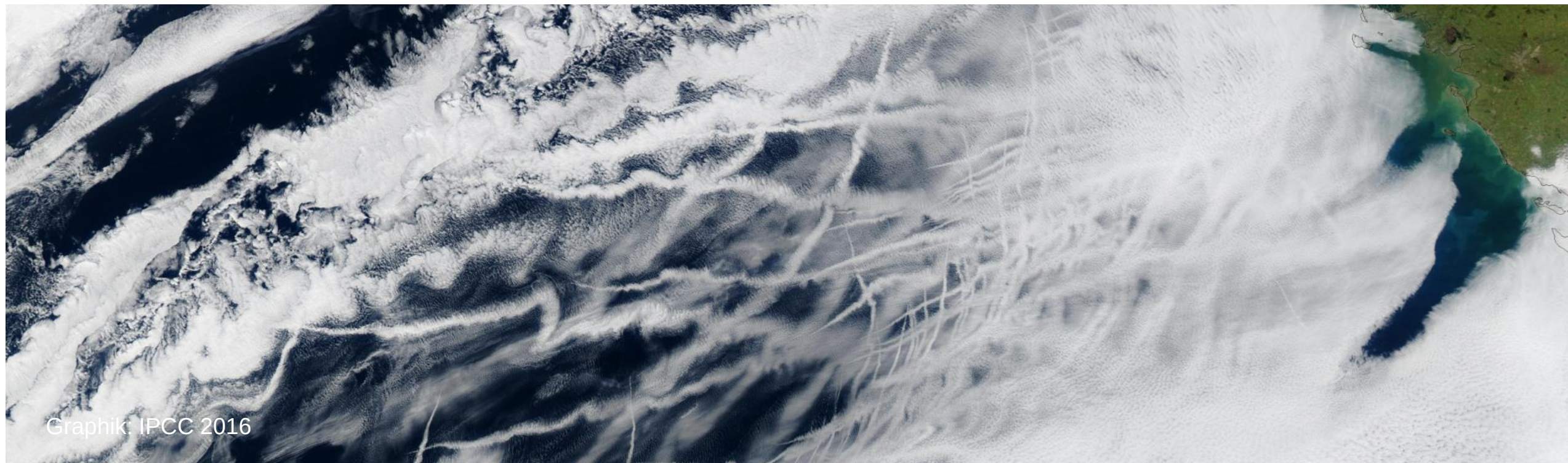


Climate - Engineering

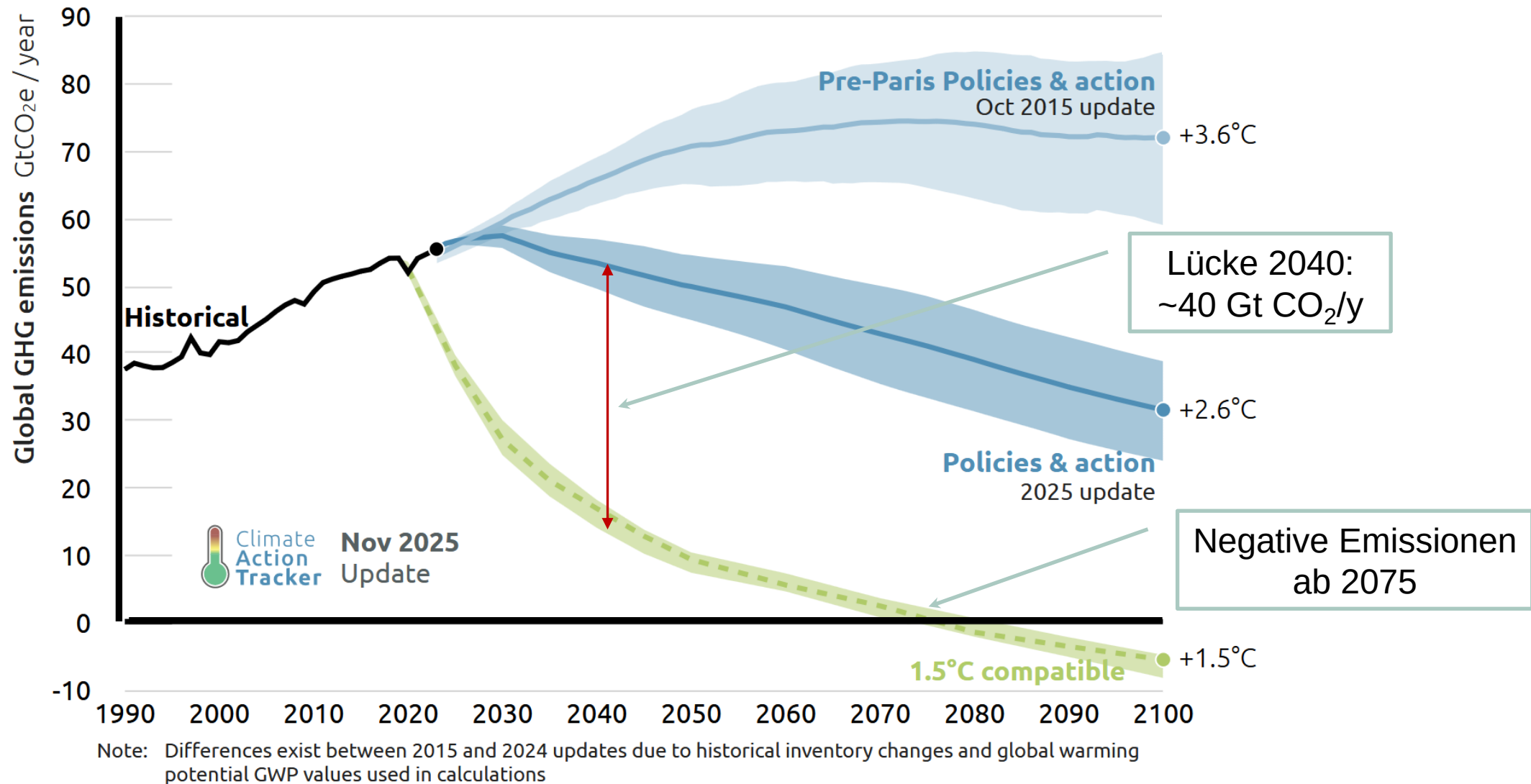
*Prof. Dr. Thomas Leisner,
Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Karlsruher Institut für Technologie*



Graphik: IPCC 2016

GHG und Temperatur- Szenarien bis 2100

Der Effekt des Paris- Abkommens



Die öffentliche Diskussion zu technischen Ansätzen zur Klimakontrolle nimmt Fahrt auf

The Guardian

We don't need 'miracle' technologies to fix the climate. We have the tools now

Mark Z Jacobson

Some want to ban vital geoengineering research. This would be a catastrophic mistake

Craig Segall and Baroness Bryony Worthington

We've already geoengineered the planet through the careless release of greenhouse gases. Now we need a plan to manage the risks we've set in motion



WARNSIGNAL KLIMA

**Hilft Technik
gegen die Erderwärmung?**

Climate Engineering in der Diskussion



Hrsg.: J. L. Lozán • H. Graßl • S.-W. Breckle • D. Kasang • M. Quante

Aktuelle Aktivitäten in der Forschung



Congressional Research Service
Informing the legislative debate since 1914

Solar Geoengineering and Climate Change

NOAA and the National Science Foundation (NSF) are directed to develop a five-year research plan, with a scientific assessment of solar and other rapid climate interventions in the context of near-term climate risks and hazards.



28. 2. 2023: The **Centre for Climate Repair at Cambridge** and **Refreeze the Arctic Foundation (RAF)** signed a multi-year agreement to fund research methods for brightening clouds to combat climate change.

SUMMARY

R47551

May 9, 2023



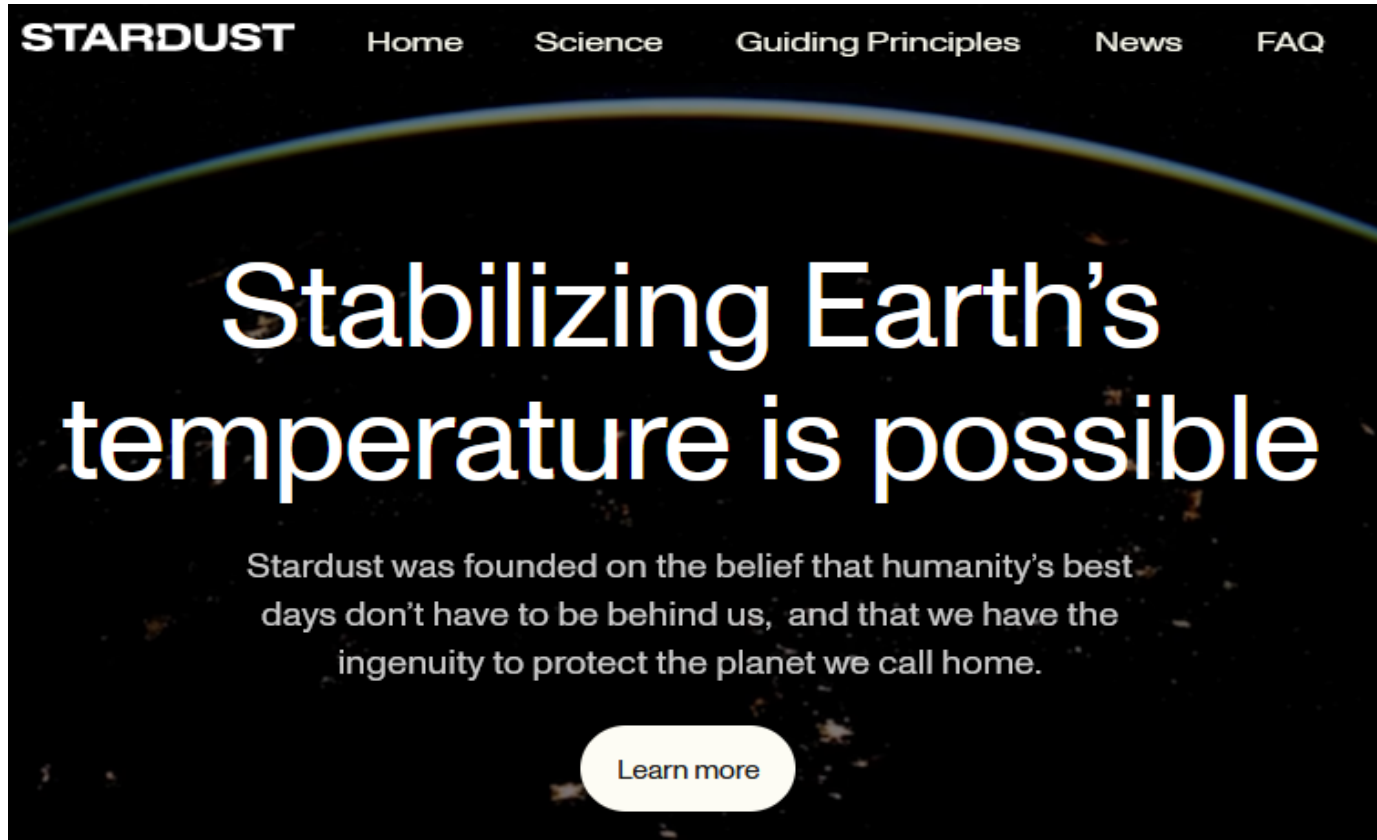
Flagship project
**Radiation management
for Climate Engineering**
6 new professors in 2022



SIMONS FOUNDATION

March 2023: The Simons Foundation's Mathematics and Physical Sciences (MPS) division invites applications for a new Solar Radiation Management program (\$50Mio funding).





Stardust's current R&D results on technology enabling a complete, safe, controllable, and practical Sunlight Reflection Technology (SRT)

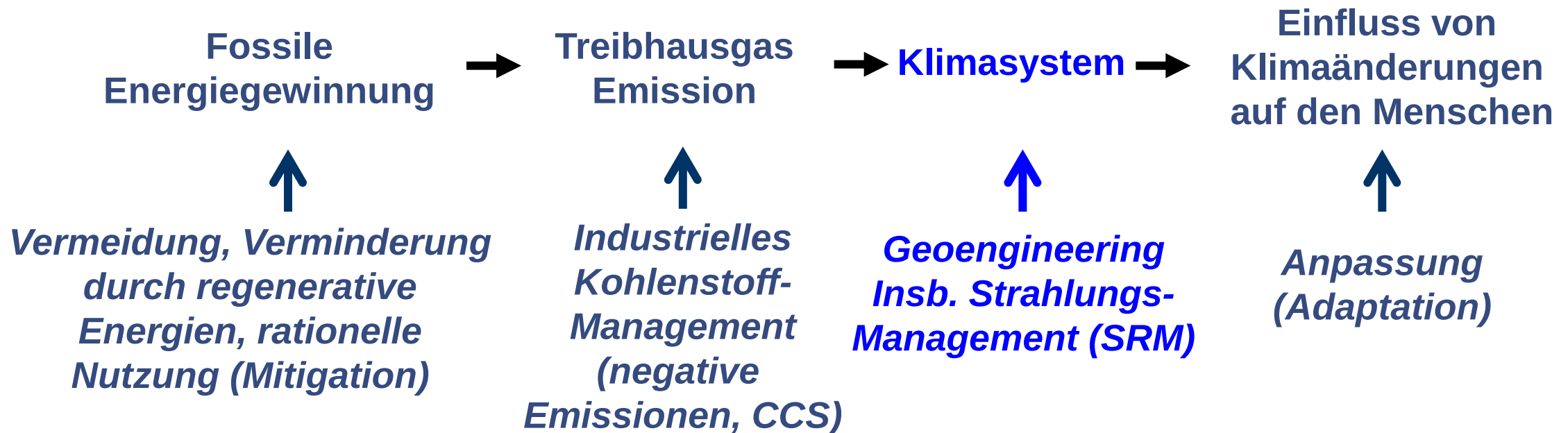
Stardust Solutions konnte in zwei Finanzierungsrunden 2024 und 2025 bisher 75 Mio. US\$ akquirieren.

