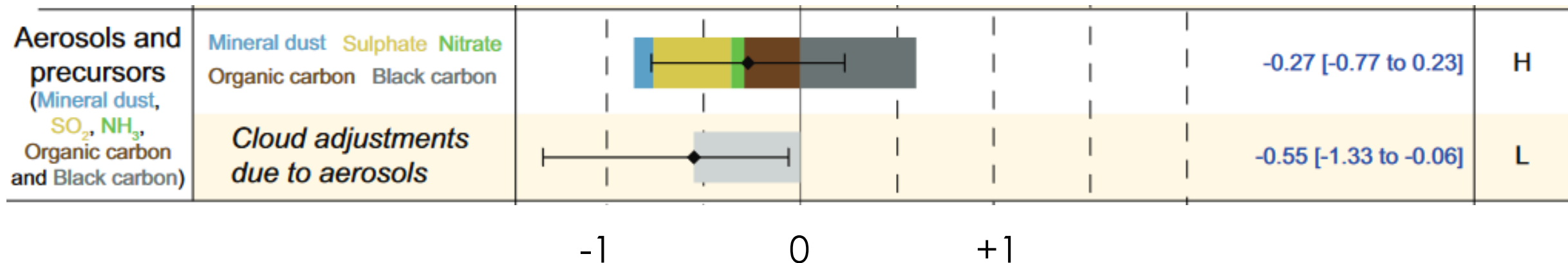
Global Warming Index (aggregate observations) - updated to Sept 2019



# Aufschlüsselung der Anteile



# Effektiver Strahlungsantrieb durch Aerosole und Aerosol-Wolken-Wechselwirkungen

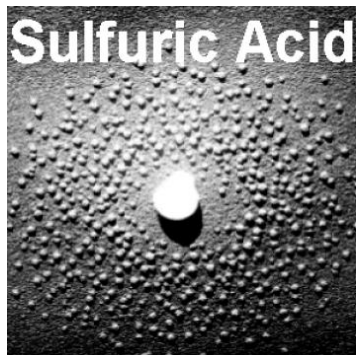


Strahlungsantrieb im Vergleich zu 1750 (Wm<sup>-2</sup>)

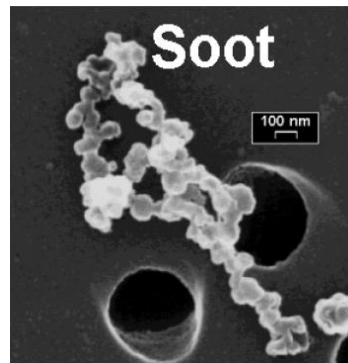
IPCC AR5: **-0.55 Wm<sup>-2</sup>** ( -0.06 to -1.33 Wm<sup>-2</sup> )

Größtenteils aus Modellstudien mit etwas Satelliteninformation

# Direkter Strahlungsantrieb durch Aerosole



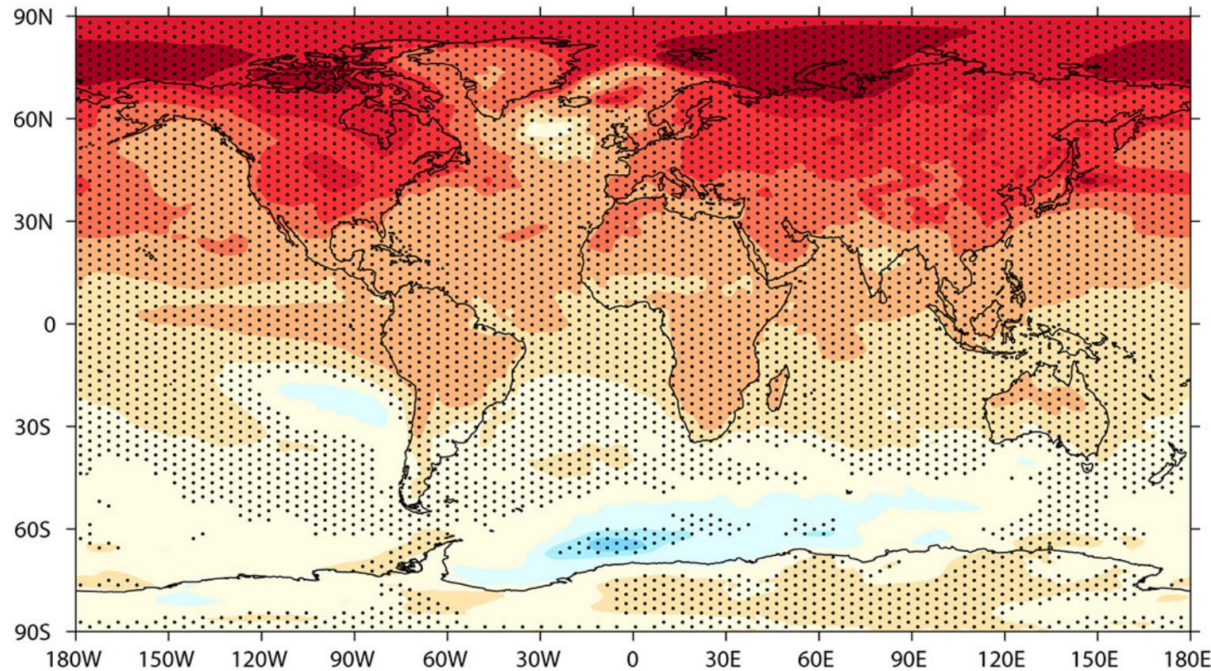
**Aerosolpartikel reflektieren  
Sonnenlicht  
(weiß von oben gesehen)**



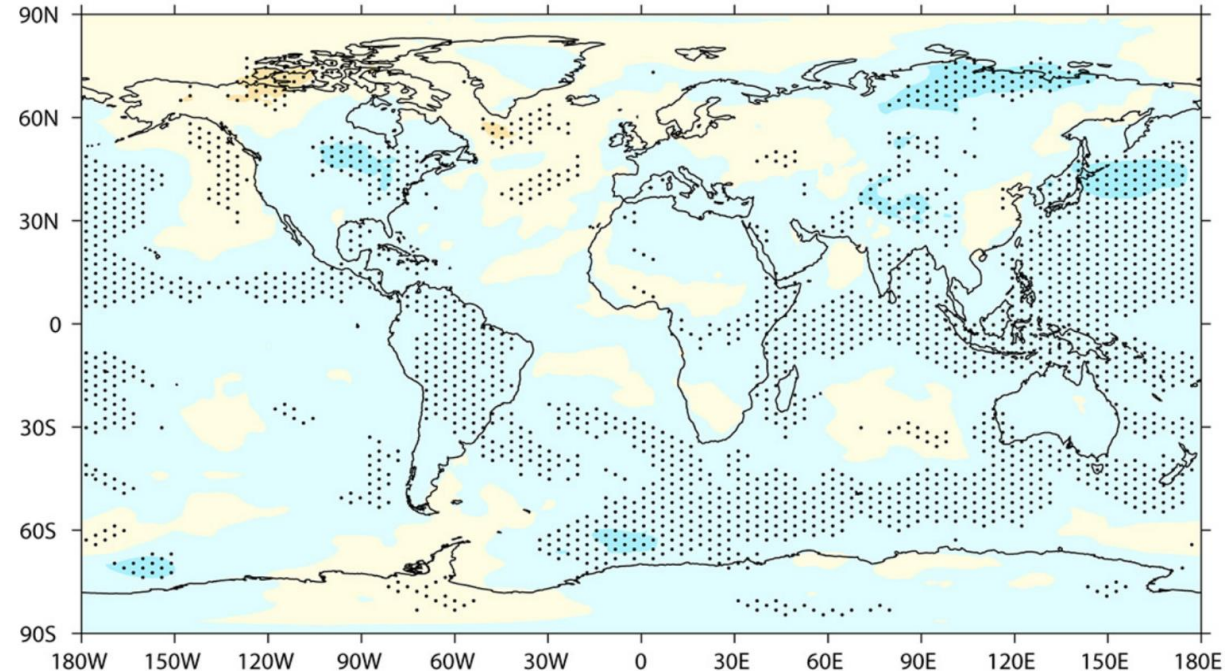
**Aerosolpartikel absorbieren  
Sonnenlicht  
(schwarz von oben gesehen)**

# Direkter Strahlungsantrieb durch Aerosole

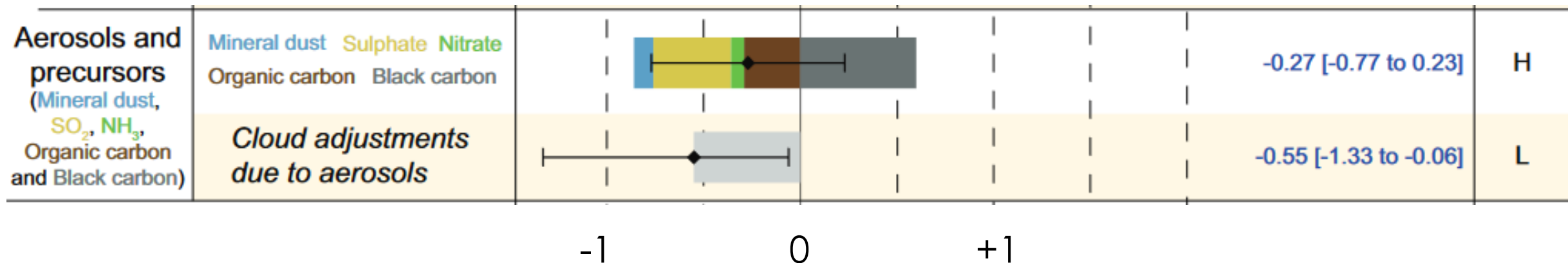
Mögliche Temperaturänderung bei Stopp von Schwefelemissionen (°C)



Mögliche Temperaturänderung bei Stopp von Rußemissionen (°C)



