

Retten
Klima-Ingenieure
die Welt ?

Jost Heintzenberg

Inhalt

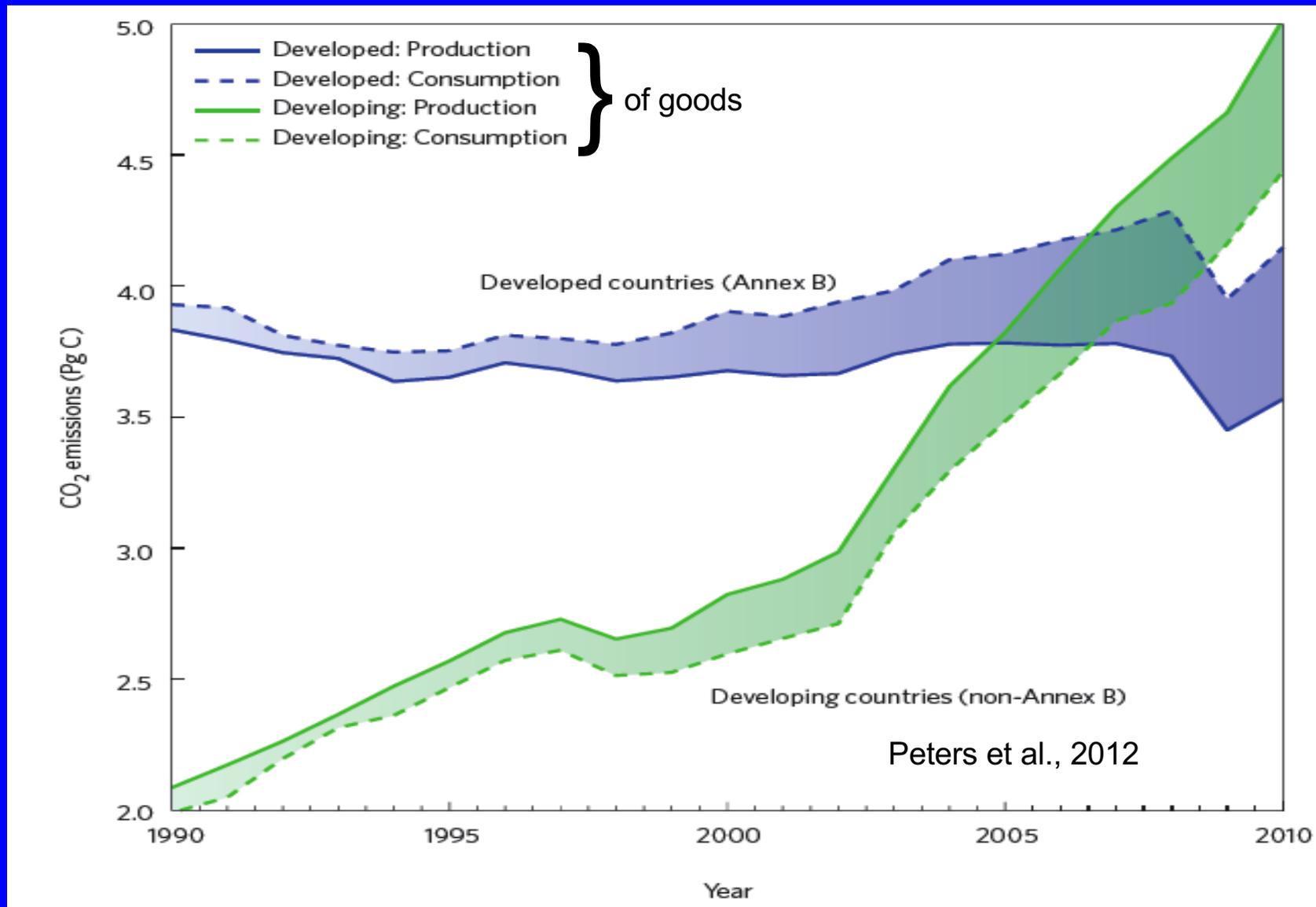
- Die heutige Ausgangslage
- Eingrenzung des Themas
- Typisierung der Vorschläge
- Diskussion der Vorschläge
- Die nicht-naturwissenschaftliche Seite des Problems