Einstieg in Feldtests ist geplant.

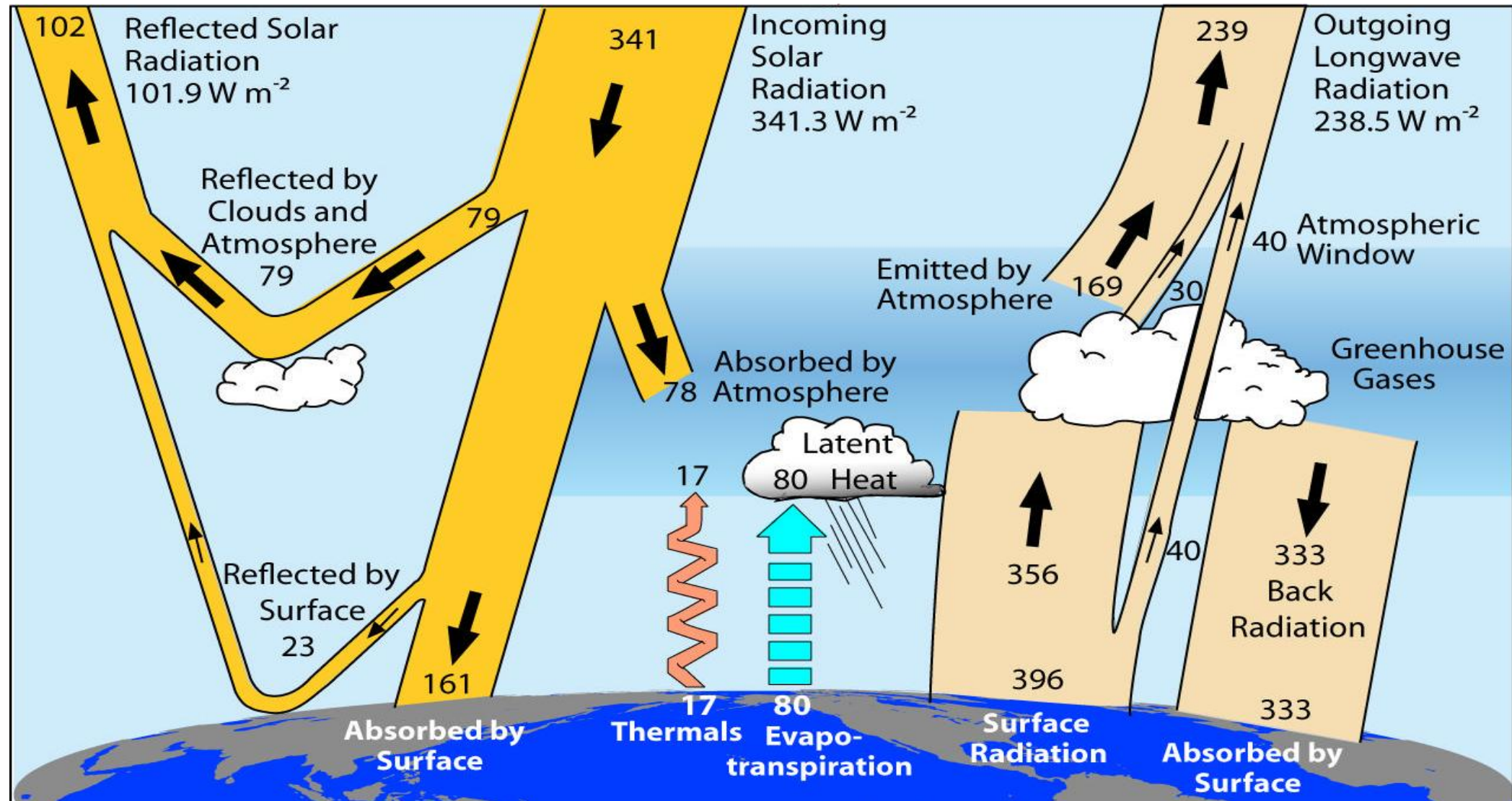
Definition Climate Engineering

(Geoengineering, Climate Intervention, Climate Management)

Absichtliche, großskalige Manipulation der Umwelt, um unerwünschten Effekten des anthropogenen Klimawandels entgegenzuwirken (Keith, 2000):



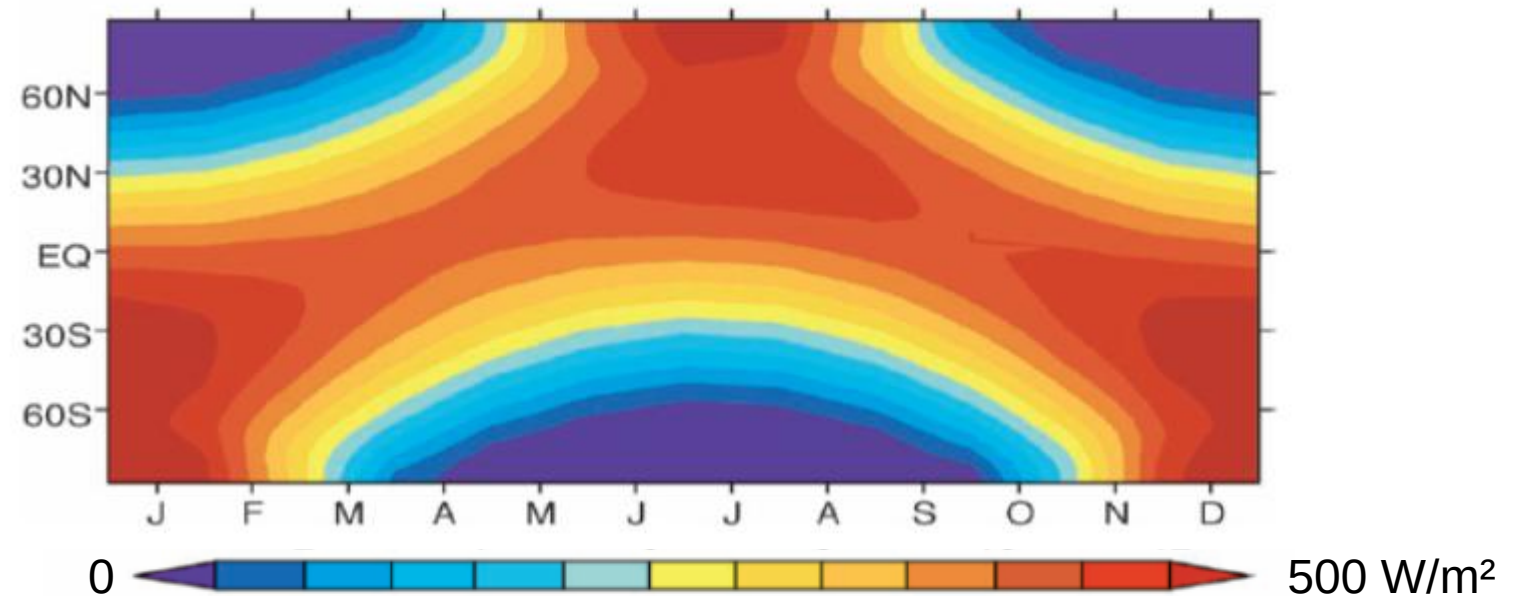
Das Energiebudget der Erde



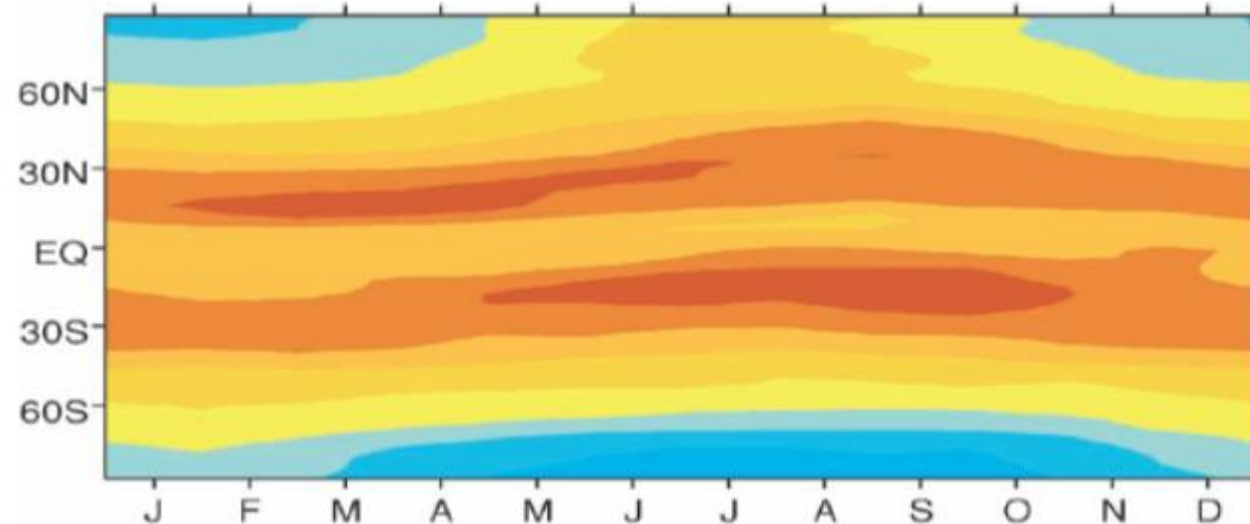
Raumzeitliche Verteilung der Energieströme

Einfallende Sonnen-
energie

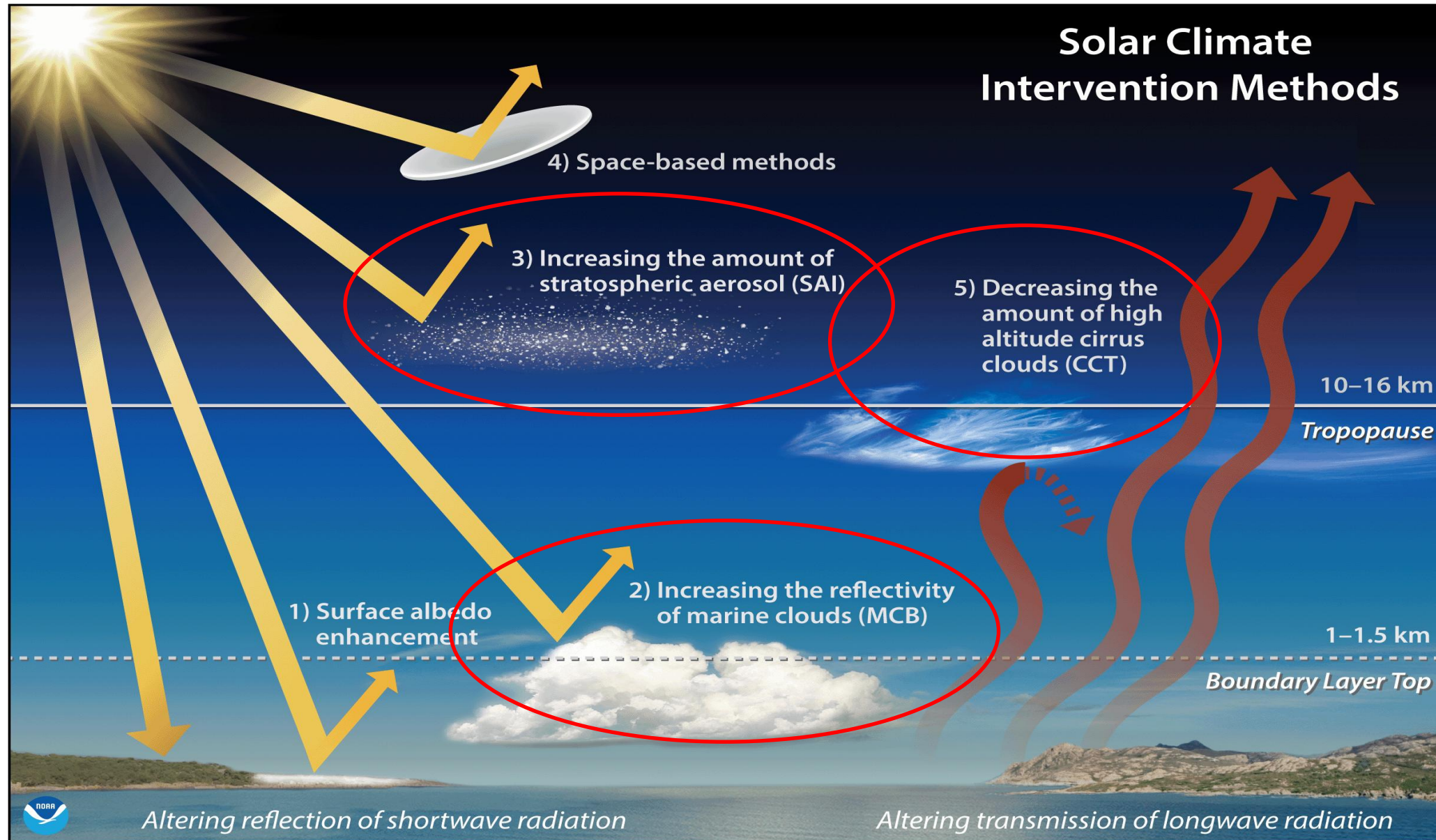
Govindasamy et. al.
Global and Planetary
Change 37 (2003) 157–168