# Effektiver Strahlungsantrieb durch Aerosole und Aerosol-Wolken-Wechselwirkungen



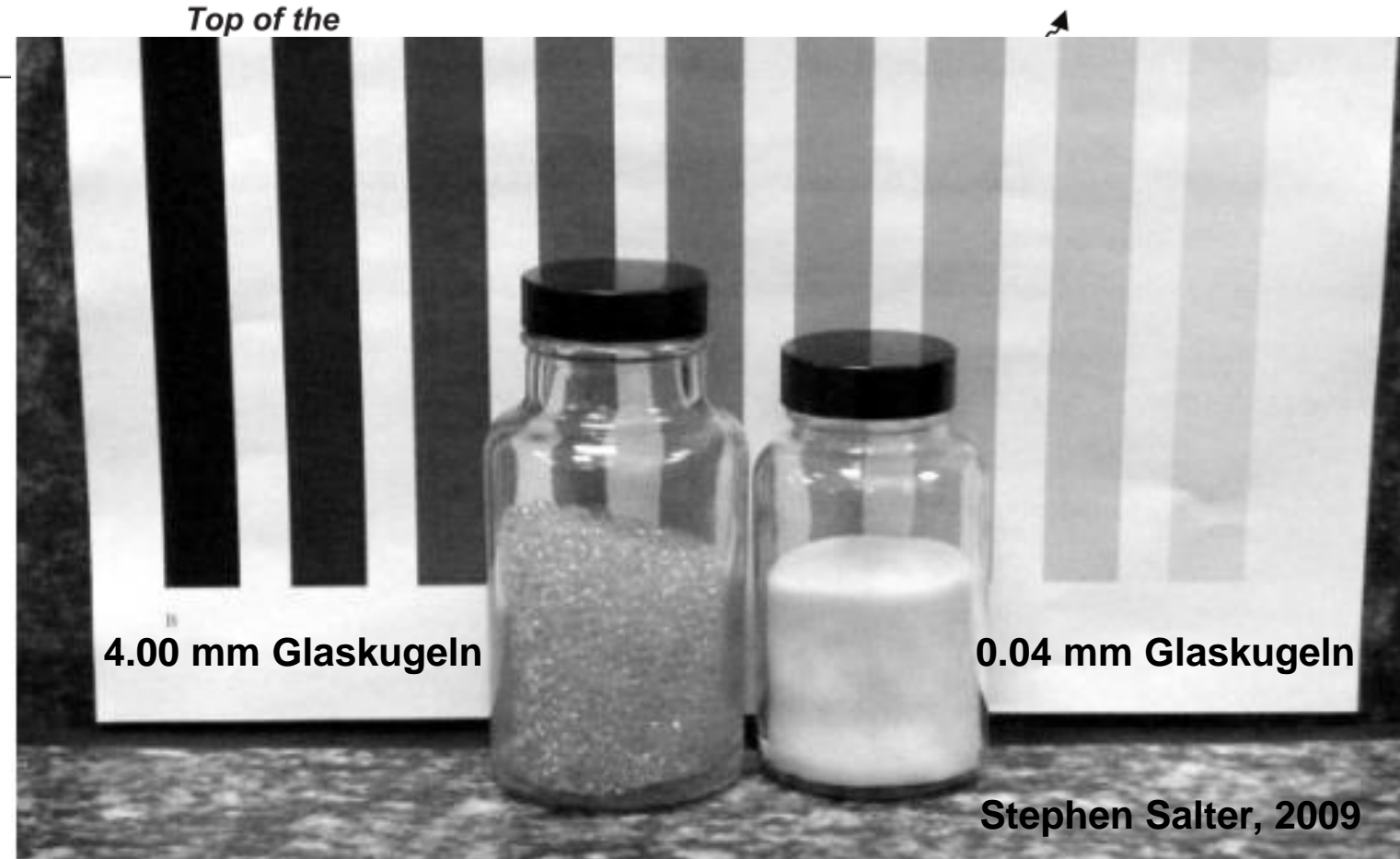
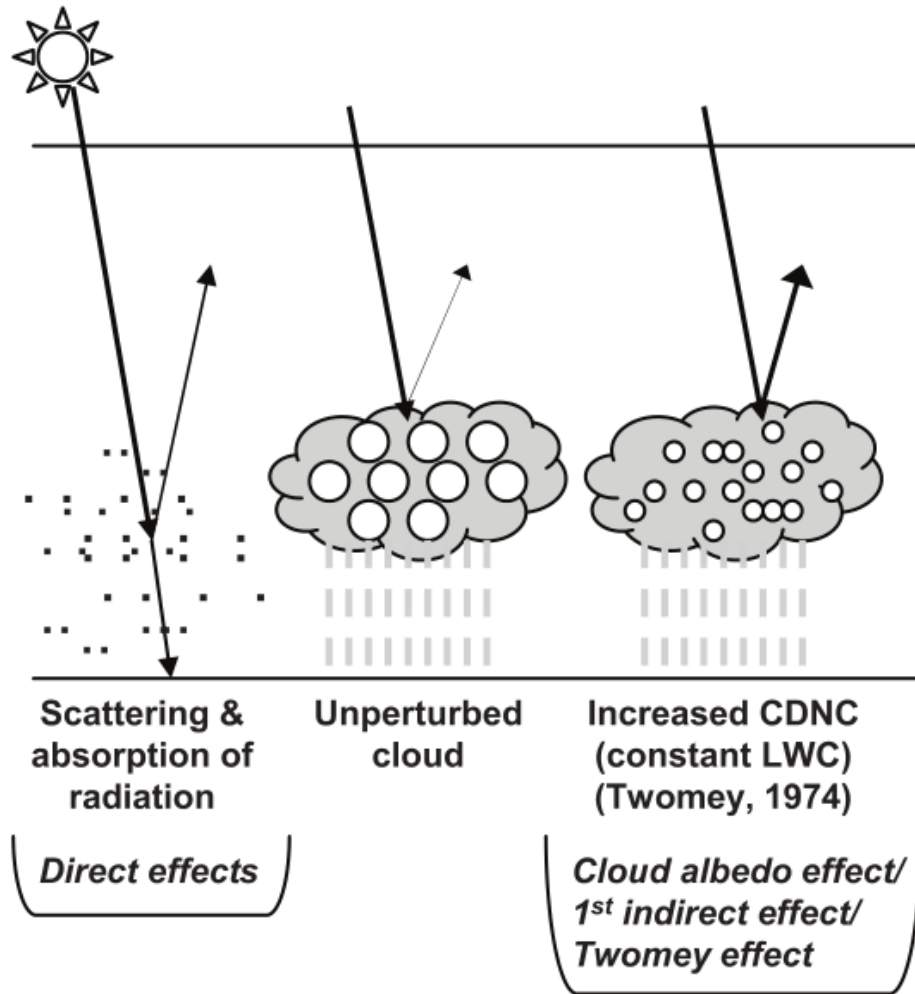
Strahlungsantrieb im Vergleich zu 1750 (Wm<sup>-2</sup>)

IPCC AR5: **-0.55 Wm<sup>-2</sup>** ( -0.06 to -1.33 Wm<sup>-2</sup> )

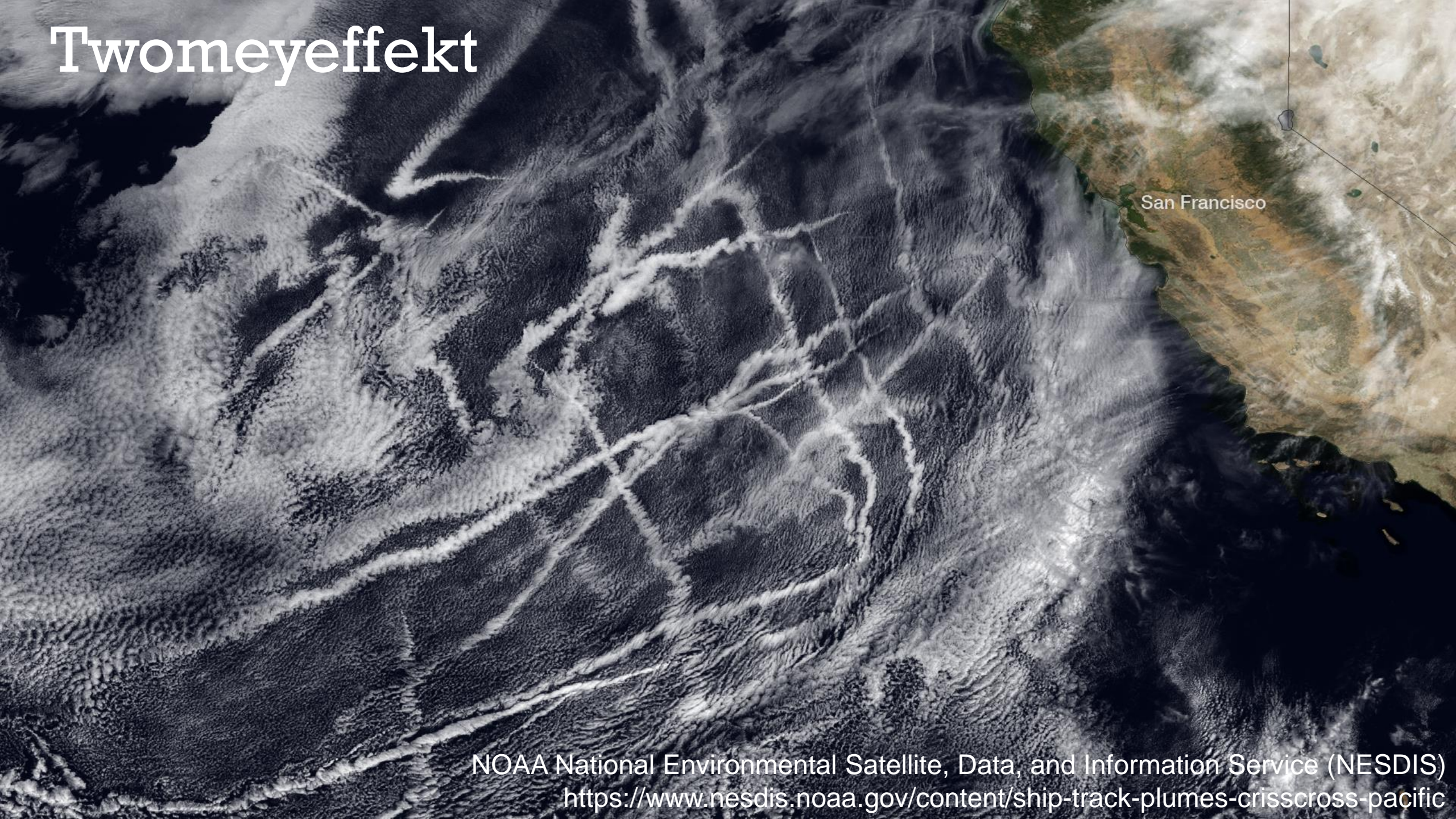
Größtenteils aus Modellstudien mit etwas Satelliteninformation