Ein paar Schlaglichter auf
unsere heutige Situation

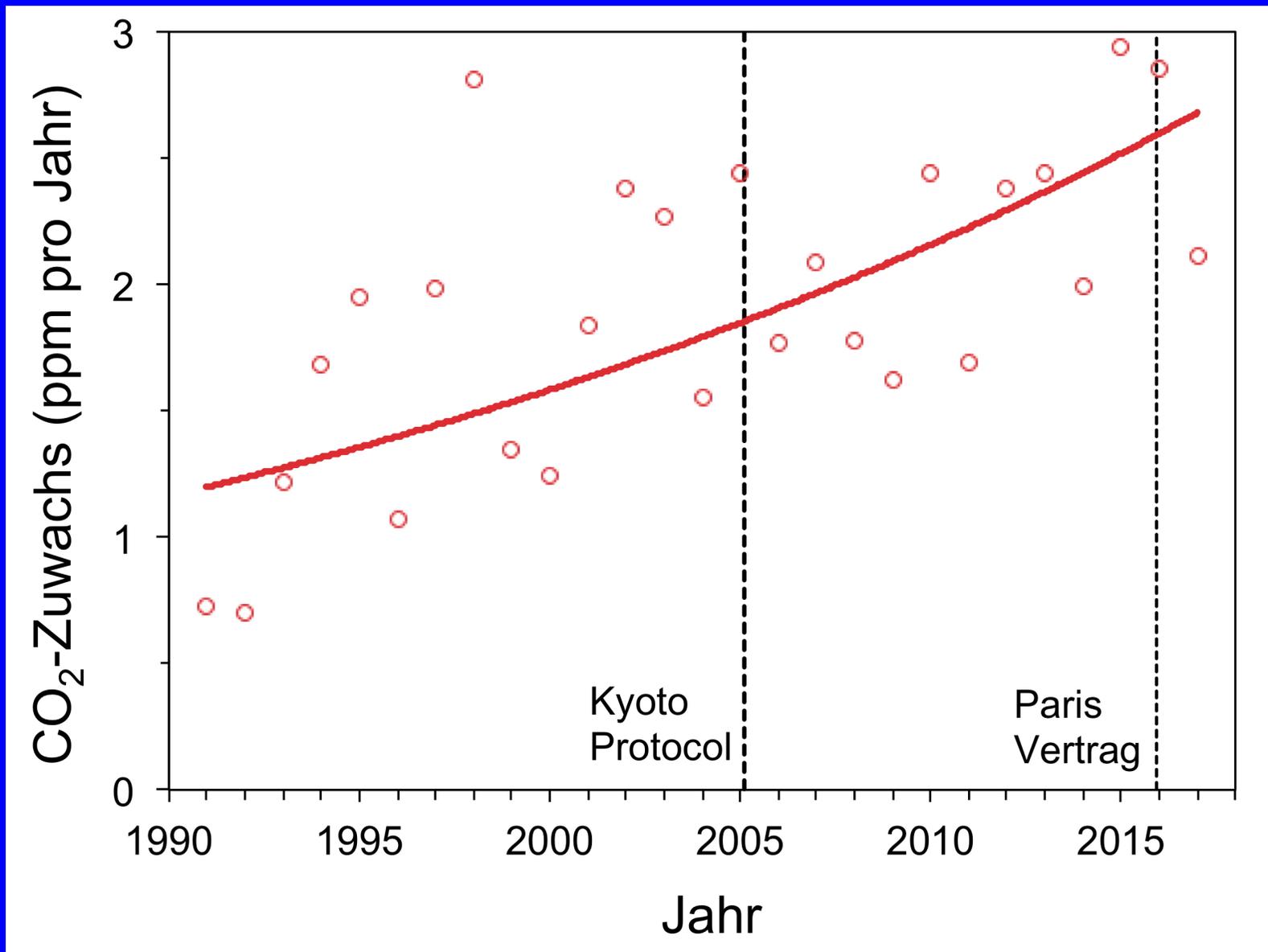
Warum müssen wir über Klimawandel reden?