Ausgehende
Wärmestrahlung



Mögliche Methoden des Climate Engineering



Mt. Pinatubo, 12.6.1991
20 Mt SO₂ in eine Höhe von 35km



Erste Abschätzungen (2006, Budyko, Keith, Crutzen)

- 5Mt S/a kann eine CO₂ Verdopplung kompensieren.
- Dies entspricht „nur“ etwa 10% der damaligen anthropogenen Schwefel - Emissionen.
- Kosten: ~einige Mrd. € pro Jahr mit existierenden Flugzeugen (KC-135 Strato) max. Flughöhe 15km.
- Potential: >10 W/m²

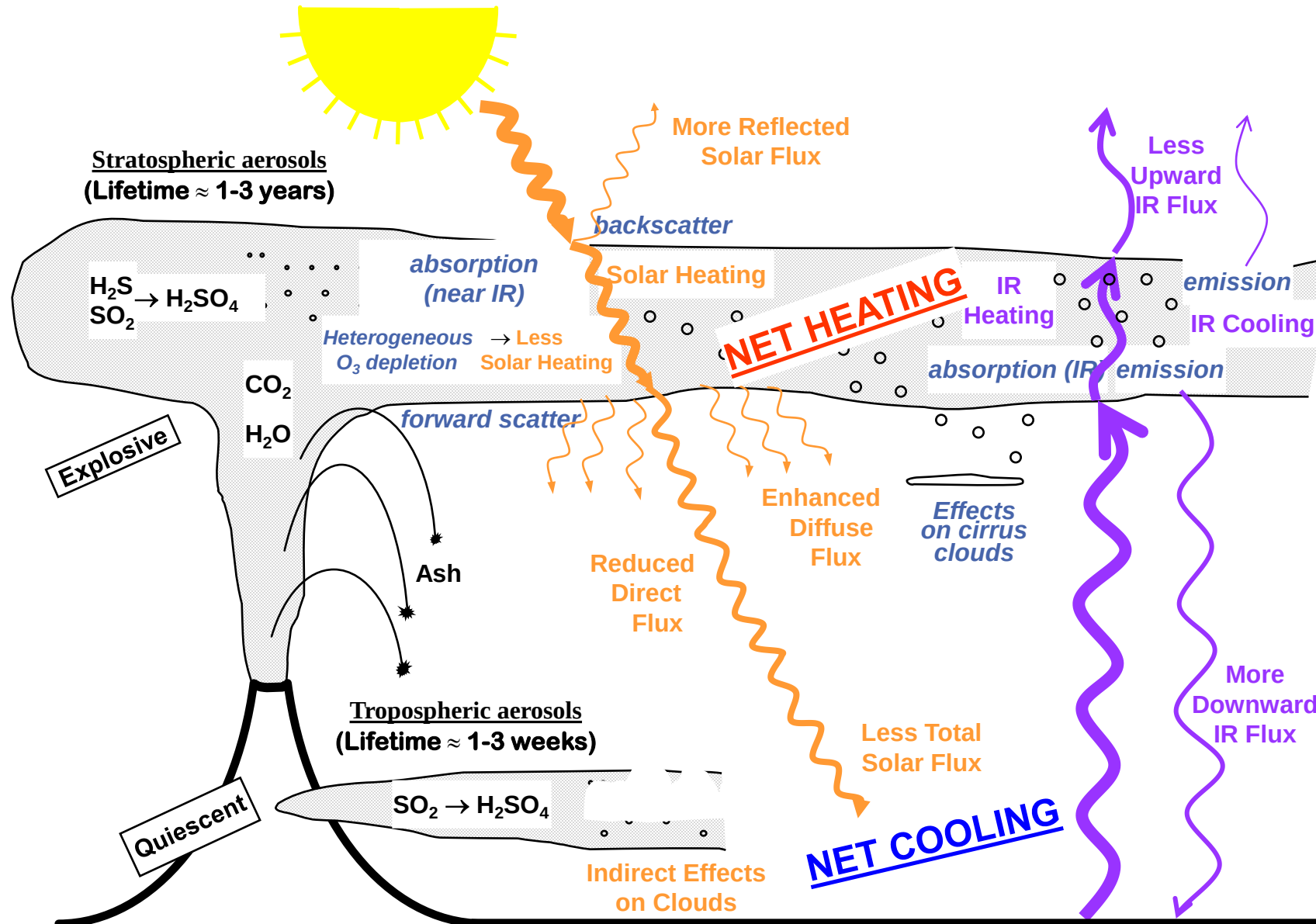
before



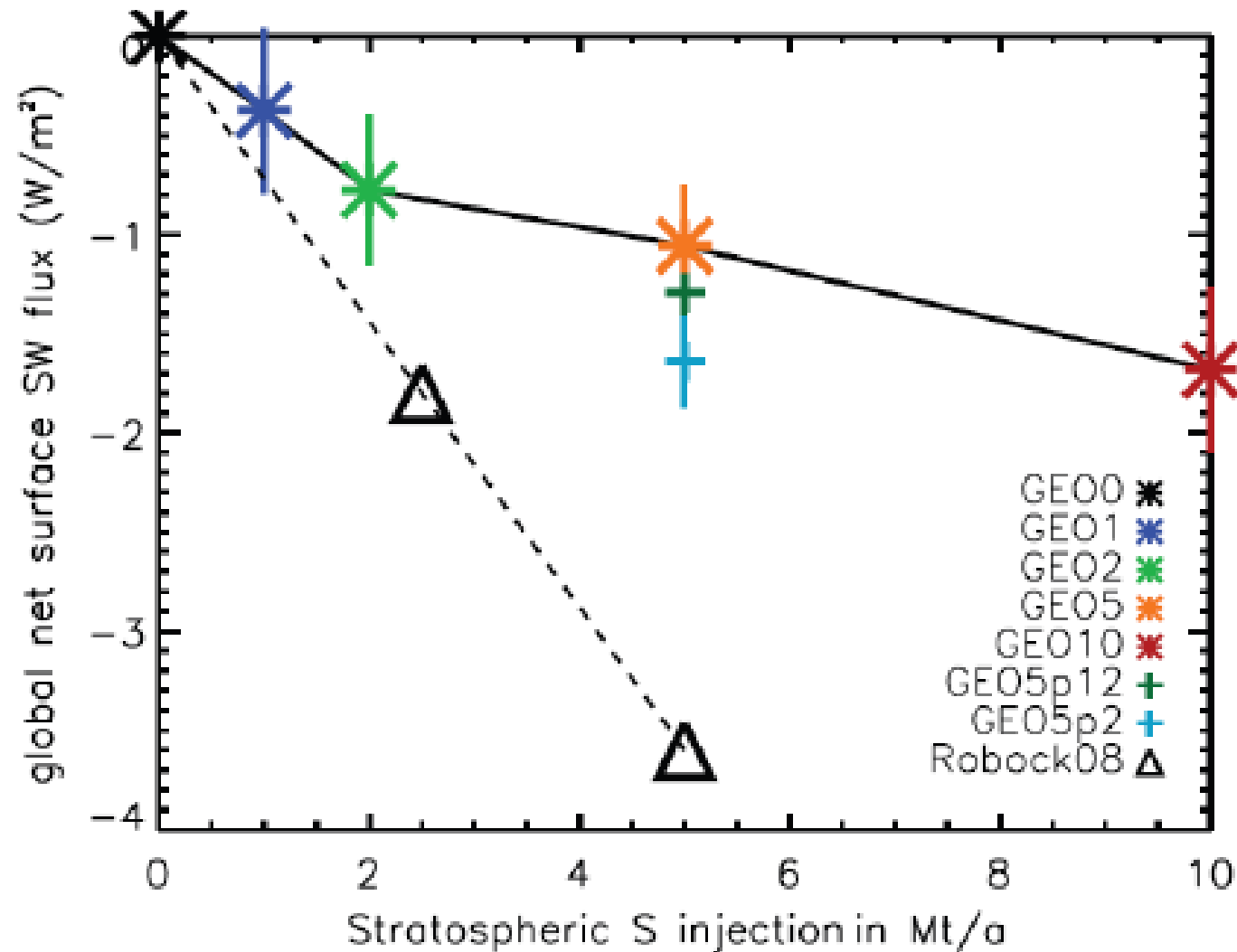
after



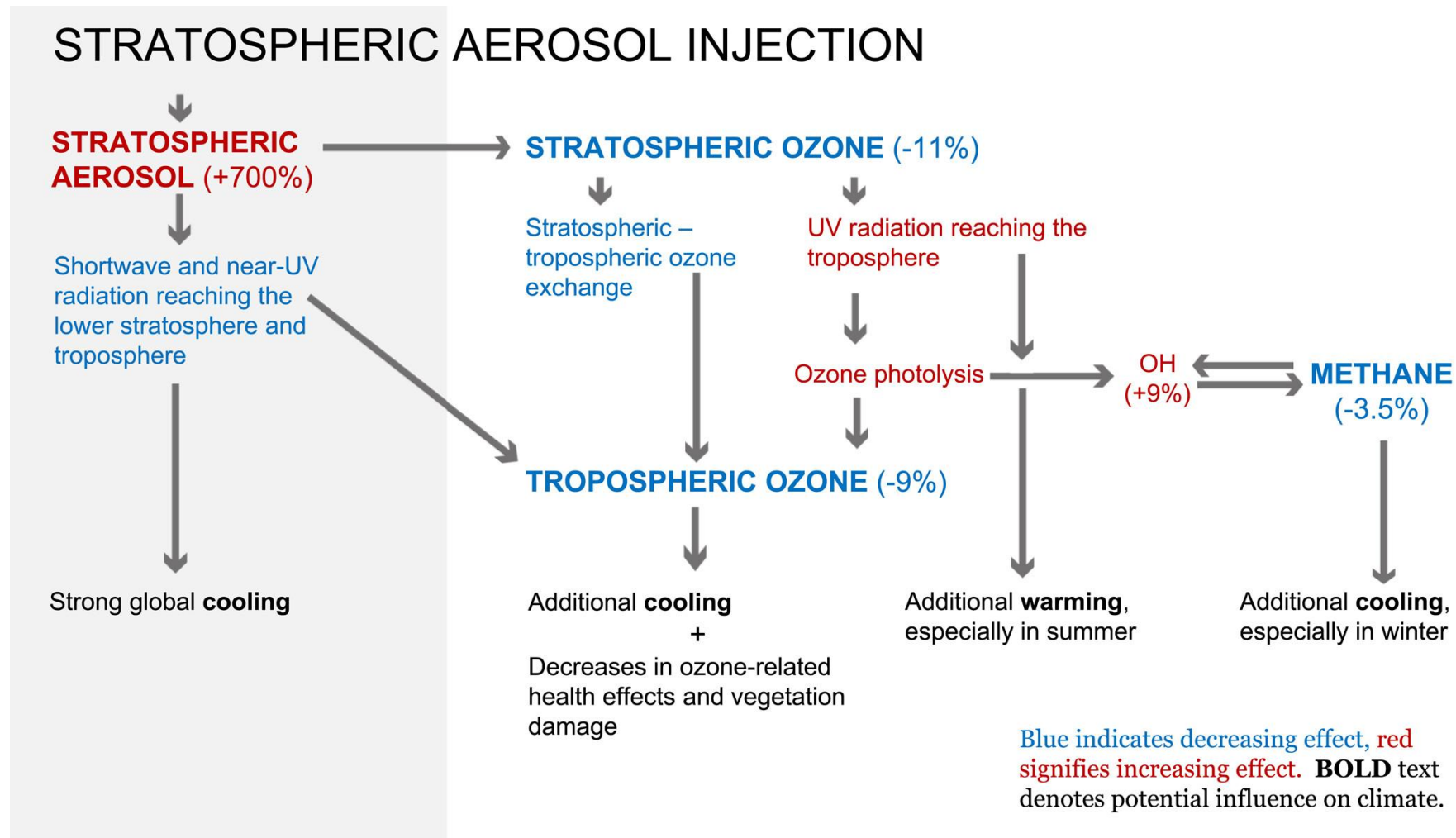
Nebenwirkungen von Schwefelsäure- Eintrag in die Stratosphäre