# Aerosol-Wolken-Wechselwirkungen

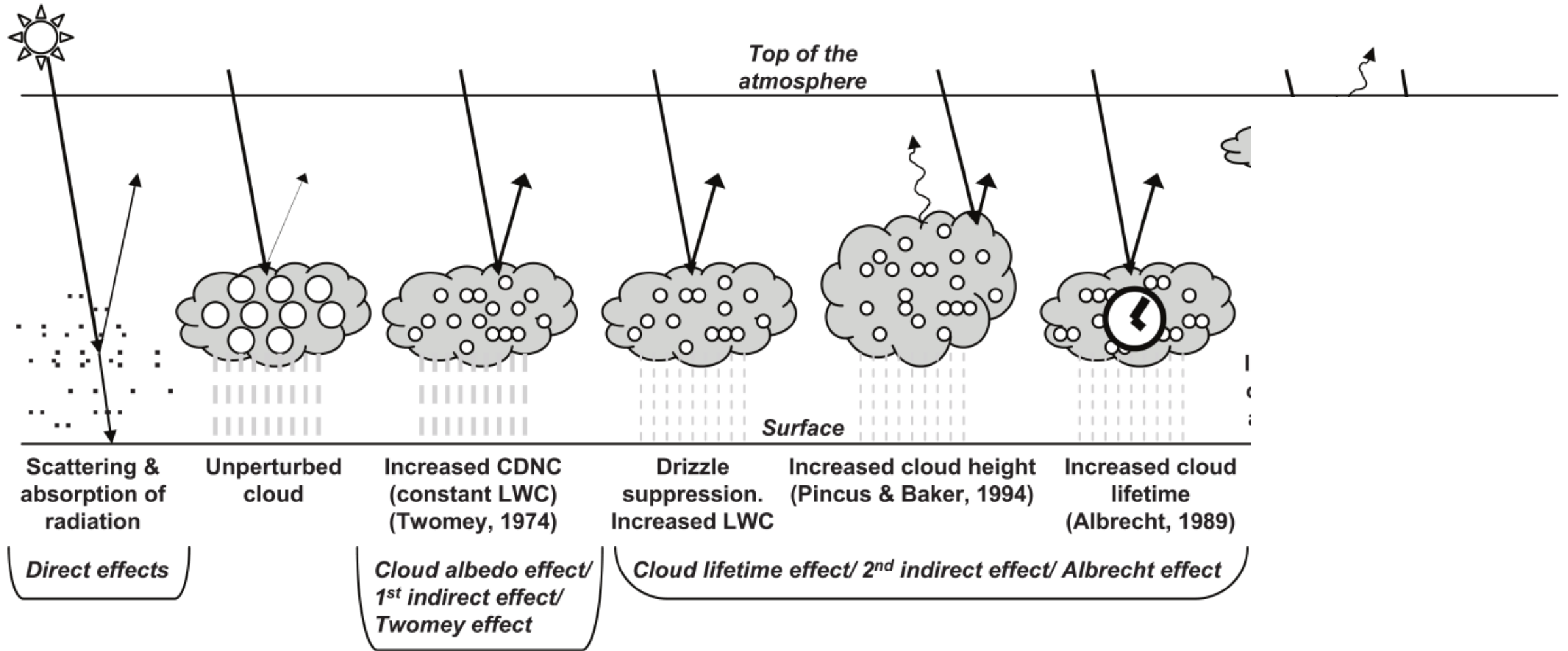


# Twomeyeffekt

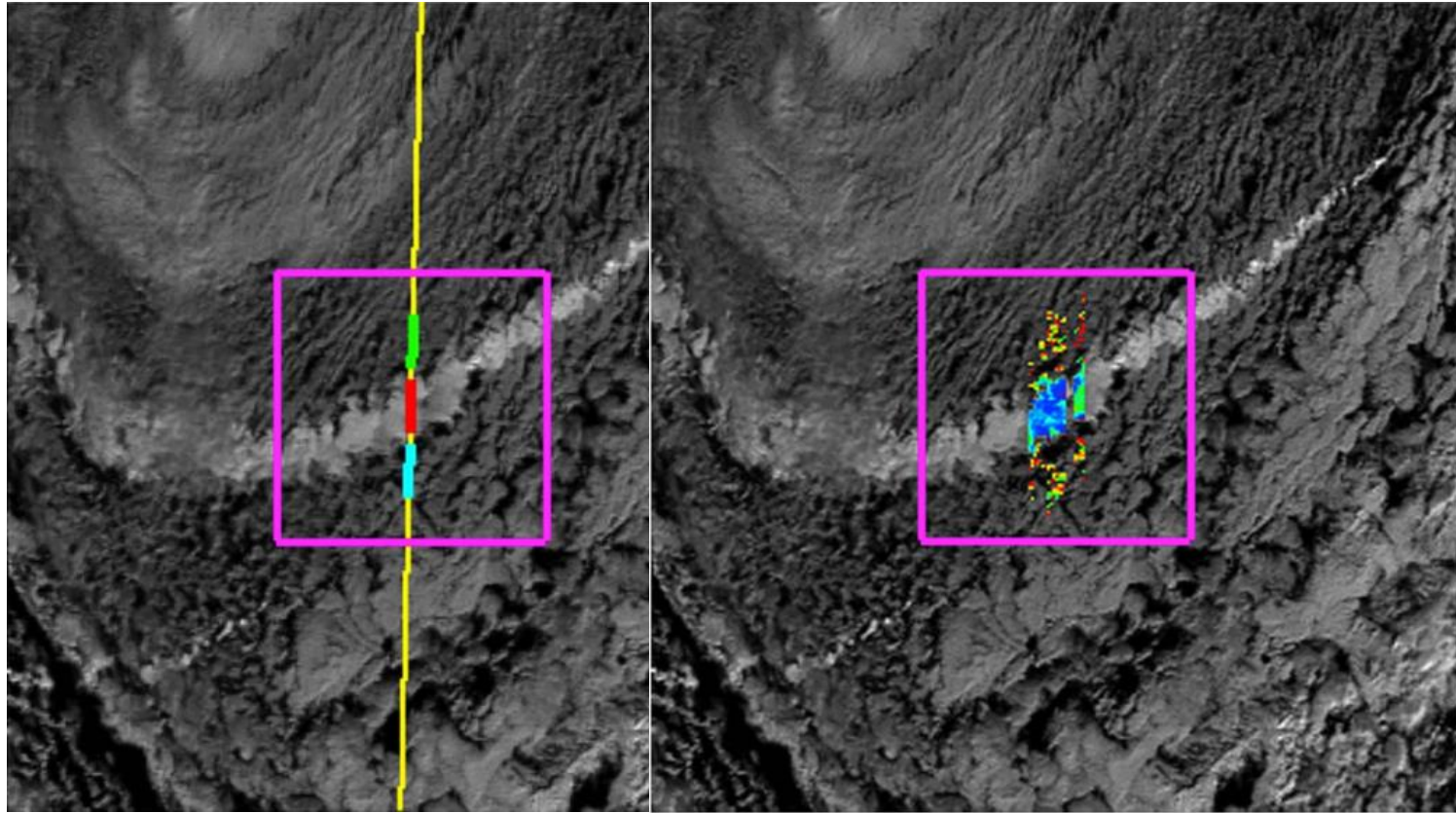


NOAA National Environmental Satellite, Data, and Information Service (NESDIS)  
<https://www.nesdis.noaa.gov/content/ship-track-plumes-crisscross-pacific>

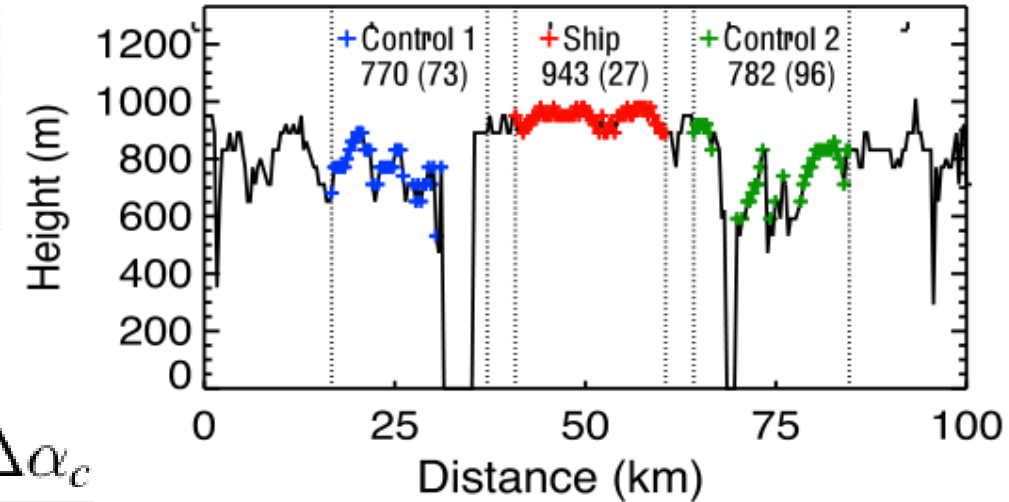
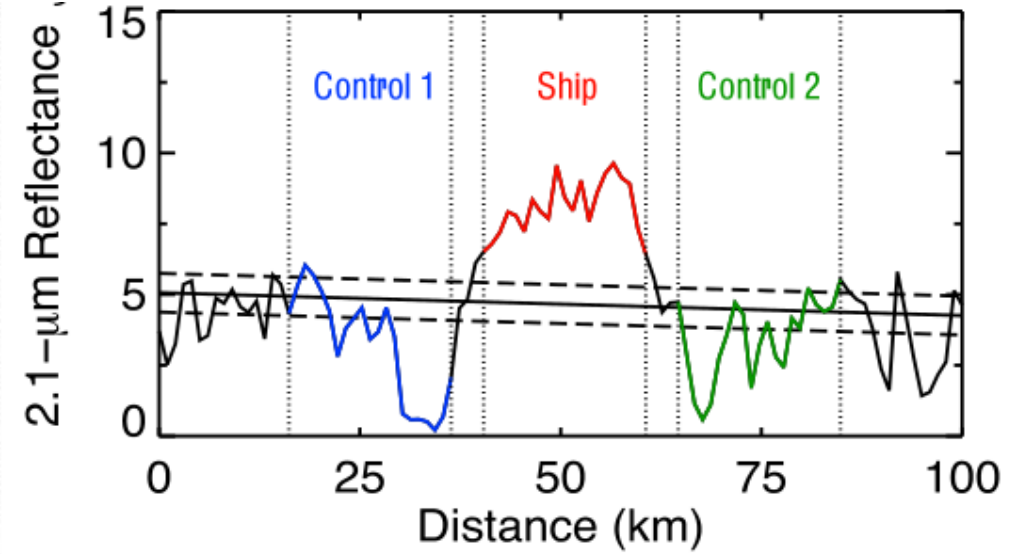
# Aerosol-Cloud-Interactions