- Die Energiebilanz der Erde ist **nicht** ausgeglichen
 - Fast 1 Watt m⁻² mehr Sonnenenergie werden aufgenommen als Energie in Form von thermischer Strahlung abgestrahlt wird
- ⇒ **Es muss also wärmer werden**
- und zwar so lange bis die dadurch erhöhte Ausstrahlung die Energiebilanz wieder ausgleicht

CO₂-Emissionen nehmen weiter zu



Die CO₂-Zunahme ist nicht stabil





Berechnung übertrifft Prognosen

Meeresspiegel steigt immer schneller

Die Erderwärmung lässt den Meeresspiegel steigen – doch wie weit? Bis Ende des Jahrhunderts mehr als doppelt so hoch wie bisher angenommen, errechnen Forscher und betonen: Das ist eine vorsichtige Schätzung.

Der Meeresspiegel steigt jedes Jahr etwas schneller - und der Zuwachs könnte bis zum Jahr 2100 mehr als das Doppelte bisheriger Prognosen erreichen. Das haben Wissenschaftler anhand von Satellitenmessungen errechnet. Seit 1993 stieg der Meeresspiegel im weltweiten Durchschnitt jährlich um etwa drei Millimeter. Die nun gemessene Beschleunigung könnte dazu führen, dass der Anstieg im Jahr 2100 zehn Millimeter pro Jahr beträgt. Das berichtet die Forschergruppe um Steve Nerem von der University of Colorado in Boulder in den "Proceedings" der US-Nationalen Akademie der Wissenschaften ("PNAS").

Nerem, R. S., Beckley, B. D., Fasullo, J. T., Hamlington, B. D., Masters, D., and Mitchum, G. T.: Climate-change–driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era, PNAS, 2018.

Forschung zu Geoengineering wurde und wird gefördert

- DFG-Schwerpunktprogramm: Climate Engineering: Challenges for Research, Assessment and Governance
- EU: “European Transdisciplinary Assessment of Climate Engineering” (EuTRACE)
- Britische Förderung des SPICE-Projekts: Stratospheric Particle Injection for Climate Engineering

Eingrenzung des Themas

- Geoengineering betreibt der Mensch seit er sesshaft wurde durch Veränderung der

1. Erdoberfläche und der

2. Zusammensetzung der Atmosphäre

- Seit über 100 Jahren spekuliert man über geplante Wetter- und Klimaveränderungen
- Hier reden wir von **Klima-Ingenieur-Maßnahmen (KIM)** gegen eine Erderwärmung
- **Wir schließen hier aus:**
- CO₂-Vermeidung durch Auffangen an der Quelle (CCS)
- Maßnahmen gegen den Meeresspiegelanstieg

Die Energiebilanz der Erde

$$F_K = S (1 - A_p)$$

S = Solarkonstante, $\approx 1370 \text{ W m}^{-2}$

A_p = Gesamtreflektion (planetare Albedo, $\approx 30\%$)