Der Teufel steckt im Detail 1

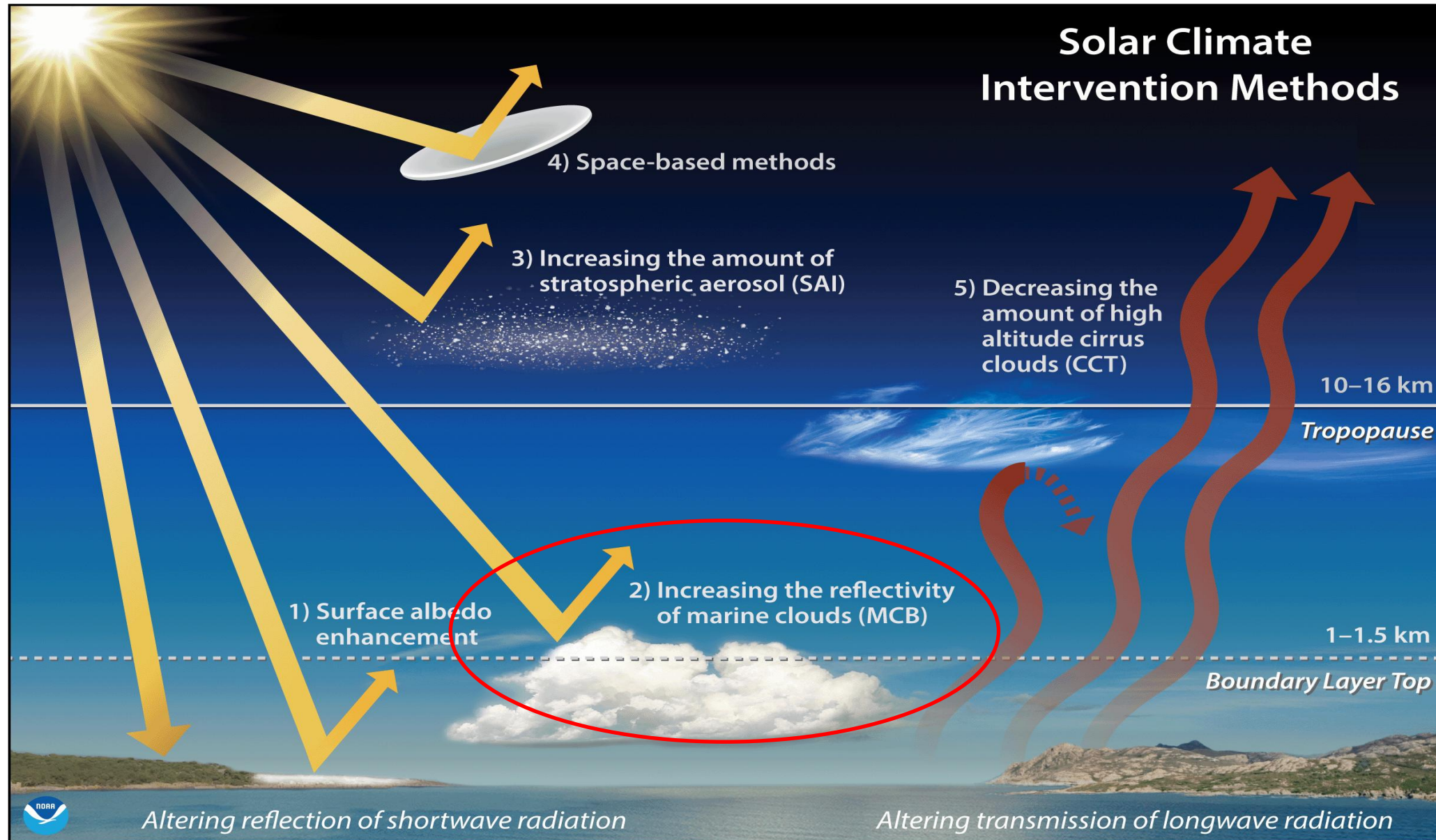


Der Teufel steckt im Detail 2

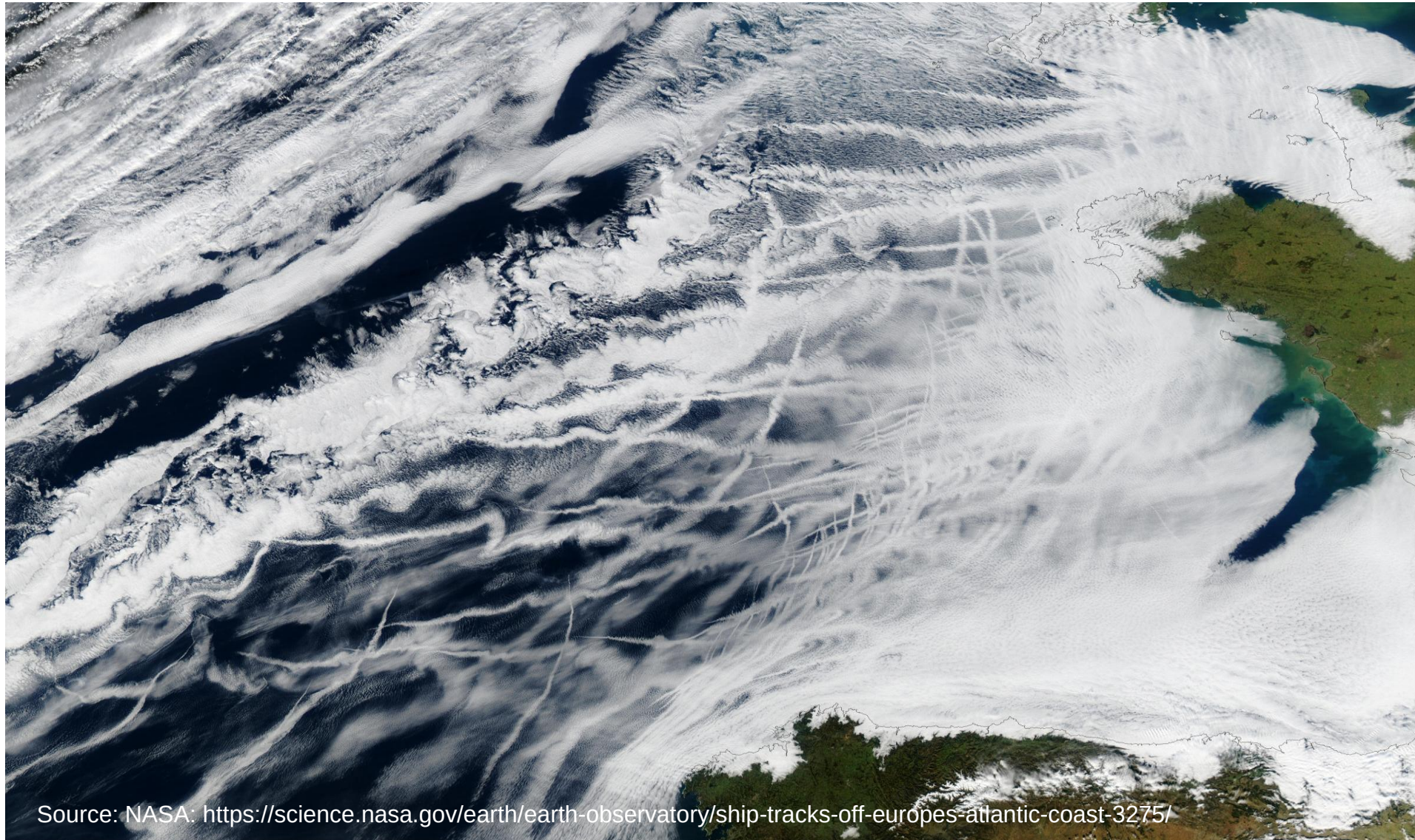


J. Moch et al., AGU Advances, Volume: 4, (2023) , doi: 10.1029/2023AV000911

Mögliche Methoden des Climate Engineering



Wolkenaufhellung durch Aerosoleintrag



Prinzip des Wolkenaufhellens

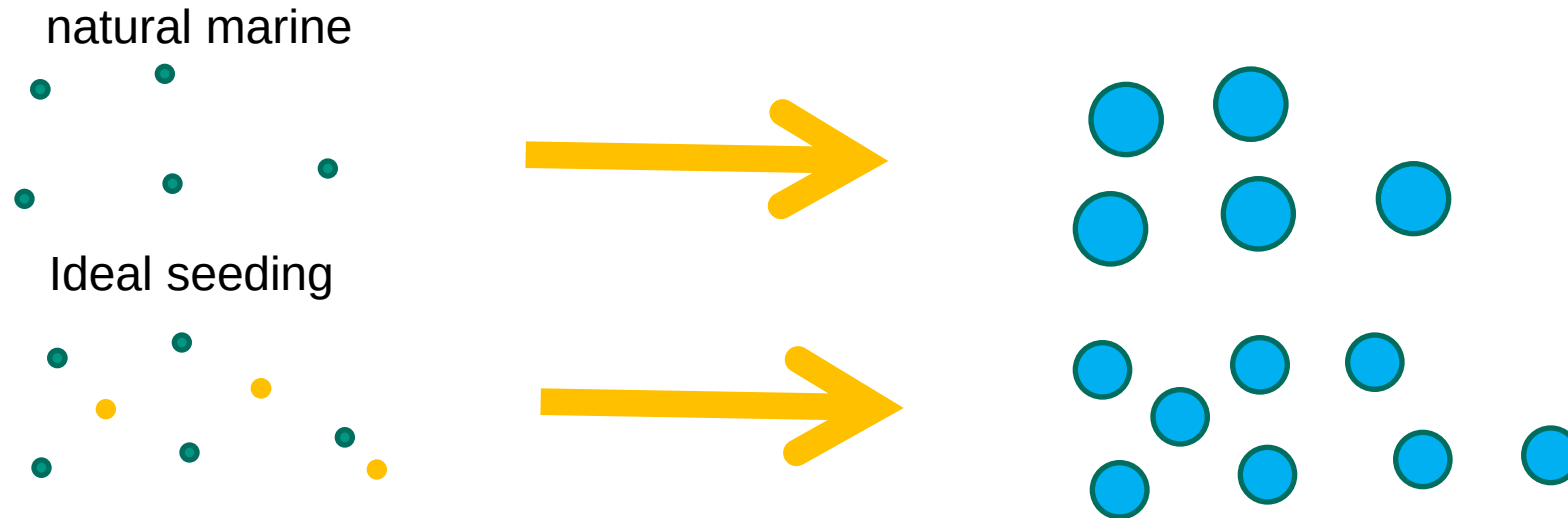
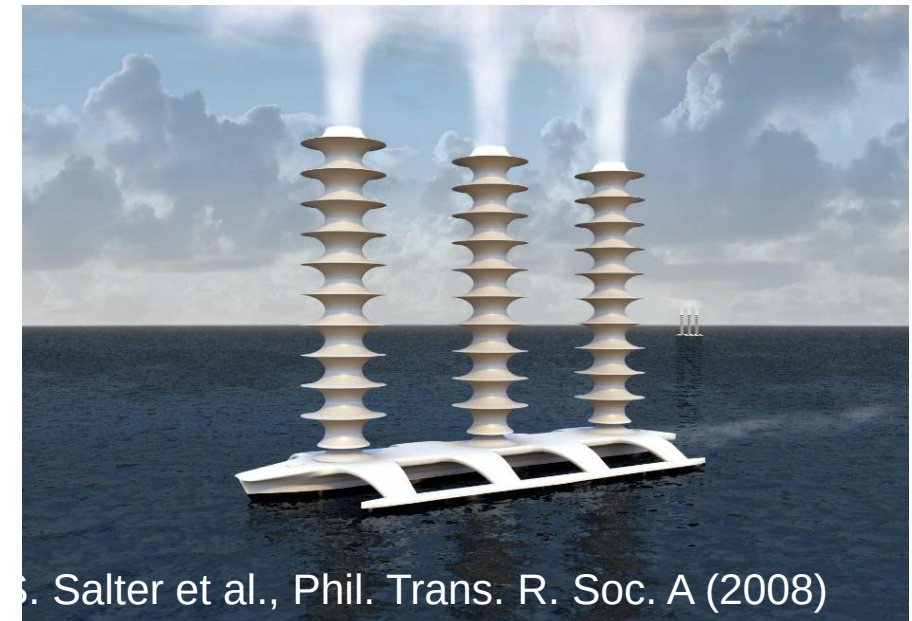