# Aerosol-Wolken-Wechselwirkungen



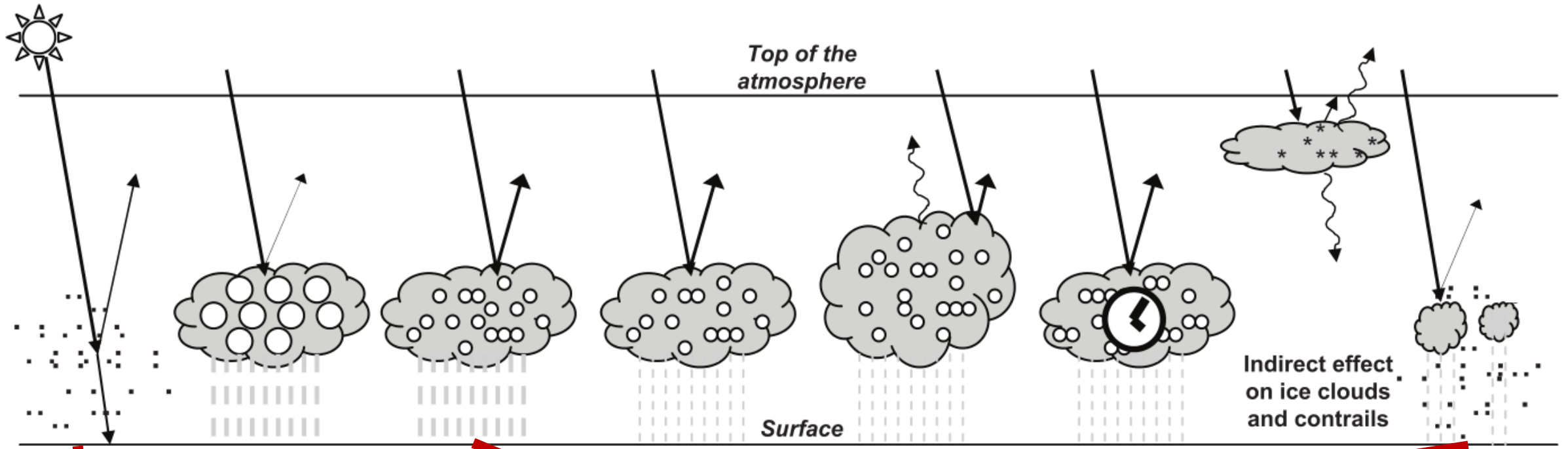
10  $R_e$  (3.7  $\mu\text{m}$ ) 25



$$\tau_c = \frac{3}{2} \frac{LWP}{\rho_l R_e}$$

$$\frac{\Delta\tau_c}{\tau_c} = - \left( \frac{\Delta R_e}{R_e} - \frac{\Delta LWP}{LWP} \right) \propto \frac{\Delta\alpha_c}{\alpha_c}$$

# Aerosol-Wolken-Wechselwirkungen



Irradiance Changes from Aerosol-Radiation Interactions ( <b>ari</b> )		Irradiance Changes from Aerosol-Cloud Interactions ( <b>aci</b> )		
Direct Effect	Semi-Direct Effects	Cloud Albedo Effect	Lifetime (including glaciation & thermodynamic) Effects	AR4
Radiative Forcing ( <b>RFari</b> )	Adjustments	Radiative Forcing ( <b>RFaci</b> )	Adjustments	AR5
Effective Radiative Forcing ( <b>ERFari</b> )		Effective Radiative Forcing ( <b>ERFaci</b> )		

# Aerosol-Wolken-Wechselwirkungen

ERFaci

Störung in

Strahlung Wolkentropfen Aerosol

$$\Delta F = \underbrace{\frac{dR}{d \ln N_c}}_{\text{ERFaci}} \cdot \underbrace{\frac{d \ln N_c}{d \ln \alpha}}_{\text{Störung in Wolkentropfen}} \cdot \Delta \ln \alpha_{\text{ant}}$$

$$= \underbrace{\frac{\partial R}{\partial \ln N_c}}_{\text{ERFaci}} + \underbrace{\frac{\partial R}{\partial f} \frac{df}{d \ln N_c} + \frac{\partial R}{\partial L} \frac{dL}{d \ln N_c} + \frac{\partial R}{\partial T_{\text{top}}} \frac{dT_{\text{top}}}{d \ln N_c}}_{\text{Adjustments}}$$

Radiative forcing **RFaci**  
(1<sup>st</sup> effect)

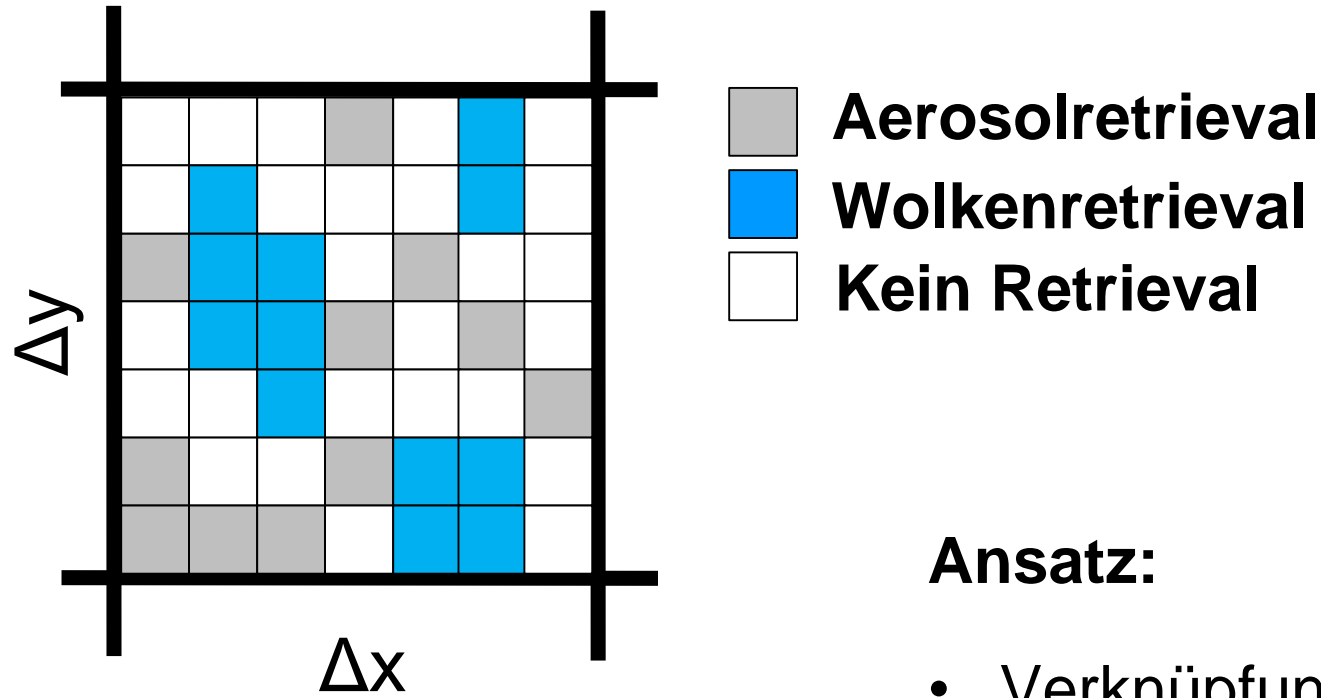
**Adjustments**  
("2<sup>nd</sup> effect")

Wolkenanteil  $f$ , (cloud fraction)

Wolkenwasserpfad  $L$ ,

Wolkenoberkantentemperatur  $T_{\text{top}}$

# ACI aus Satellitenbeobachtungen



$\Delta x / \Delta y$  typischerweise  $1^\circ \approx 100$  km

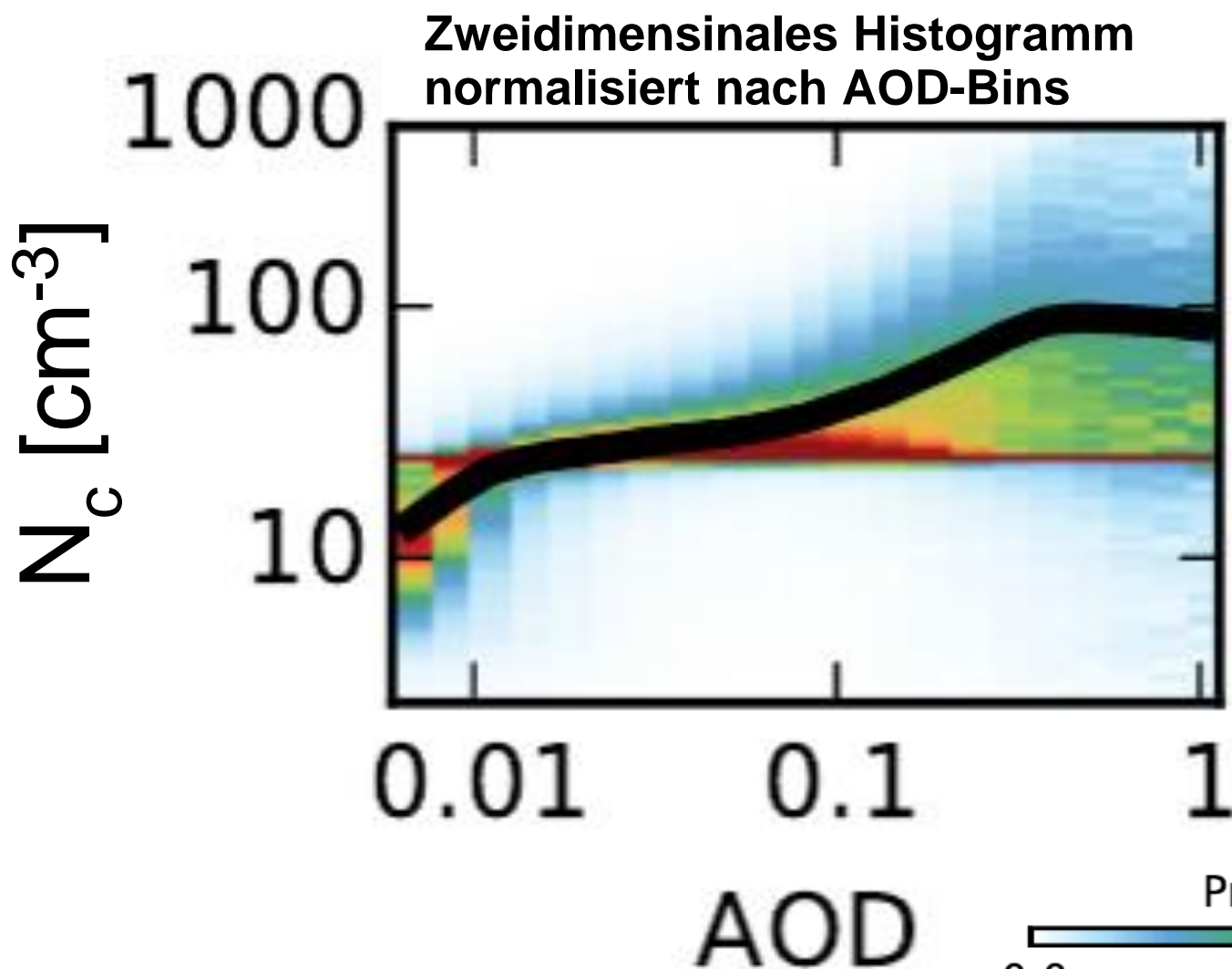
Sensitivitätsterm  $\frac{d \ln N_c}{d \ln \alpha}$  aus Satellitendaten