F_K = Kurzwellige Sonneneinstrahlung

F_L = Langwellige (thermische) Ausstrahlung

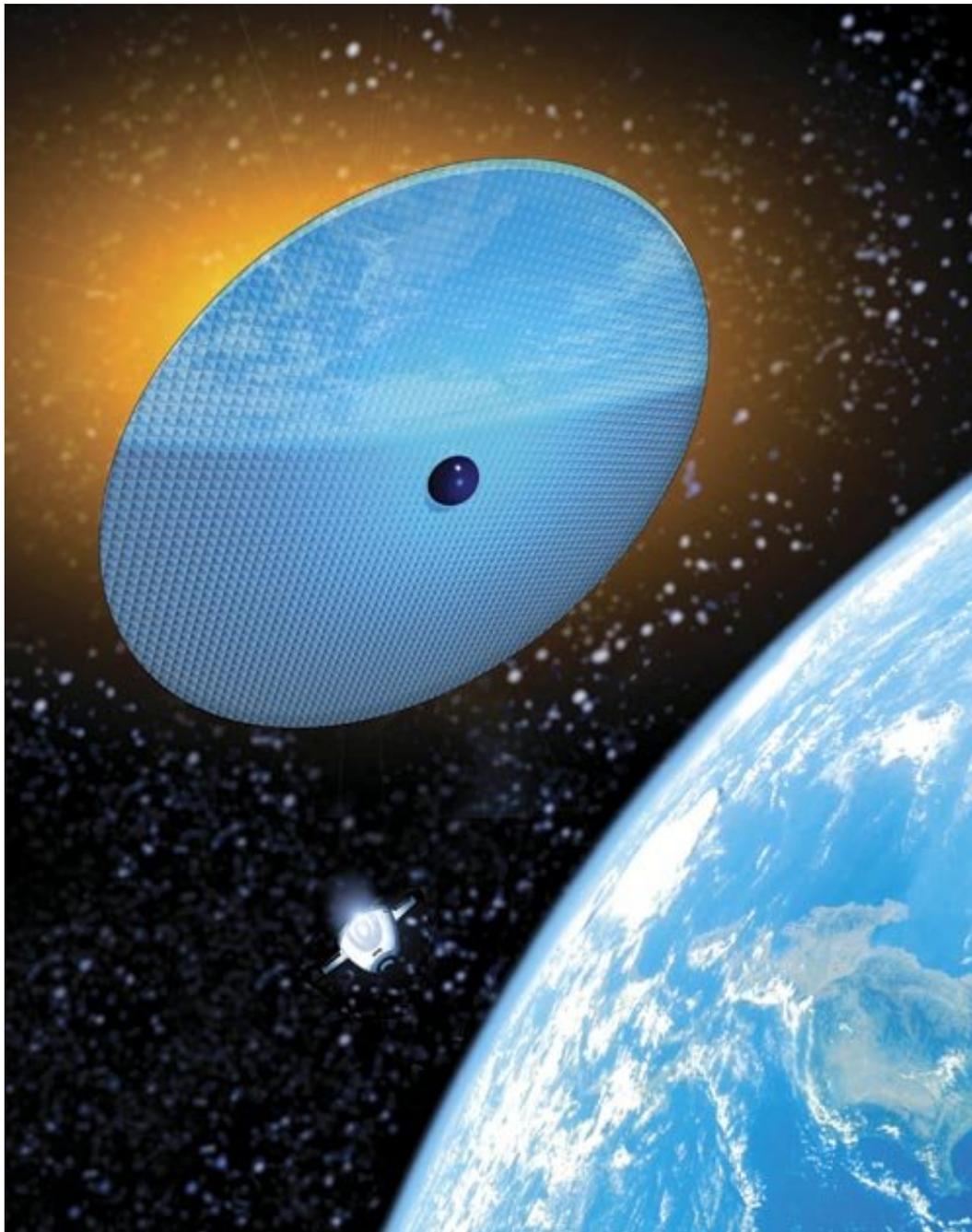
σ = Stefan-Boltzmann-Konstante

Im Energiegleichgewicht gilt:

$$F_K = F_L = \sigma T^4$$

Wo könnten also KI-Maßnahmen zur globalen Abkühlung ansetzen?

1. Verringerung der Solarkonstante
2. Erhöhung der planetaren Albedo
3. Erhöhung der thermischen Ausstrahlung



Solarkonstante S

Verringerung von S um
ca. 1.8% durch:

1. autonome
Spiegelsysteme
(100000 x 13000 km)
im Lagrangepunkt L1
2. Reflektierende
Staubringe oder
Schirme um die Erde

Solar konstante S

- **Vorteile:** Kein Eingriff in das Erdsystem, relativ leicht zu simulieren
- **Simulation:** Abkühlung der Tropen, Erwärmung der Pole, Abschwächung des globalen Wasserkreislaufs
- **Nachteil:** Die Meeresversauerung durch CO_2 wird nicht gemildert
- **Nebeneffekte: ?**