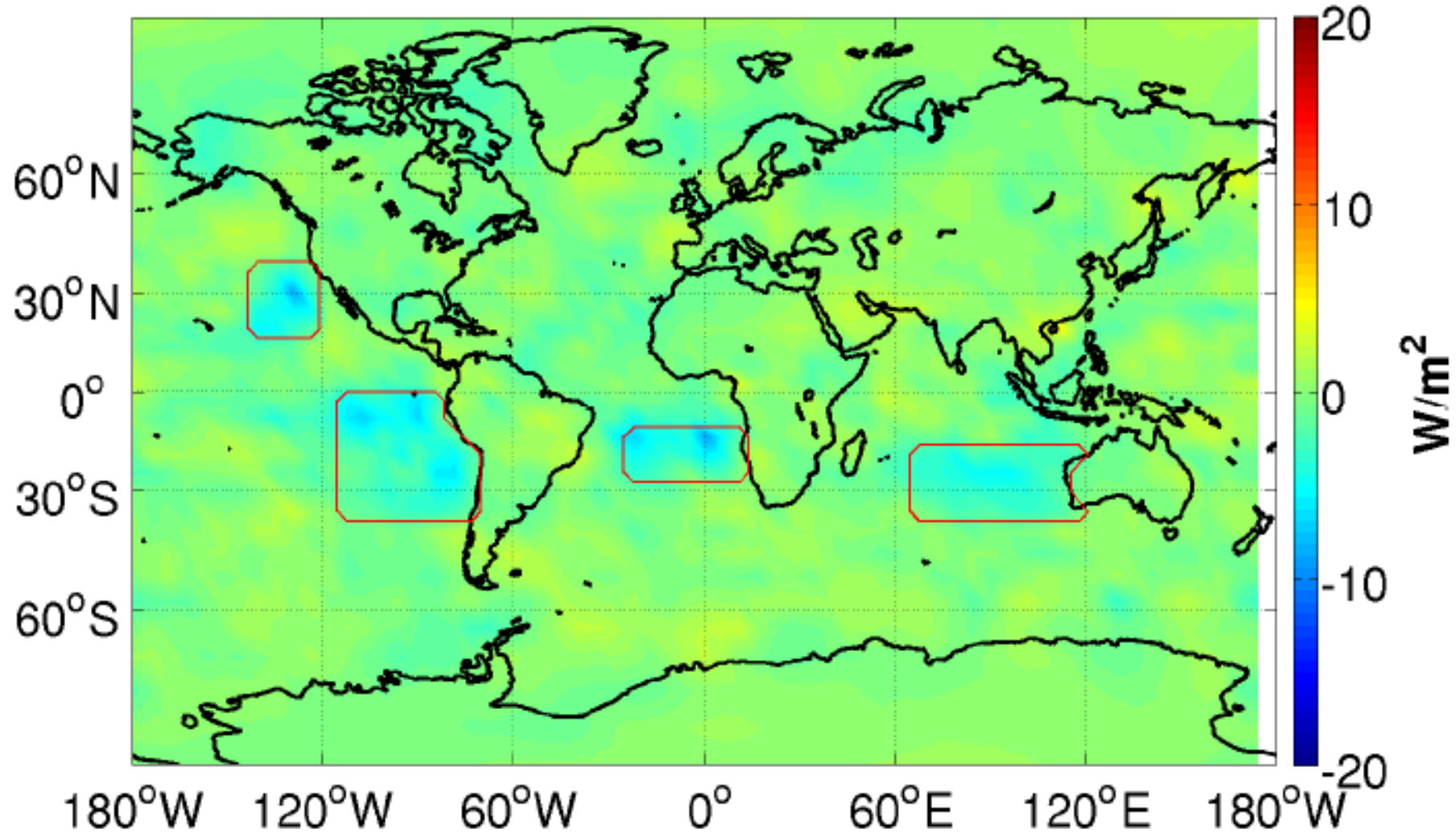
Image: S. Salter

Diese Methode hat das Potential die aus einer Verdopplung von CO_2 resultierende globale Erwärmung (3.7 W/m^2) zu kompensieren. S. Salter (2008)



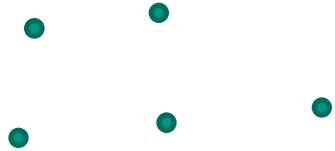
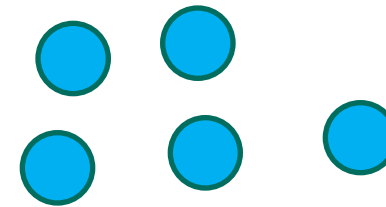
S. Salter et al., Phil. Trans. R. Soc. A (2008)

Mögliche Regionen für das Wolkenauflösen

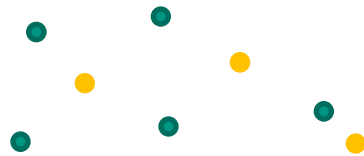
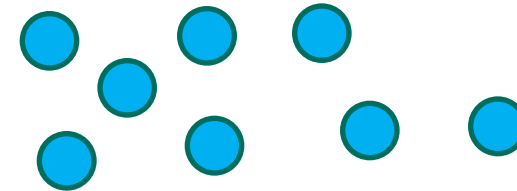


Der Teufel steckt im Detail

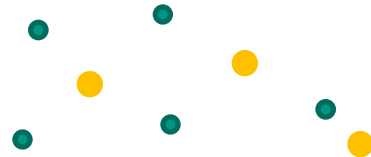
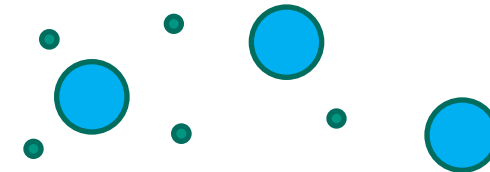
Natürliche Wolkenkeime



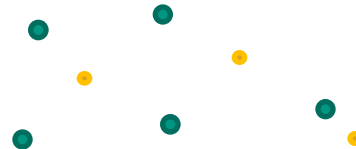
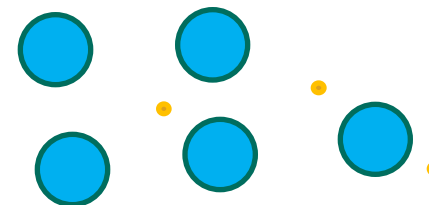
Ideales Impfen



Impfkeime zu groß

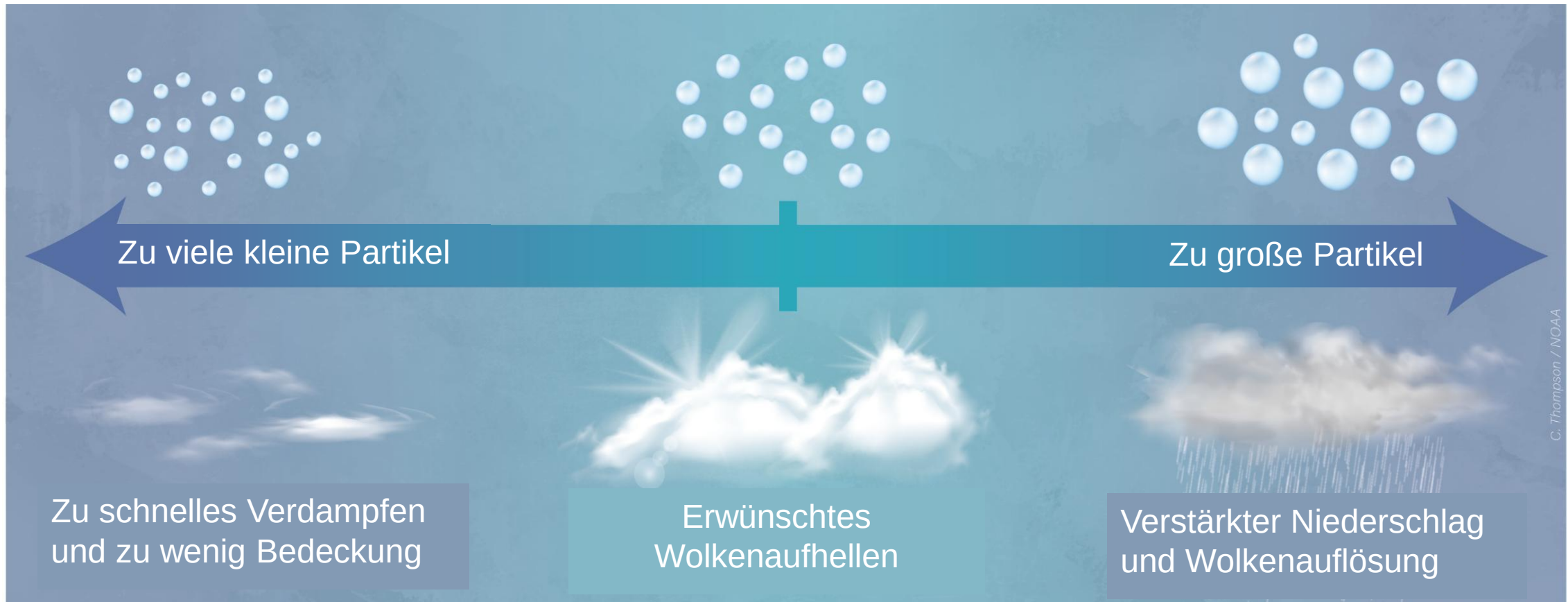


Impfkeime zu klein



Der Teufel steckt im Detail

Der Effekt von Impfpartikel-Anzahl und Größe



Hoffmann & Feingold JAS 2021, Graphik: NOAA (adaptiert)

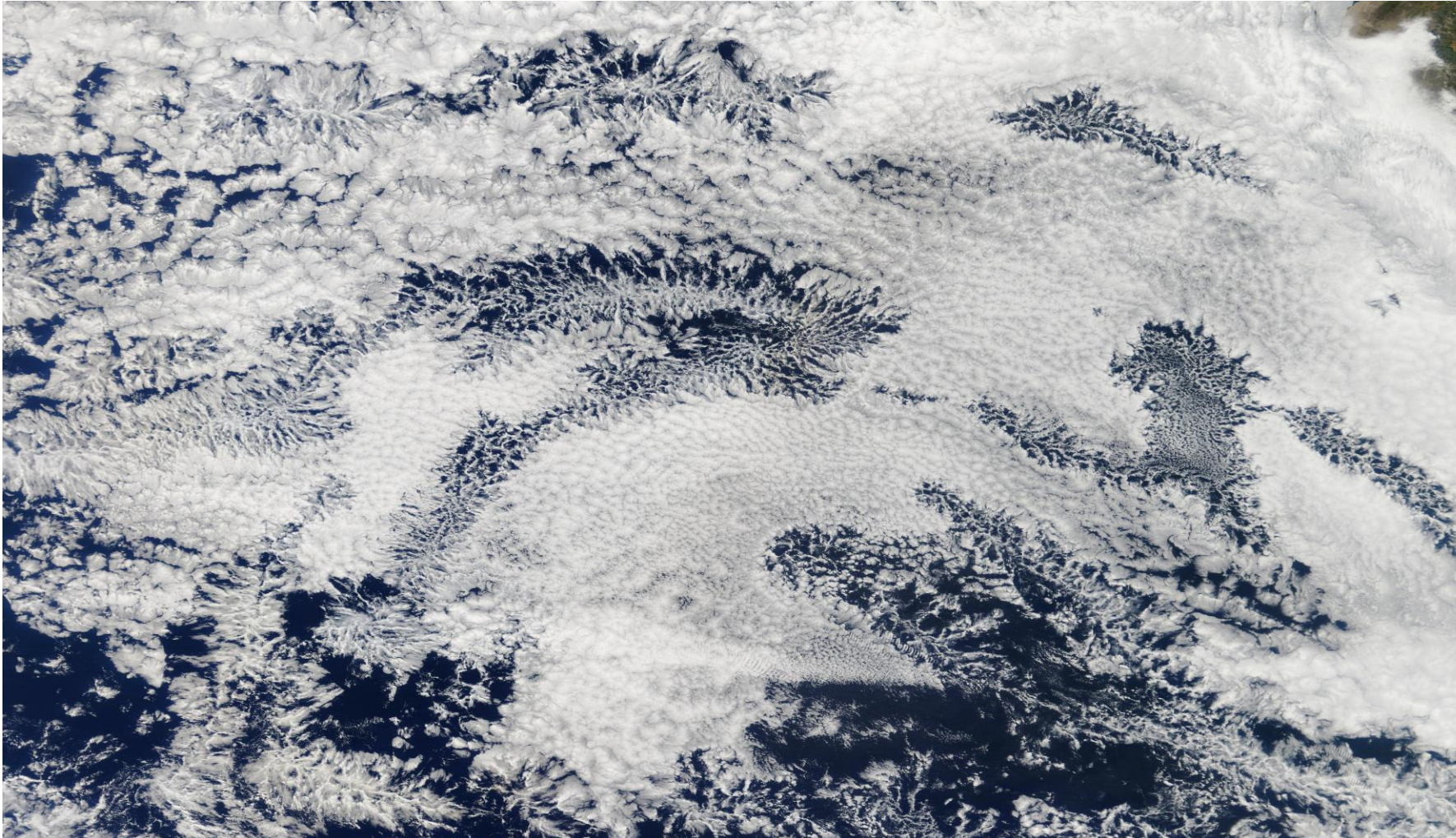
Der Teufel steckt im Detail

Beeinflussung der Wolkendynamik

Offen- und
geschlossen-
zelliger
Stratokumulus
westlich von
Peru.