→ Zusammenhang zwischen Aerosol and  $N_d$

## Ansatz:

- Verknüpfung von Aerosol- und Wolkenparametern innerhalb einer groben Gitterbox (Tageswerte)
- Kombination von Messungen mit verschiedenen Sensoren

# ACI aus Satellitenbeobachtungen

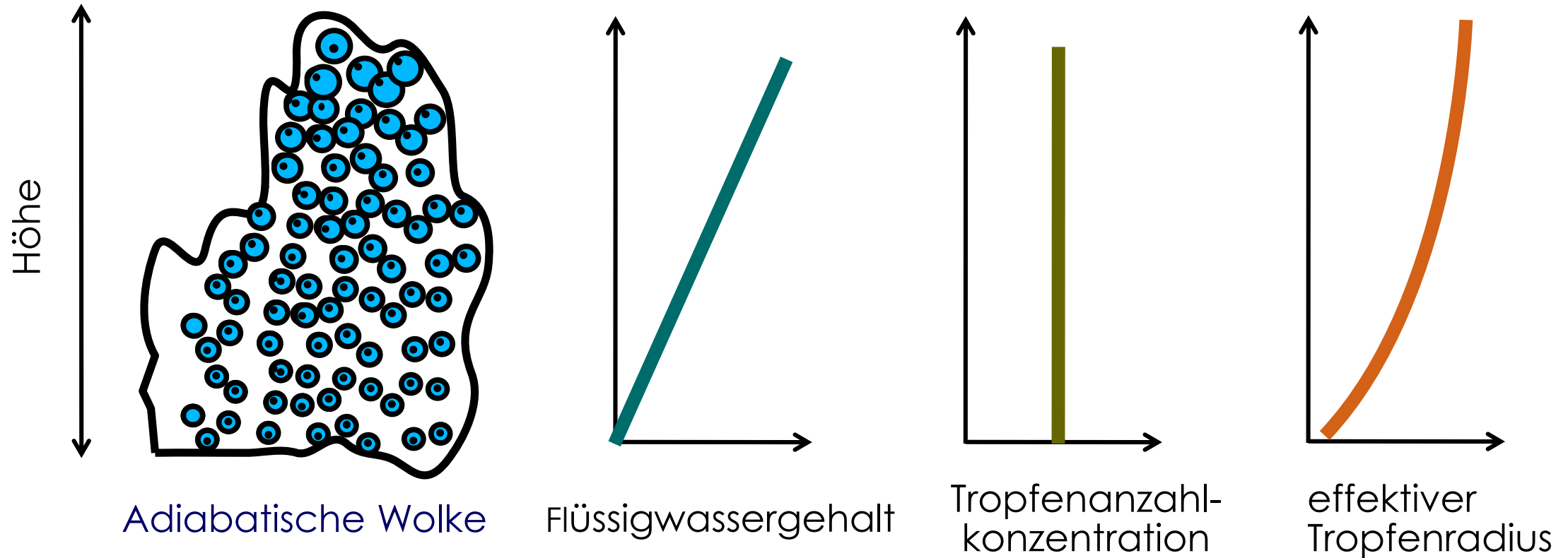


Aerosolinformation:  
Meist wird die Aerosoloptische Dicke  
(AOD, Aerosolladung)  
oder der Aerosol Index  
(AI, Aerosolladung und Grösse)  
genutzt

mittlere  $N_c$  pro AOD-Bin



# Wolkentropfenanzahlkonzentration, $N_c$



- Schlüssekgrösse für Aerosol-Wolken-Wechselwirkungen
- Nicht direkt bestimmt sondern aus den Messössen Wolkenoptische Dicke  $\tau_c$  und effektiver Tropfenradius an der Wolkenoberkante  $R_e$  abgeleitet

$$\tau_c = \frac{3}{2} \frac{LWP}{\rho_l R_e}$$

# Aerosol-Wolken-Wechselwirkungen

ERFaci

Störung in

Strahlung Wolkentropfen Aerosol

$$\Delta F = \underbrace{\frac{dR}{d \ln N_c}}_{\text{Radiative forcing (1st effect)}} \cdot \frac{d \ln N_c}{d \ln \alpha} \cdot \Delta \ln \alpha_{\text{ant}}$$
$$= \underbrace{\frac{\partial R}{\partial \ln N_c}}_{\text{Radiative forcing (1st effect)}} + \underbrace{\frac{\partial R}{\partial f} \frac{df}{d \ln N_c} + \frac{\partial R}{\partial L} \frac{dL}{d \ln N_c} - \frac{\partial R}{\partial T_{\text{top}}} \frac{dT_{\text{top}}}{d \ln N_c}}_{\text{Adjustments ("2nd effect")}}$$

Radiative forcing **RFaci**  
(1<sup>st</sup> effect)

**Adjustments**  
("2<sup>nd</sup> effect")

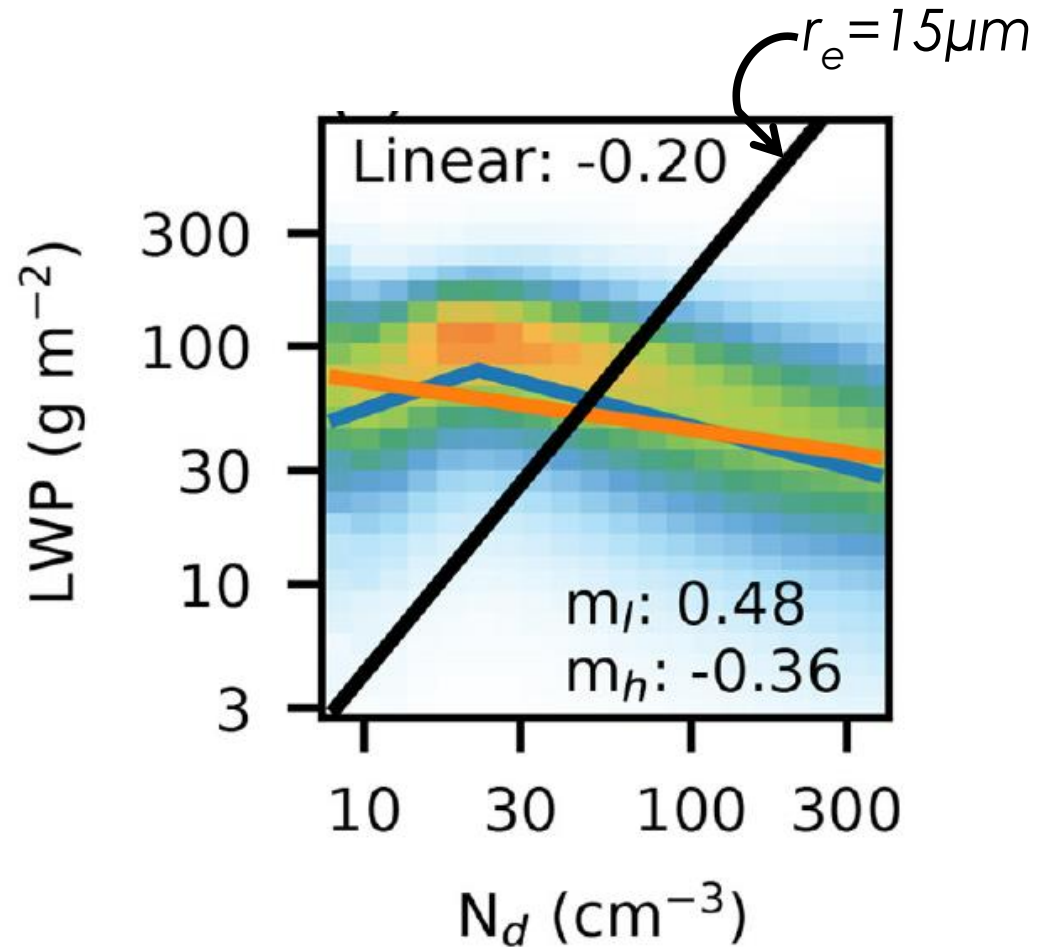
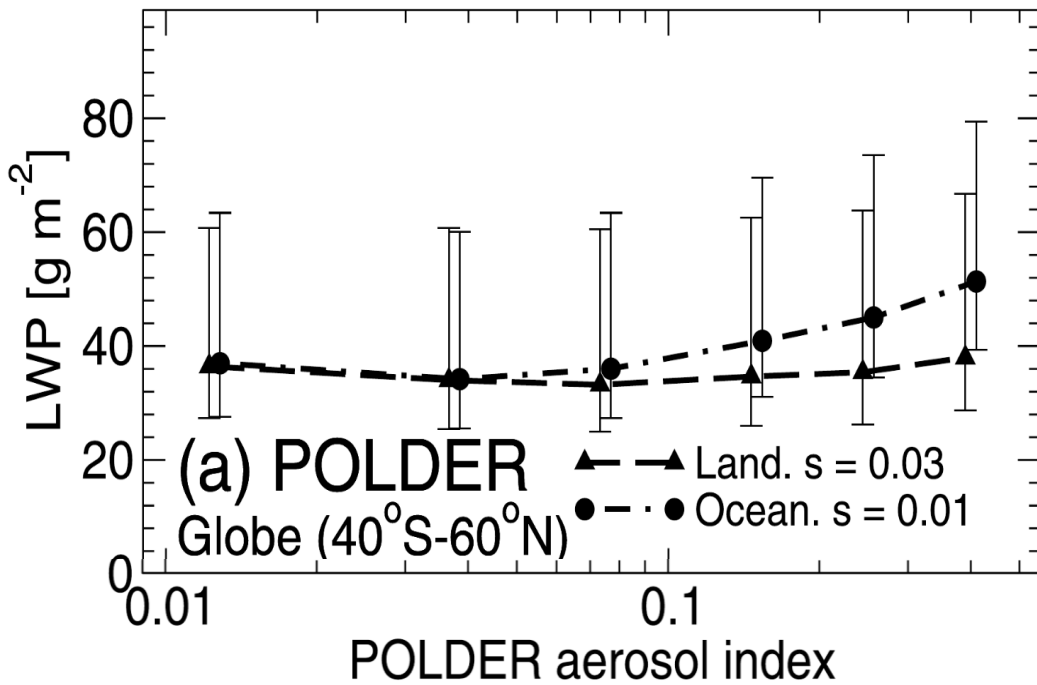
Wolkenanteil  $f$ , (cloud fraction)