Planetare Albedo A_p



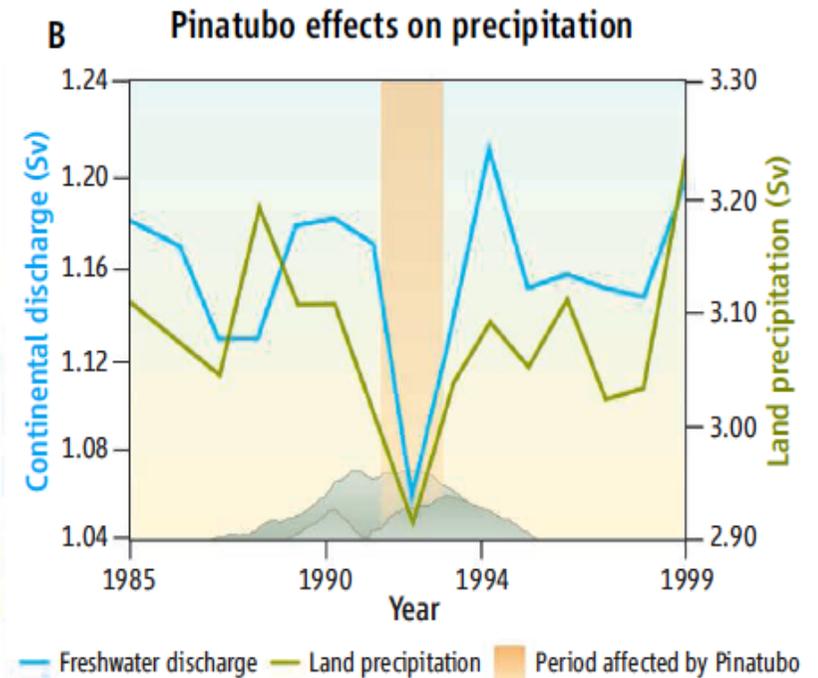
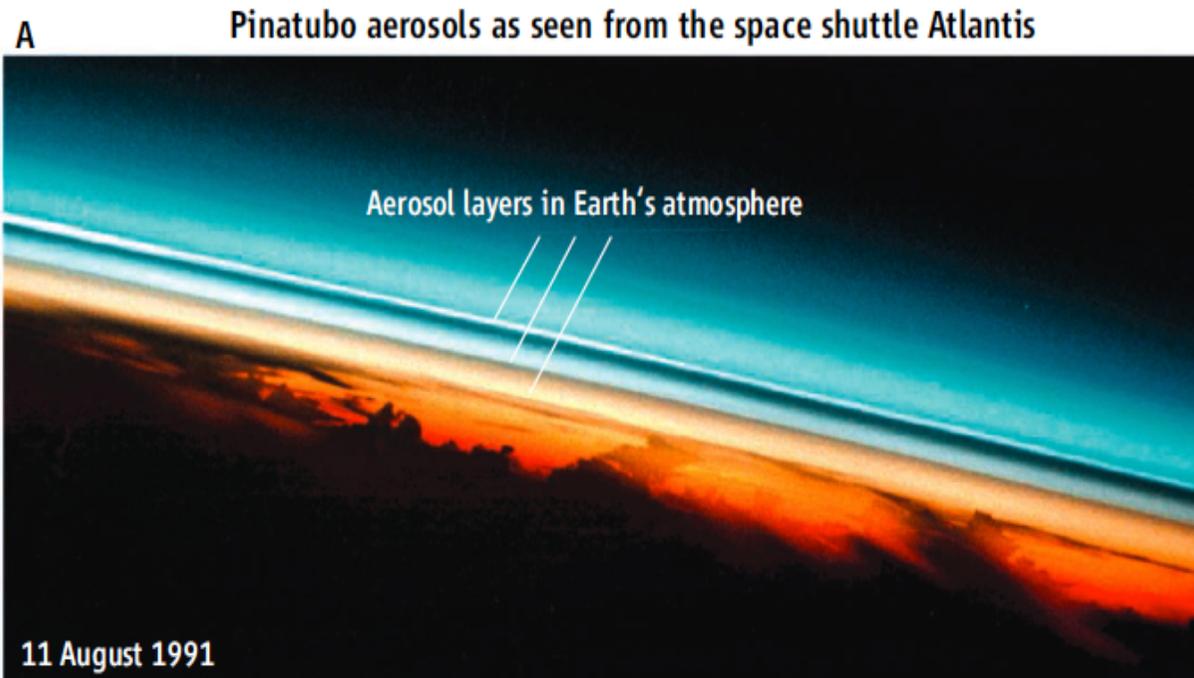
1. Vorschlag:

Mehr reflektierendes stratosphärisches Aerosol

Ausbringung durch Raketen, Flugzeuge, Kanonen oder von Fesselballons getragenen Schläuchen