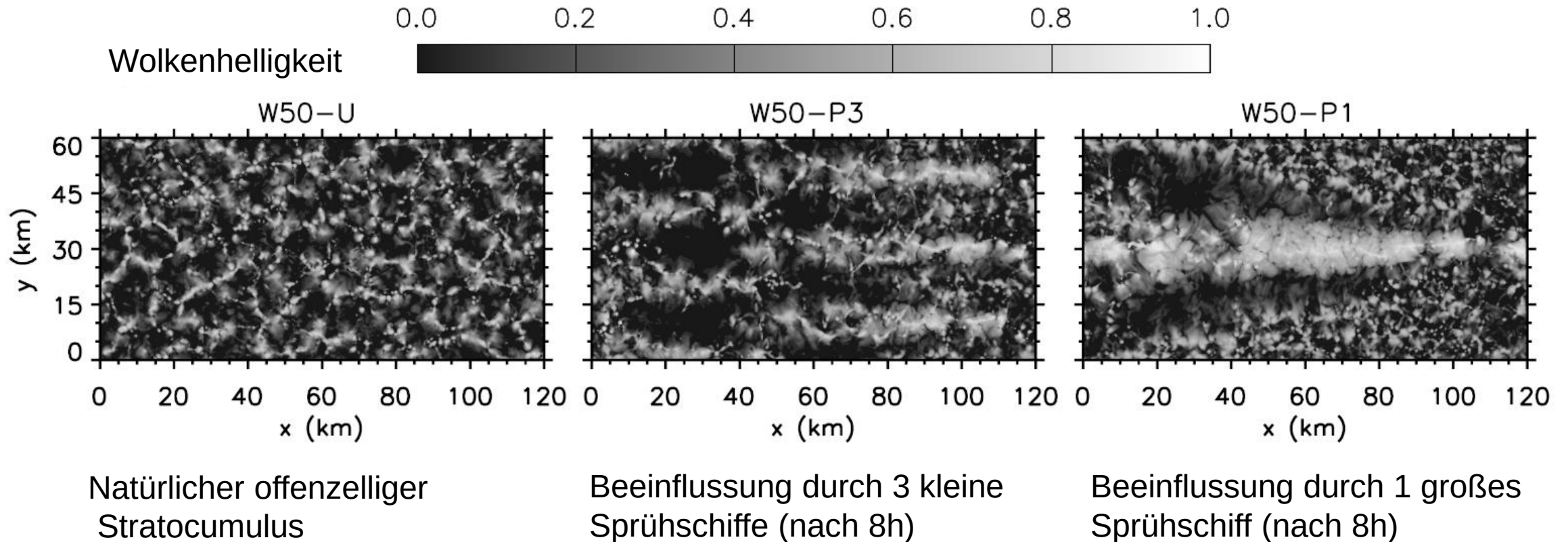
Bild: NASA

<https://science.nasa.gov/earth/earth-observatory/portholes-through-the-clouds-92459/>



Der Teufel steckt im Detail

Beeinflussung der Wolkendynamik



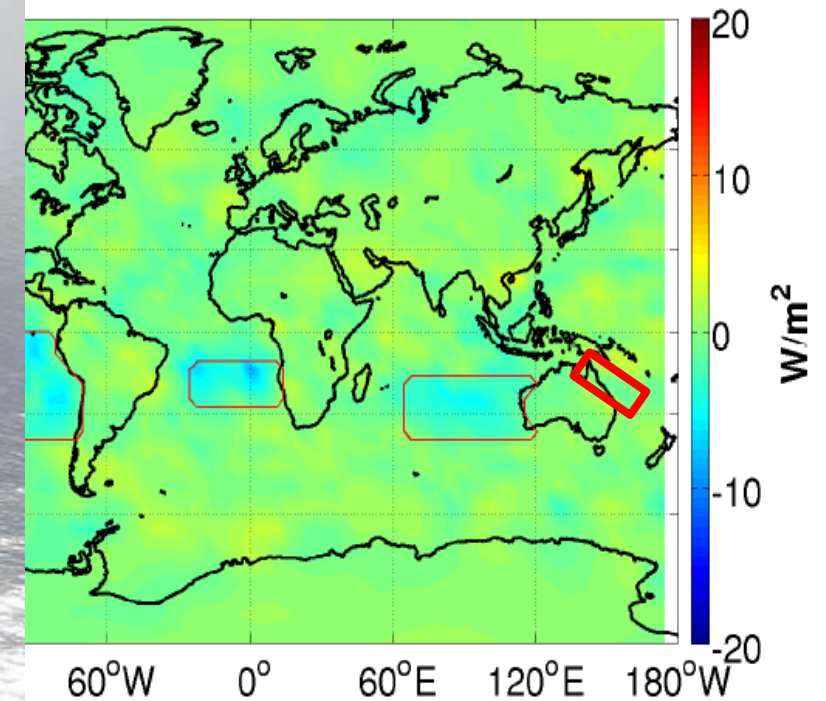
H. Wang et al. ACP 2011

SPIEGEL Wissenschaft

28.09.2021, 17.15 Uhr

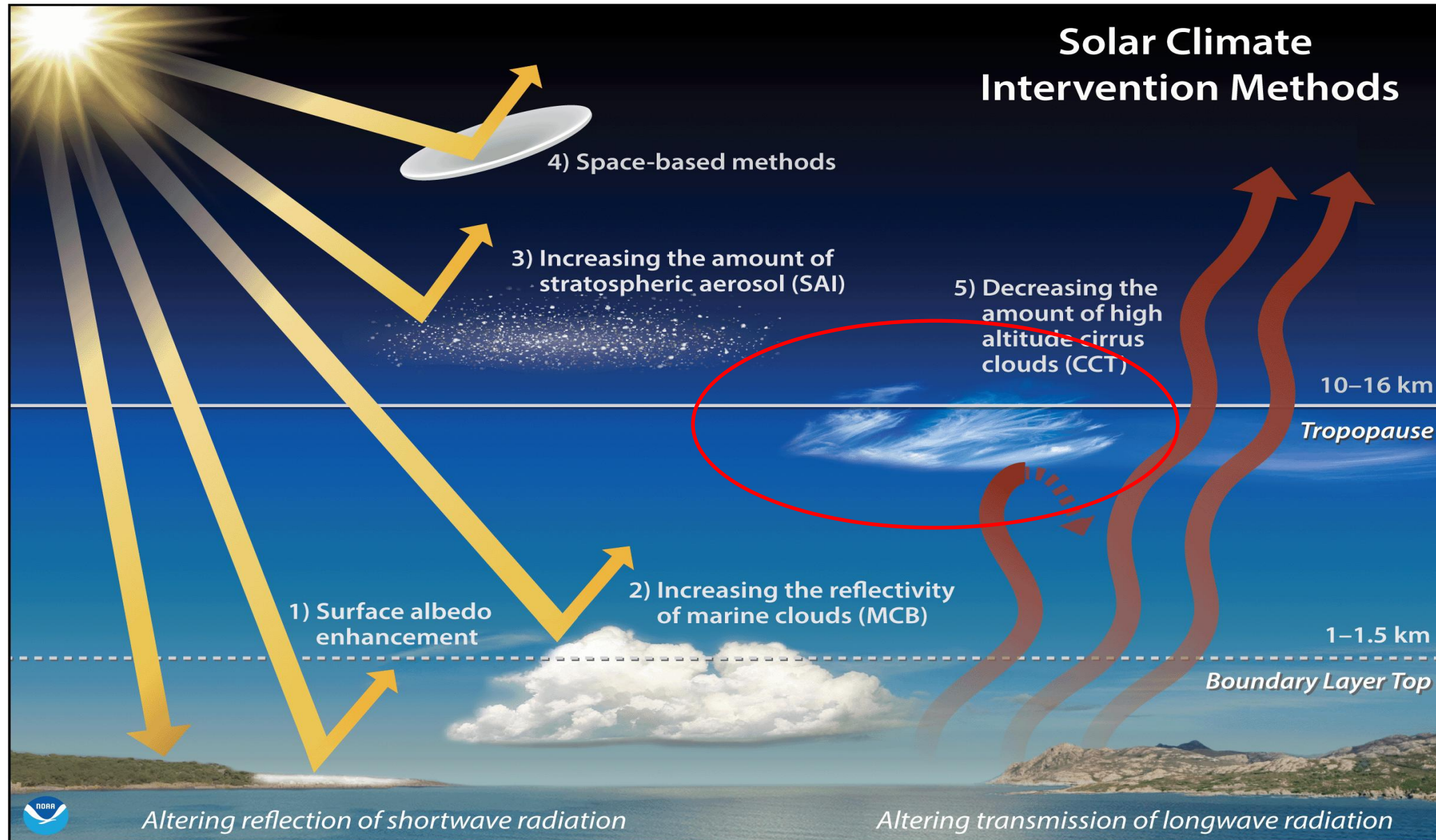
Great Barrier Reef vor Australien

Wie Wolkenmacher die Korallen retten wollen



Source Nature, 2021

Mögliche Methoden des Climate Engineering



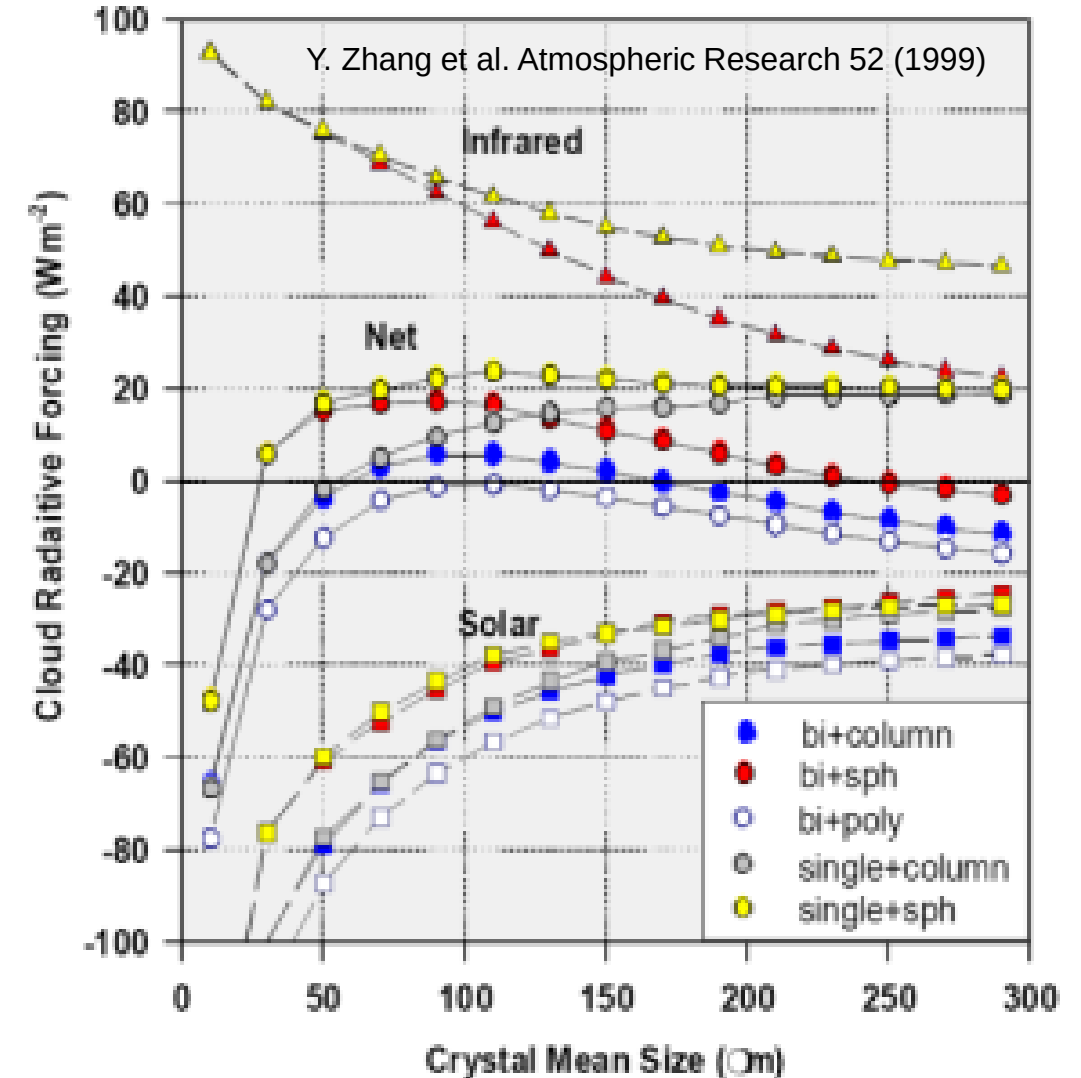
Climate Engineering mit hochliegenden Zirrus- Wolken

Zirrus-Bewölkung hat einen stark wärmenden Einfluss ($\sim 22 \text{ W/m}^2$ global) durch Absorption der ausgehenden Wärmestrahlung und einen ähnlich großen ($\sim 17 \text{ W/m}^2$ global) abkühlenden Effekt durch Reflektion der Sonneneinstrahlung.