Wolkenwasserpfad  $L$ ,

Wolkenoberkantentemperatur  $T_{\text{top}}$

# Anpassung Flüssigwasserspfad, L oder LWP

$$\frac{d \ln L}{d \ln N_c}$$



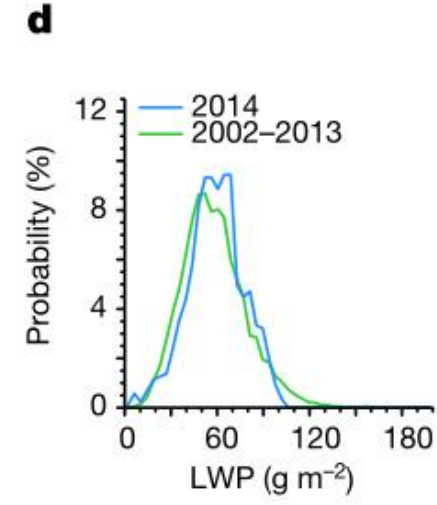
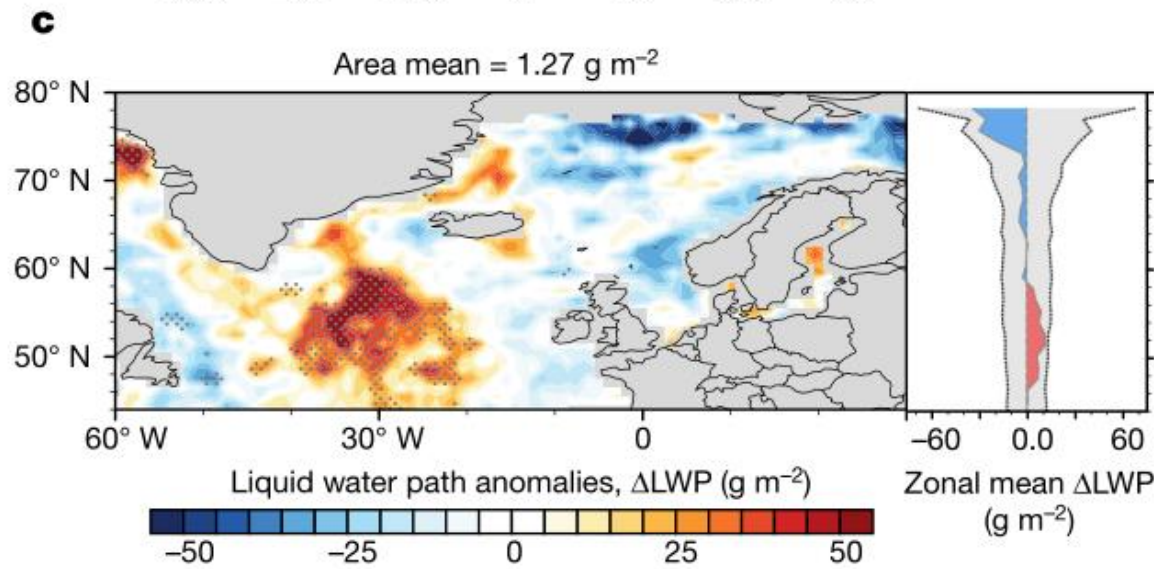
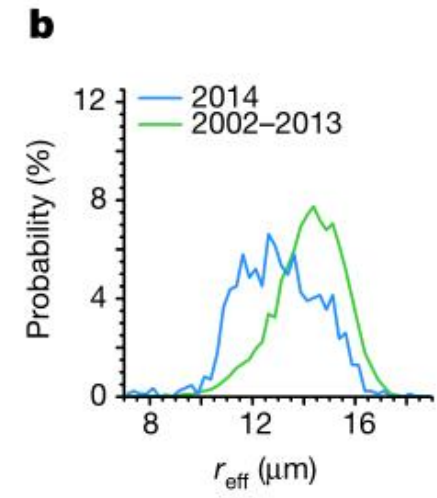
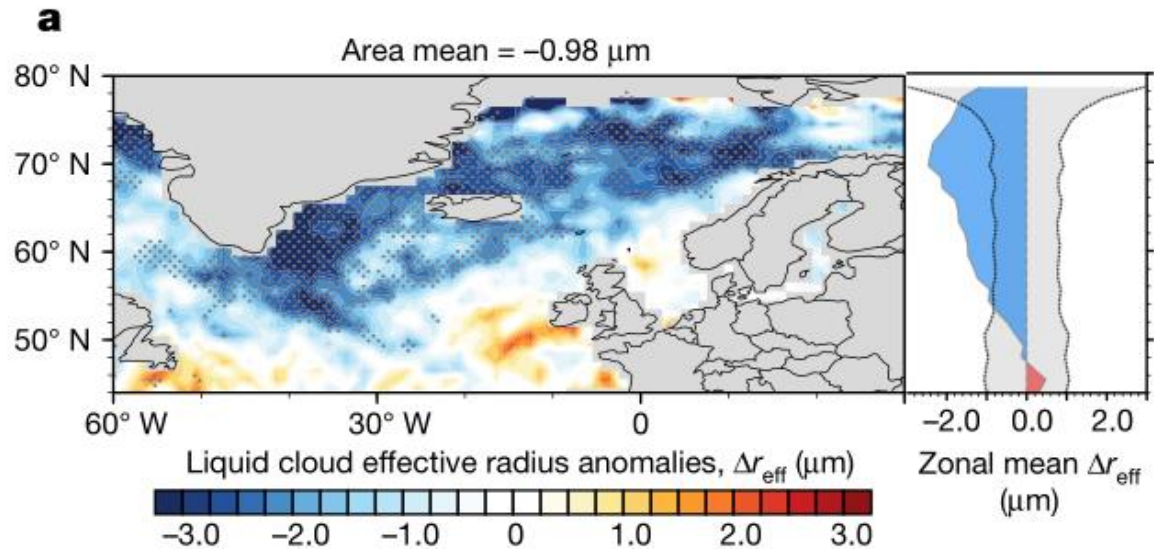
LWP aus Microwellenfernerkundung (AMSR-E)  
 $N_c$  aus spektralen Radiometermessungen (MODIS)