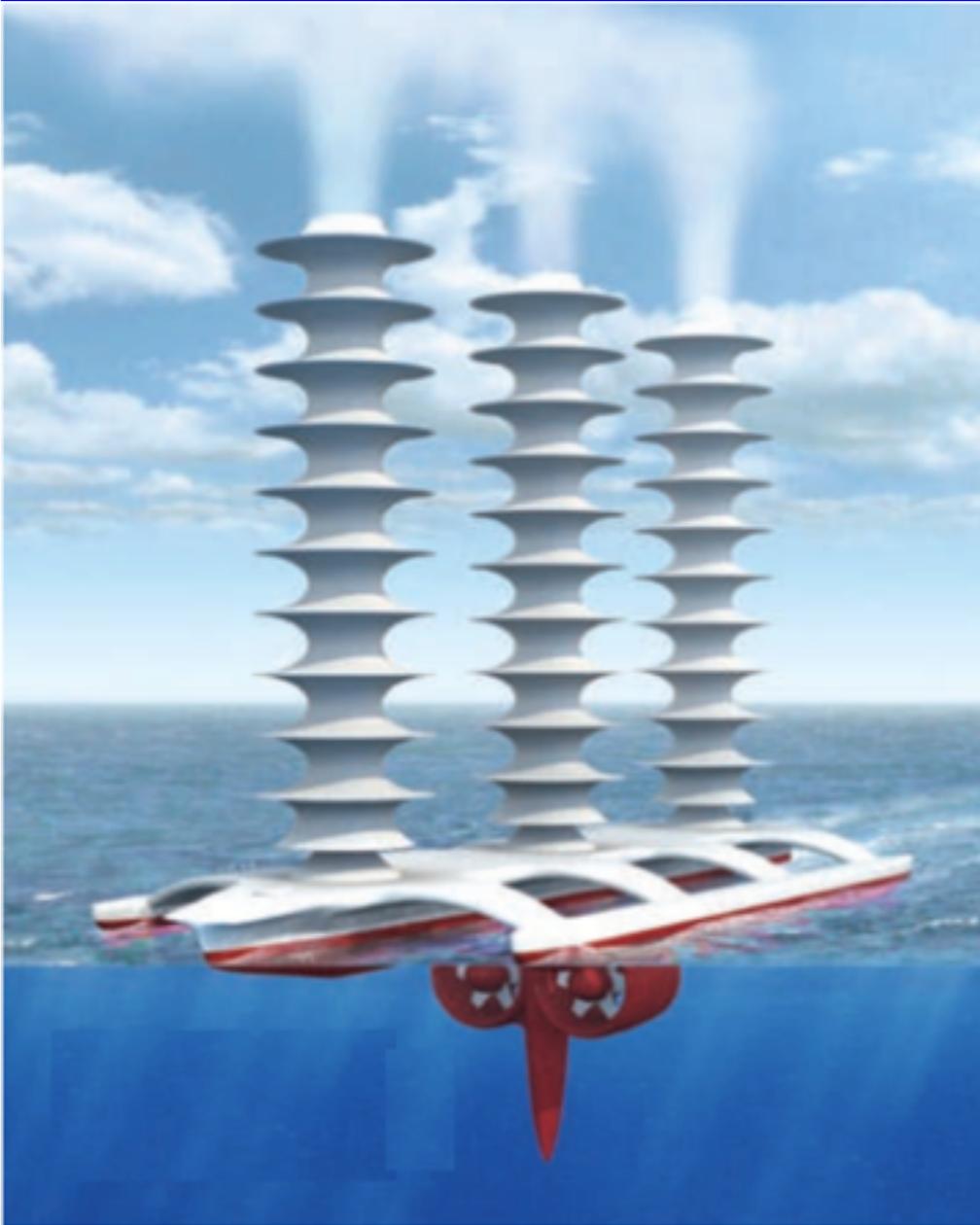
Letztere Idee wird von Bill Gates gefördert

Vergleich mit Pinatubo



Hegerl & Solomon, 2009:
Globale Verringerung von Niederschlag
und kontinentalem Abfluss