Könnte man die Zirrus-Bewölkung nur über den Polargebieten im polaren Winter entfernen, so ergäbe sich ein stark kühlender Effekt, da in der Polarnacht nur der erwärmende Effekt der Zirren zum Tragen kommt.

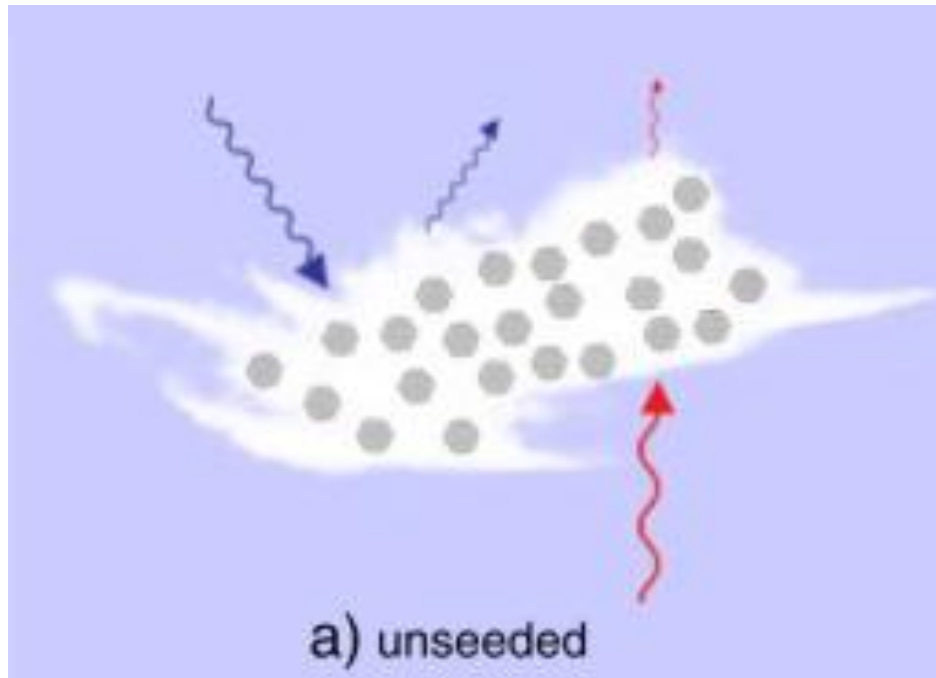
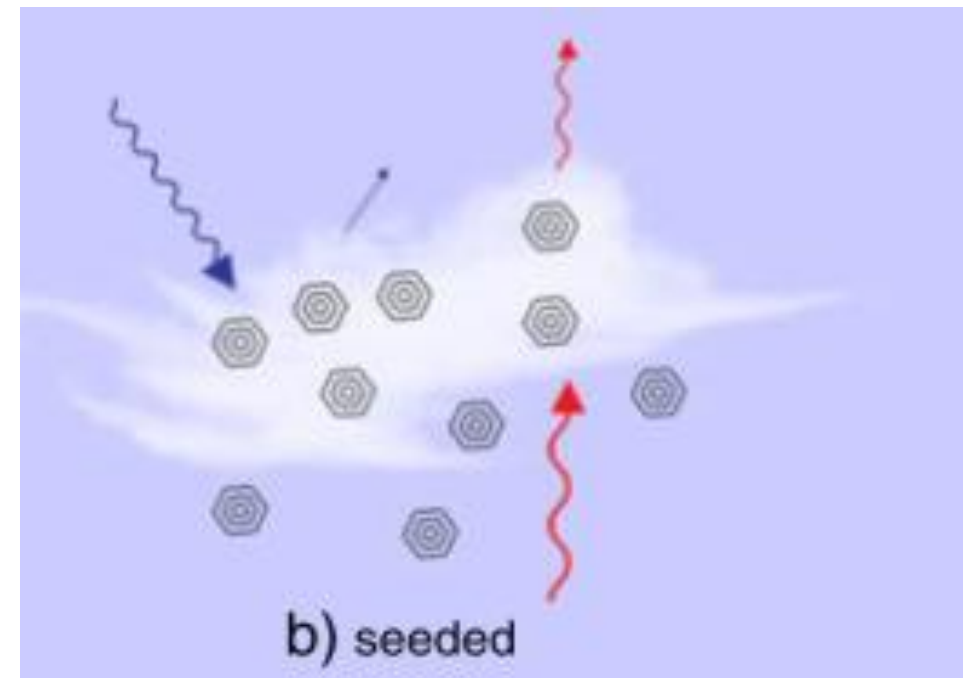
Dieser Effekt würde durch die Rückkopplung mit dem Meereis noch verstärkt werden und würde eine Region kühlen, die sich besonders stark erwärmt.

Storelmvo et al. Phil. Trans. R. Soc. 372, 2014



Zirrus- Wolken Entstehung

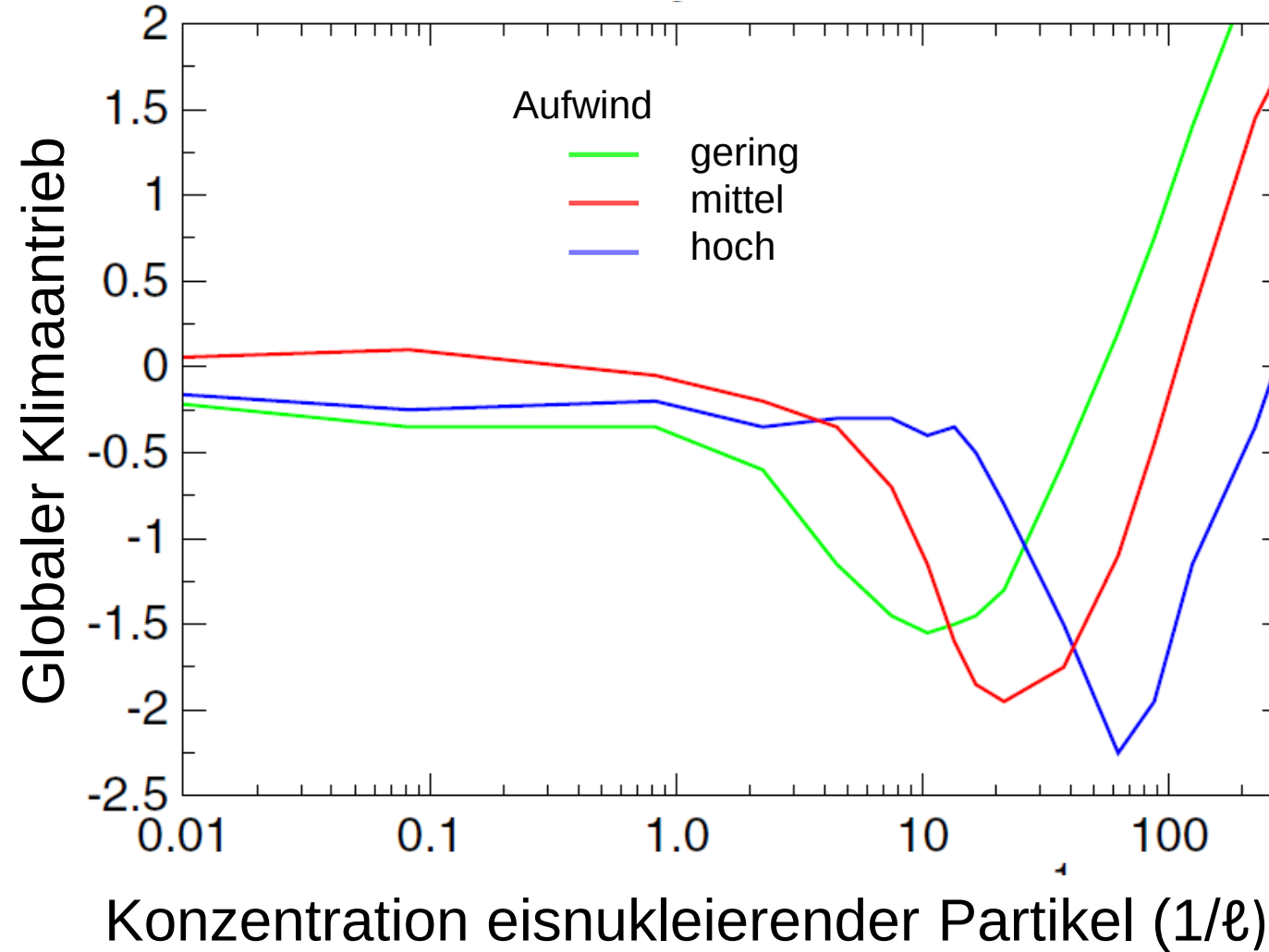
Zirren entstehen durch Gefrieren von sehr kleinen unterkühlten Salzlösungs-Tröpfchen, die dann stark anwachsen. Dieses Gefrieren kann durch Eiskeime (künstlich) befördert werden. In diesem Fall entstehen Zirren, die aus weniger aber größeren Eispartikeln bestehen die schneller absinken.



after Storelvmo et al., 2013

Klimaantrieb des Zirrus – Impfens in einem globalen Modell

Storelmvo 2013

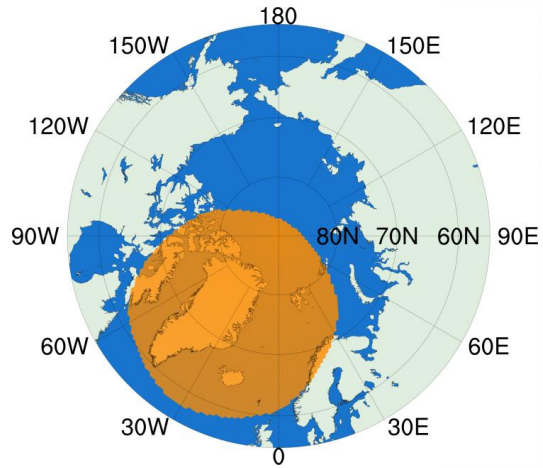


Der Teufel steckt im Detail

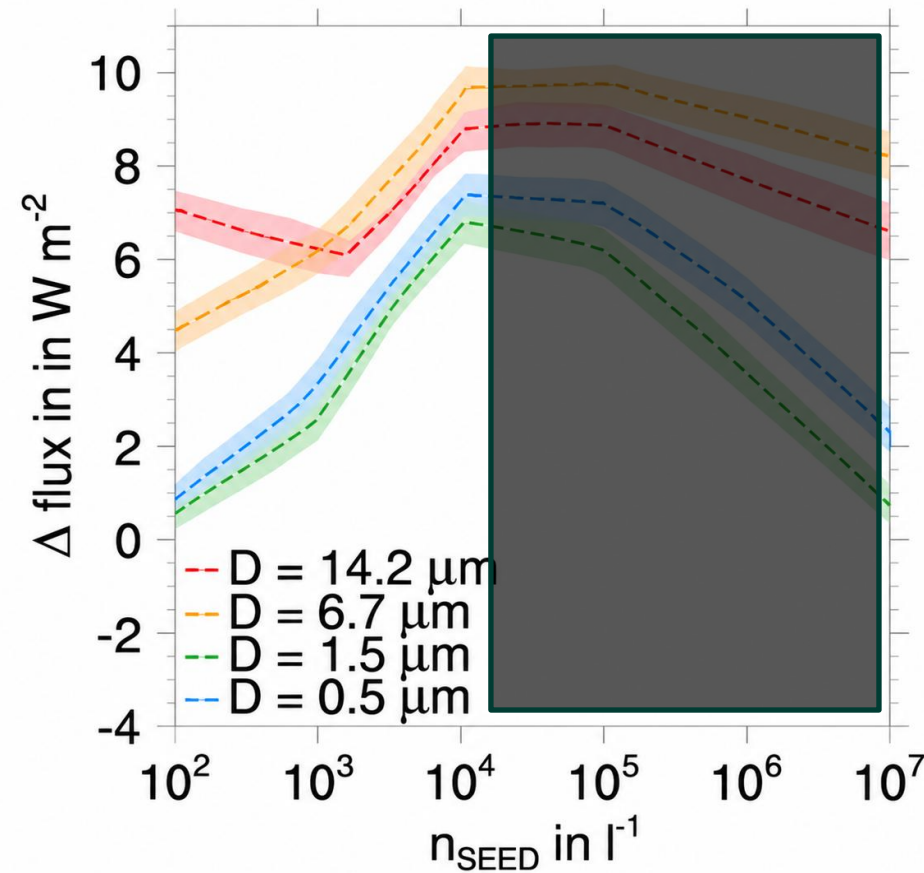
Zirrusreduktion in (globalen) Modellen – eine Zeitreihe