# Anpassung Flüssigwasserpfad, L oder LWP

Wolken im natürlichen Labor: Vulkanausbruch Holuhraun, Island 2014

$$\frac{d \ln L}{d \ln N_c}$$

$R_e$



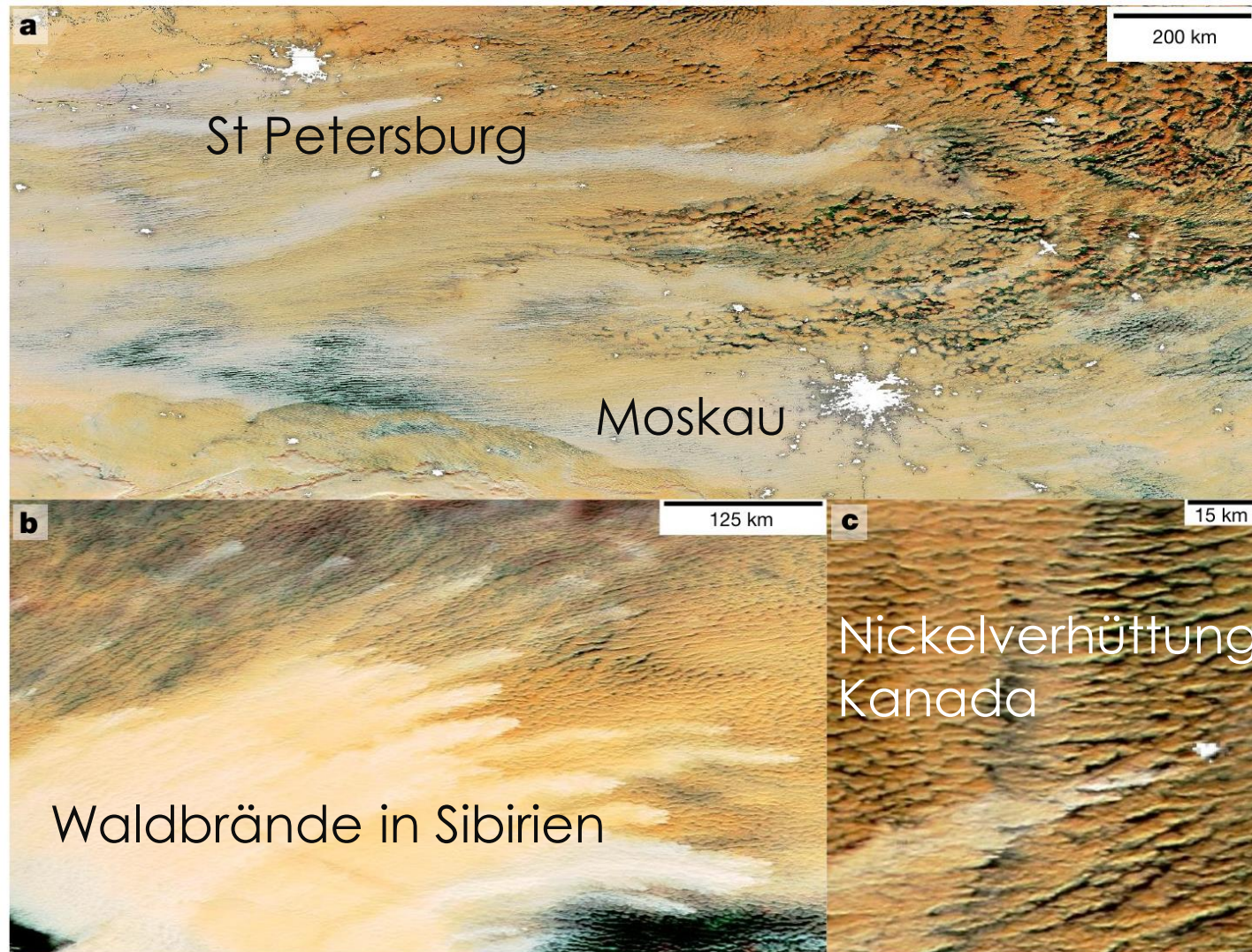
$LWP$

MODIS Aqua,  
Oktober 2014  
im Vergleich zum  
Mittelwert von  
2002 bis 2013

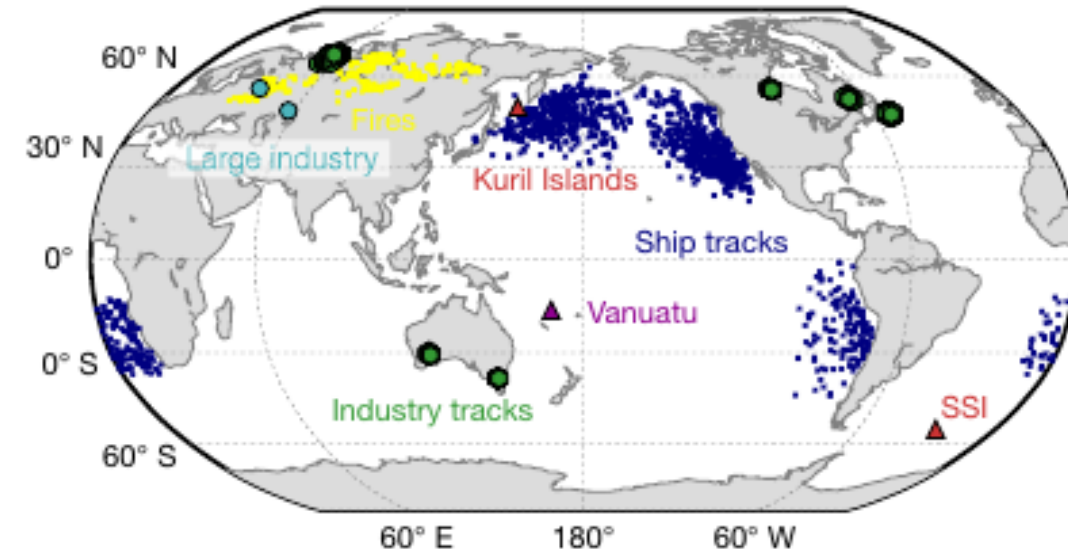
# Anpassung Flüssigwasserpfad, L oder LWP

Wolken im natürlichen Labor:  
Abluftfahnen von Feuern, Vulkanen, Schiffen oder Städten

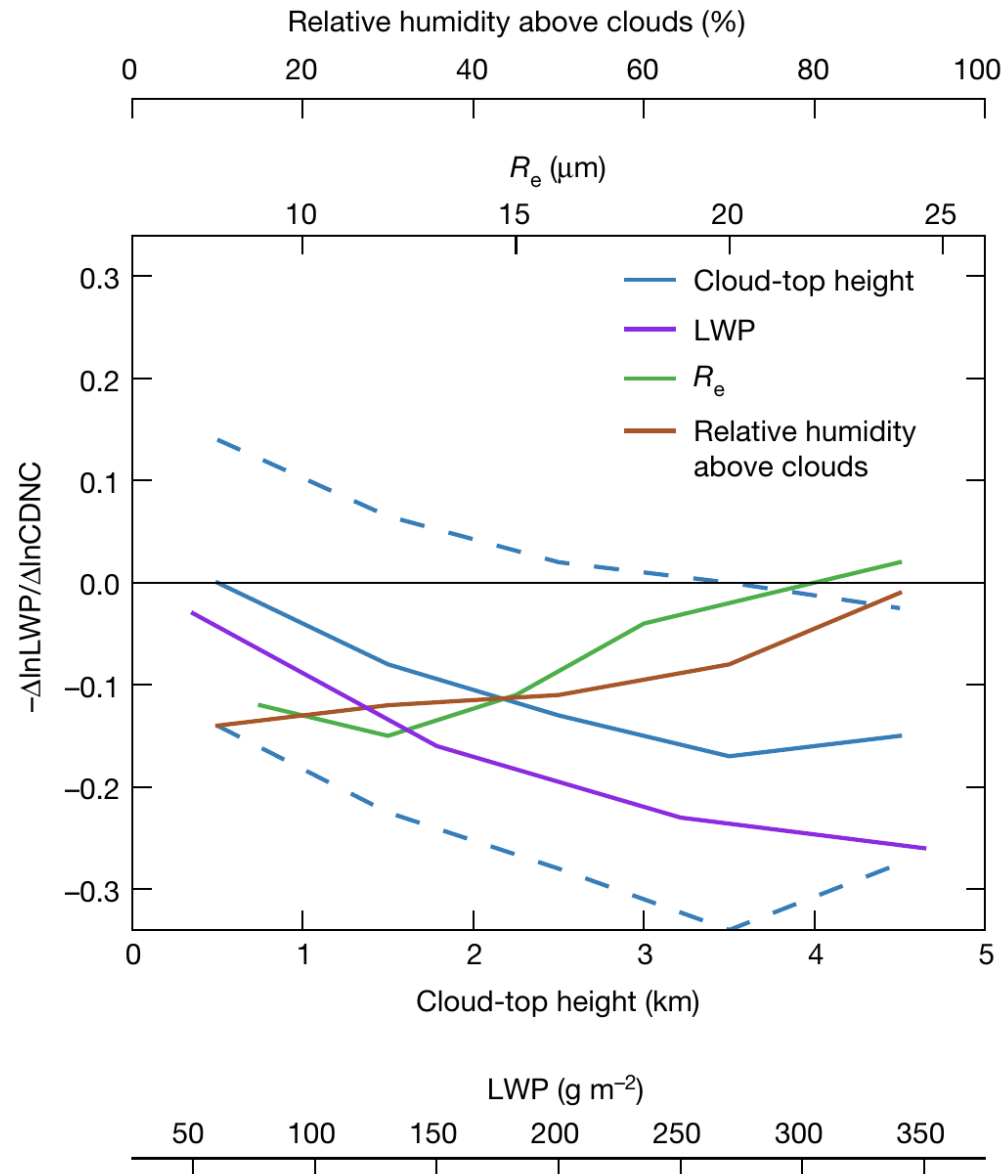
$$\frac{d \ln L}{d \ln N_c}$$



Identifizierung von Abluftfahnen



# Anpassung Flüssigwasserpfad, L oder LWP



$\Delta \ln \text{LWP} / \Delta \ln \text{CDNC}$ :

LWP-Änderungen sind auf Änderungen der Wolkentropfenanzahlkonzentration (CDNC) normiert.

Was bedeutet das für ERFaci:

- LWP-Änderungen gleichen 23% von RFaci ( $+0.25 \text{ Wm}^{-2}$ ) aus
- Modelle unterschätzen die Kompensation verschiedener Effekte

# Was passiert in eisenthaltenden Wolken?

Alles viel komplizierter, weil

- verschiedene Aerosoltypen unterschiedlich gut zur Eisbildung beitragen
- latente Wärme durch Gefrieren freigesetzt wird und dynamische Prozesse stärkt

## Thermodynamischer Effekt:

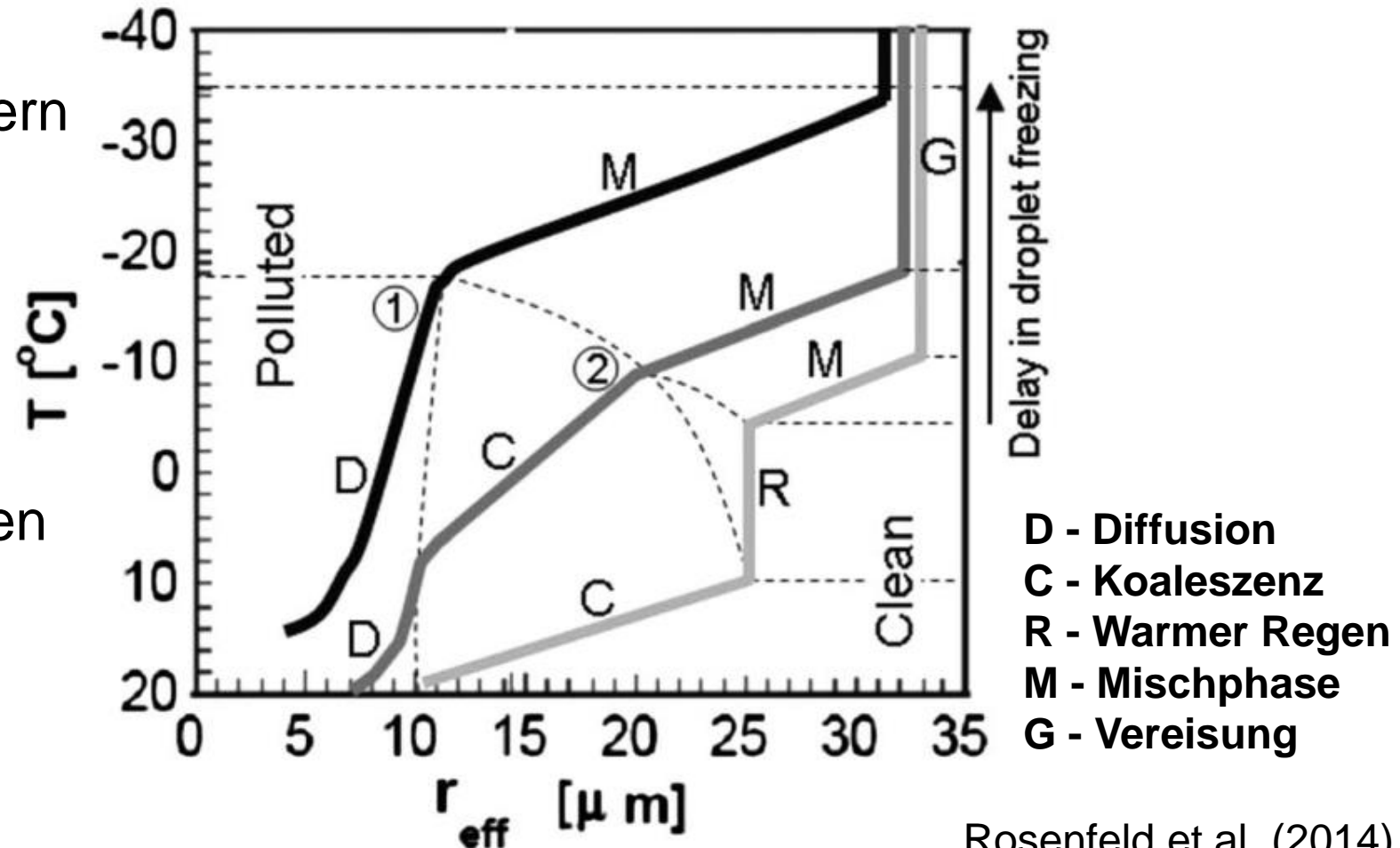
kleinere Wolkentropfen verzögern die Vereisung