- Starkes Abkühl-Potential (unter vereinfachten Annahmen): 2 - 3 W/m² (Storelvmo et al., 2013)
- ‘Overseeding’: zu viel zusätzliche Eiskeime können auch eine Erwärmung auslösen (Storelmvo 2014)
- Keine Abkühlung mit verbesserter Eisphysik (Penner et al., 2015)
- Keine Abkühlung wenn das Verdampfen der Eiskristalle besser berücksichtigt wird (Gasparini and Lohmann, 2016)
- Keine Abkühlung da gleichzeitig Flüssigwasser- Wolken tiefer unten beeinflusst werden. (Gasparini et al., 2017)
- Signifikante Abkühlung über der winterlichen Arktis möglich (Gruber et al. 2019)
- Keine signifikante Abkühlung bei Seeding über der winterlichen Arktis (Tully et al. 2022)

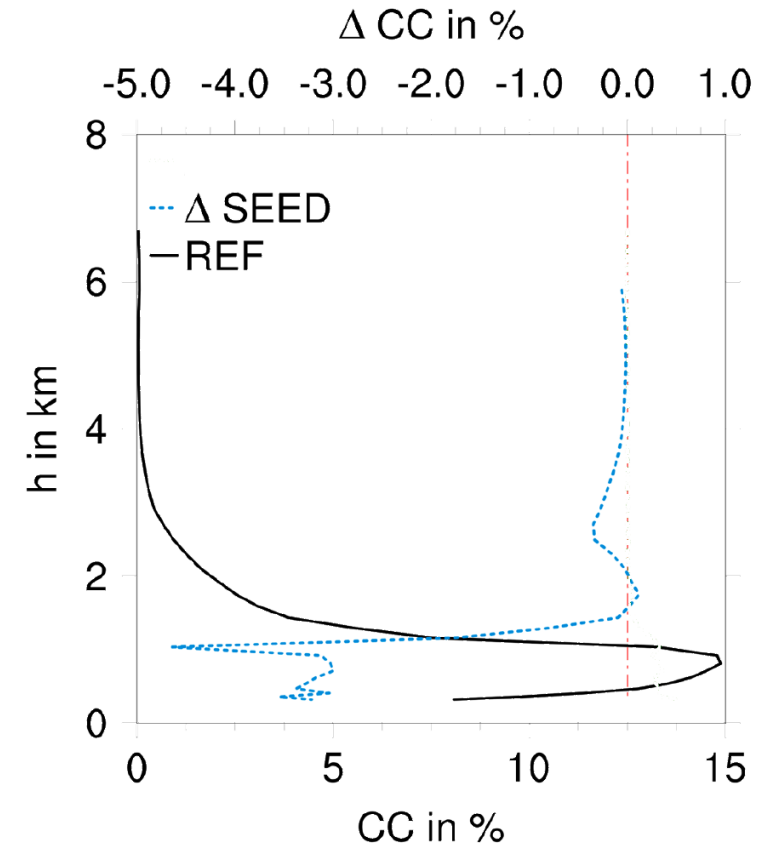
Der Teufel steckt im Detail: Simulationen mit dem regionalen prozessauflösenden Modell ICON-ART (20. Jan. 2016)



S. Gruber, et al. JGR 2019



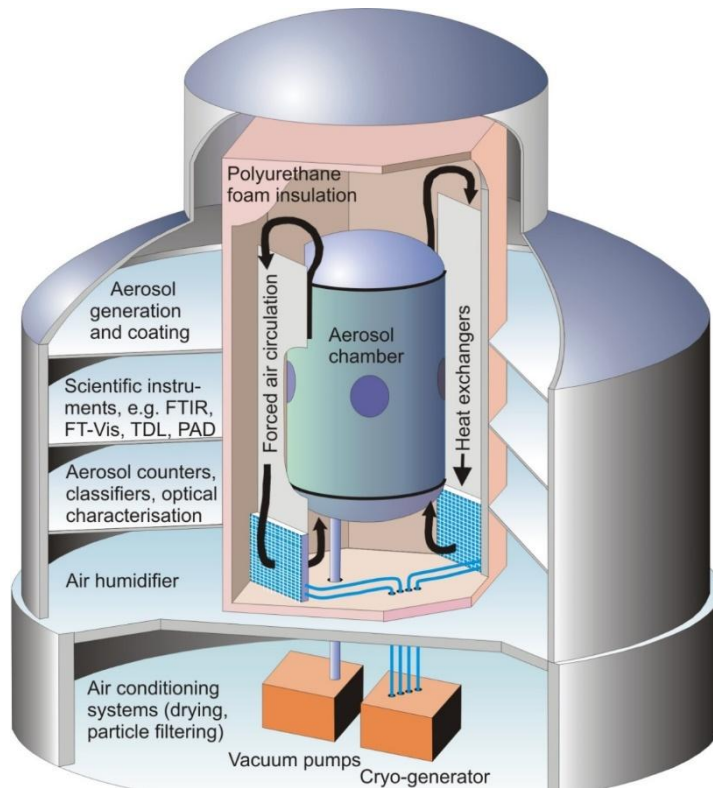
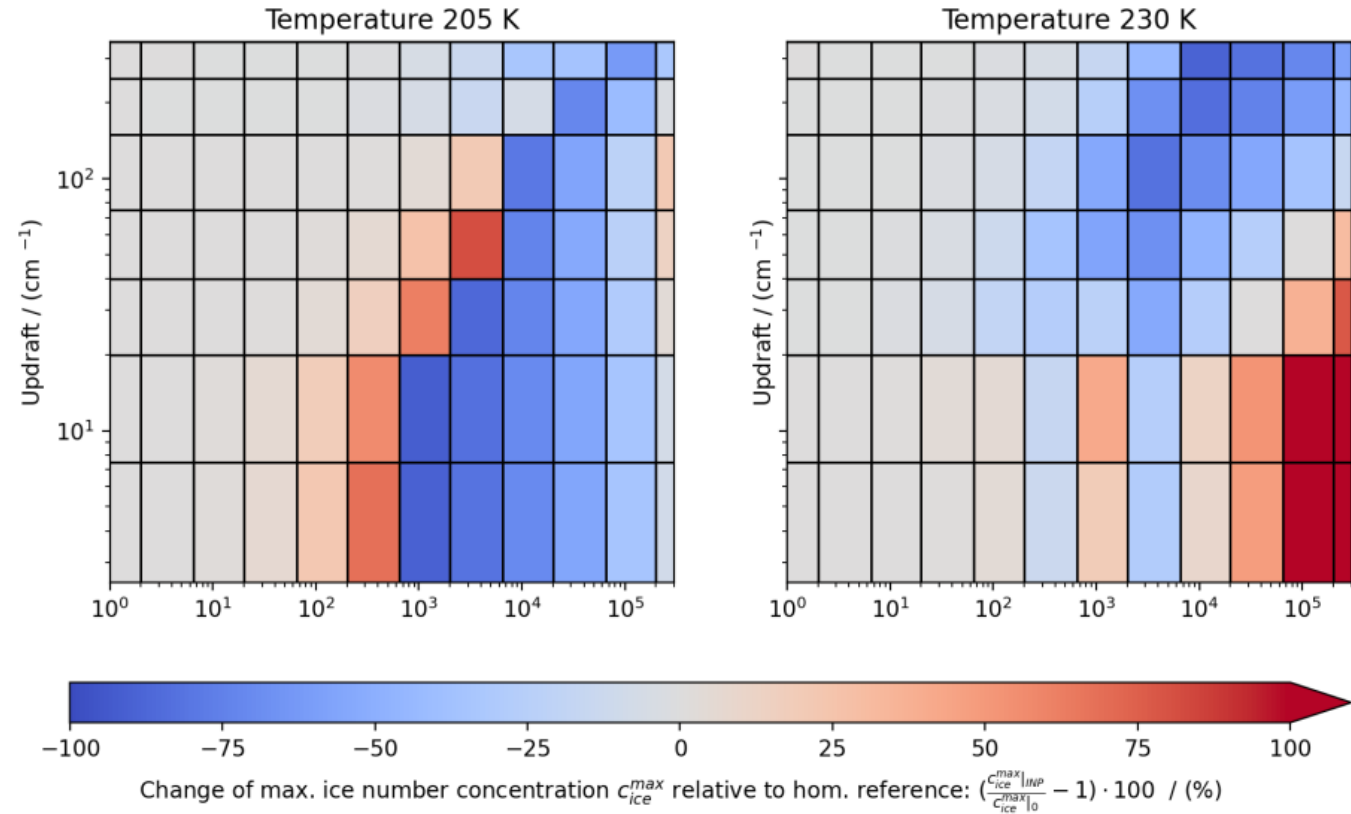
Ausgehende Wärmestrahlung



Flüssigwasser- Wolkenbedeckung

Der Teufel steckt im Detail

Wolkenkammer-Simulationen und Boxmodell



Eine detaillierte Analyse zeigt, dass zusätzliche Eiskeime der richtigen Wirksamkeit am richtigen Ort und zur richtigen Zeit eingebracht werden. Wenn das nicht gelingt, kann sich der gewünschte Effekt ins Gegenteil verkehren, da zusätzliche Zirren dort entstehen, wo sie sonst gar nicht aufgetreten wären.

Dissertation T. Schorr.

Warum “Strahlungsmanagement” das Klima vermutlich nicht retten wird:

- Der Teufel steckt im Detail. Viele Wirkzusammenhänge und Nebenwirkungen sind nicht ausreichend bekannt, Überraschungen sind vorprogrammiert
- Der ungebremsste Anstieg des CO₂ bedroht die (marine) Artenvielfalt.
- Die Wirksamkeit von CE kann viele Jahre nach der Implementierung nachgewiesen werden. Dennoch kann es ein falsches Gefühl der Sicherheit erzeugen → „moral hazard“
- Meteorologische Nebenwirkungen sind zu erwarten, Extremereignisse werden mit CE assoziiert werden.
- Die problematische „Governance“ des CE führt zu erhöhtem internationalen Konfliktpotential
- Niemand kann ein funktionierendes Strahlungsmanagement- Programm für Jahrhunderte garantieren. Wenn es zusammenbricht, wird der aufgeschobene Klimawandel in wenigen Jahren nachgeholt.

Warum Forschung dennoch nötig ist

Belastbare Information für Entscheidungsträger bereitstellen:

- Effekte und Nebeneffekte für Wetter, Klima und Ökosysteme finden und quantifizieren.
- Methoden zur schnellen Verifikation der Effekte und Nebenwirkungen entwickeln.
- Die realen Kosten eines CE Systems abschätzen.
- Die politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen beschreiben und erkunden, unter welchen Climate Engineering betrieben werden sollte.

Vorbereitet sein für den „Ernstfall“

Was wenn ...

das Klima sich schneller verändert als vorhergesagt?

Mitigation und negative Emissionen nicht umgesetzt werden (können)?

Wetter- und Klimaextreme den Ruf nach schnellen Maßnahmen laut werden lassen?

Die Forschung kann nicht dann erst starten.

Worauf man als Forscher vorbereitet sein sollte

Slippery slope:

Once tested in models, small scale field tests will become necessary which lead to large scale field test that cannot be distinguished from deployment. So we will end up in unregulated and uncoordinated CE.

Moral hazard:

Once a CE scheme seems to be available, mitigation efforts tend to be reduced or postponed because a (false) feeling of safety is created. This lead to even larger climate problems in the future.

Feasability hazard:

A model-tested CE scheme with acceptable side effects will boost the call for CE even if the severe political and societal dangers remain unadressed.