***Wolken leben länger***

## Vereisungseffekt:

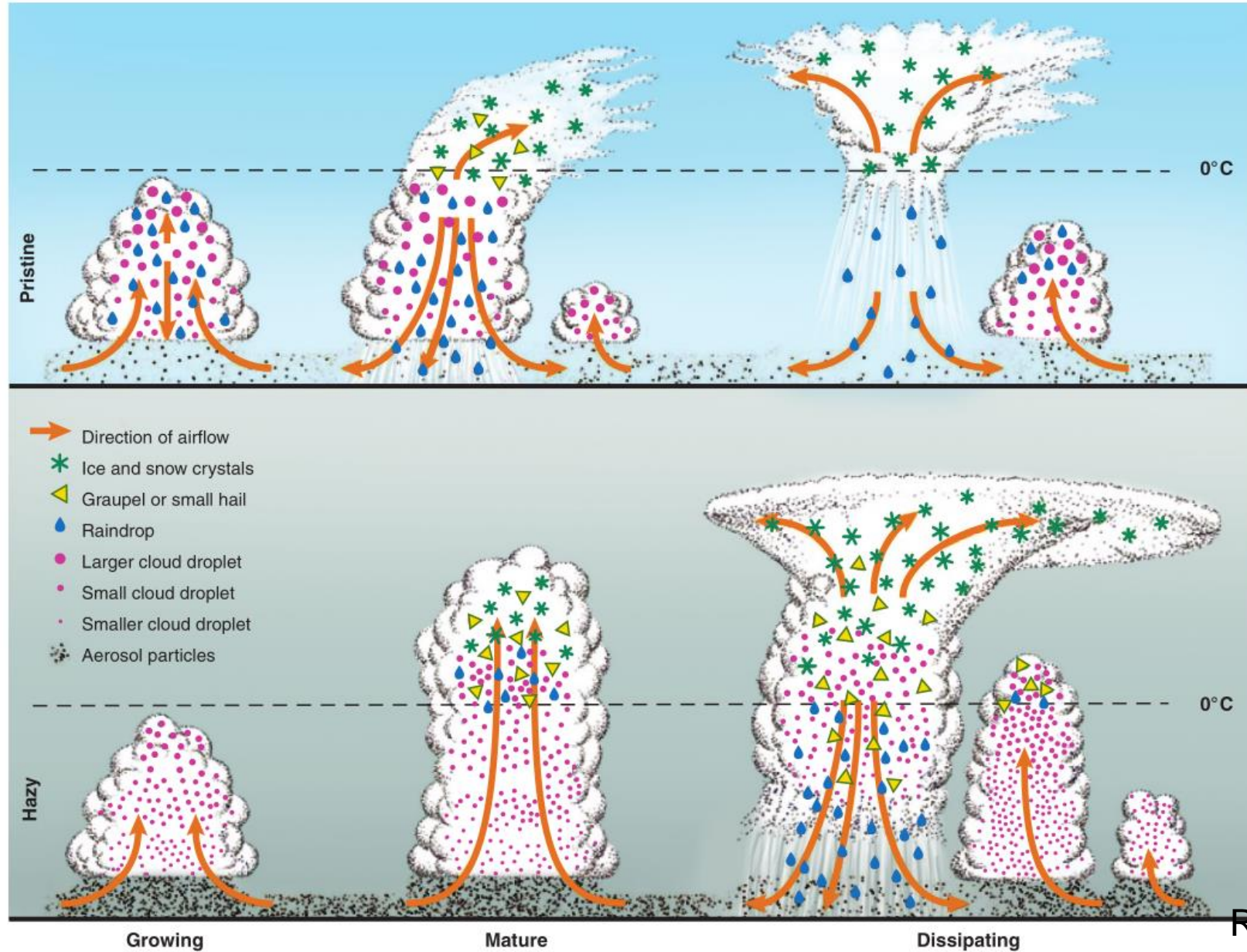
mehr Eiskeime erhöhen die Wahrscheinlichkeit, dass Wolken vereisen und abregnen

***Wolken leben kürzer***



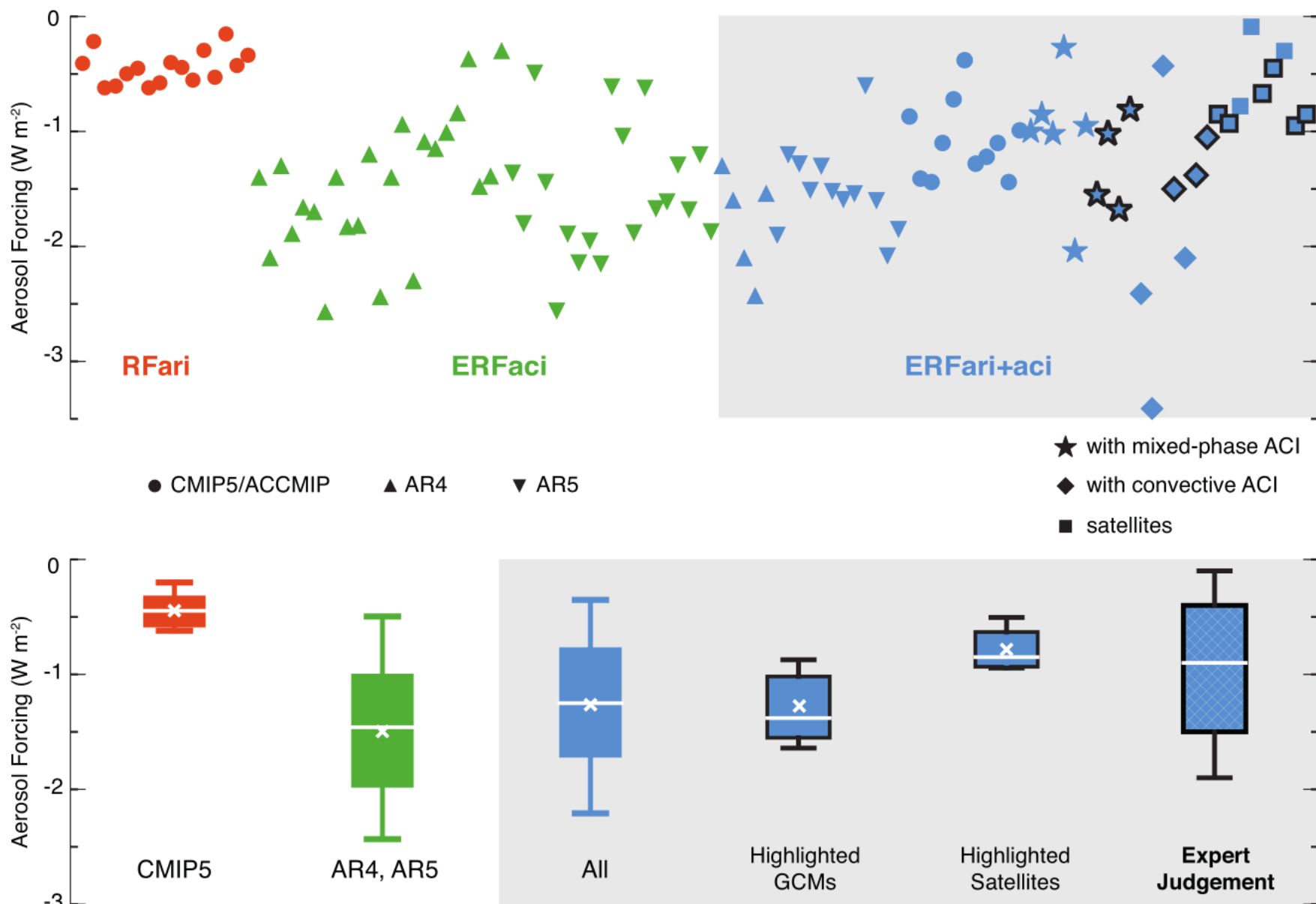
# Was passiert in eisenthaltenden Wolken?

konvektive  
Kräftigung  
(convective  
invigoration)





# Was ist denn nun der Strahlungsantrieb?



# Zusammenfassung

- Viele Prozesse beschrieben, wenige bisher verstanden
- **Aerosol oder Atmosphäre:** oft ist es schwer, den Einfluss meteorologischer Parameter angemessen zu berücksichtigen
- **Einfluss des Menschen:** wie sieht der ungestörte Hintergrund aus?
- **Effekt oder Anpassung:** nichtlineare Zusammenhänge erschweren die Untersuchung
- **CCN/INP statt AOD/AI:** unpassende Parameter werden genutzt
- **warme Wolken** bisher am Besten verstanden; **Twomeyeffekt dominiert**, Anpassungen haben marginalen Effekt
- **eisenthaltende Wolken** sind viel komplizierter; bisher wenig systematische Studien

# Zusammenfassung

Twomey  
RFaci

Wolkenanteil  
Wahrscheinlich  
negative  
Anpassung

Wolkenanteil  
positive  
Anpassung

$$\Delta R = \left( \frac{\partial R}{\partial \ln N_c} + \frac{\partial R}{\partial f} \frac{df}{d \ln N_c} + \frac{\partial R}{\partial L} \frac{dL}{d \ln N_c} \right) \Delta \ln N_d$$

**-1.1 Wm<sup>-2</sup>**

**unbekannt**

**+23%**

[-2.3 to -0.8 Wm<sup>-2</sup>]