Planetare Albedo A_p



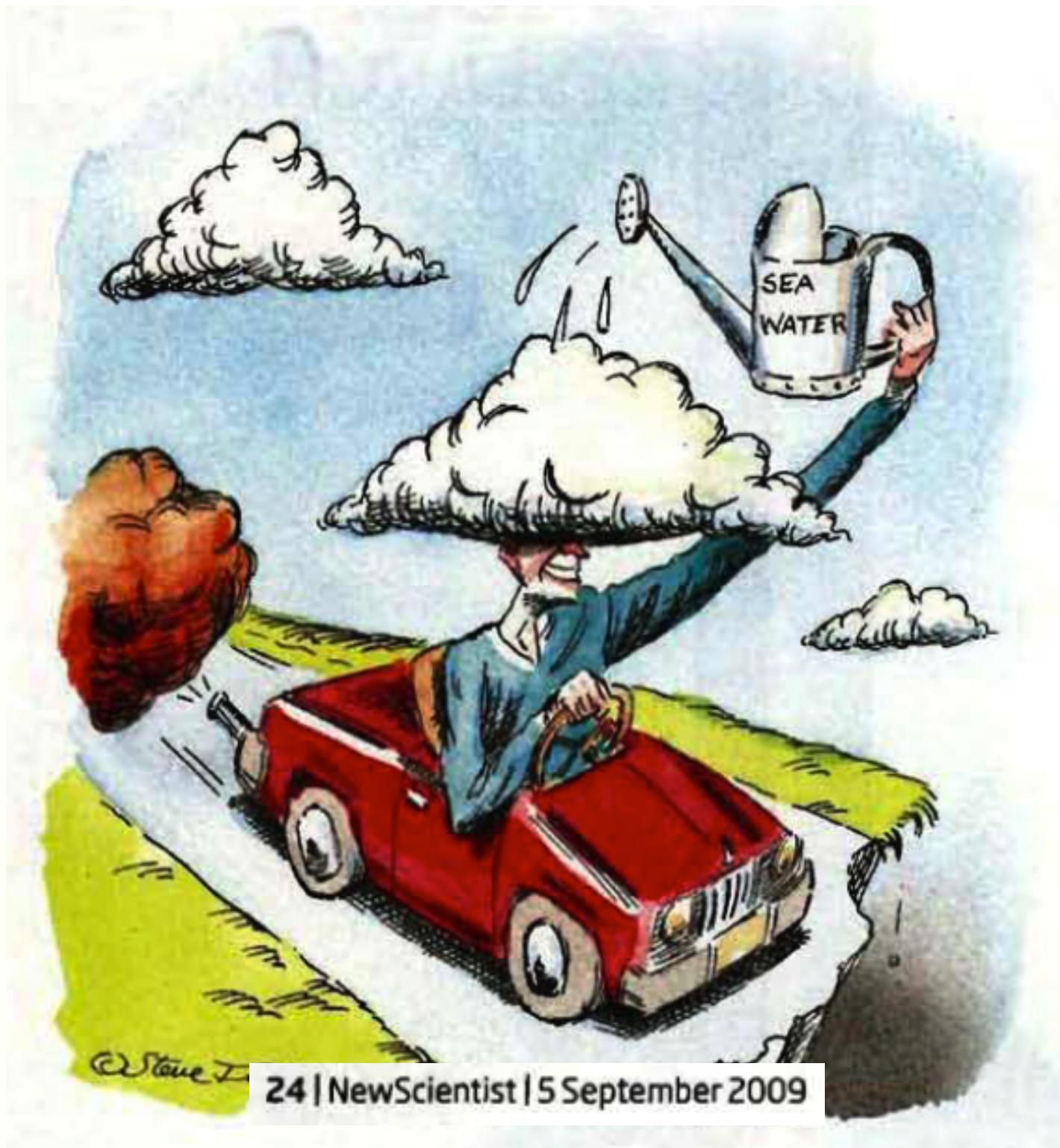
2. Vorschlag:

Aufhellen mariner
Grenzschichtwolken
durch höheres Dargebot
von Seesalz-
Kondensationskernen
(und Wasserdampf)

Auch diese Idee wird von
Bill Gates gefördert

Aufhellen mariner Grenzschichtwolken

- Niedrige Wolken über den Weltmeeren zeichnen sich in mehrfacher Hinsicht für KIM aus:
- Sie bedecken große Teile der Ozeane
- Sie sind besonders empfindlich für mikrophysikalische Einflussnahmen
- Sie schweben über dem natürlichen Medium Seewasser, das zur Einflussnahme genutzt werden kann
- Sie sind relativ leicht zugänglich



© Steve J.

Thick closed-cellular
stratocumulus convection

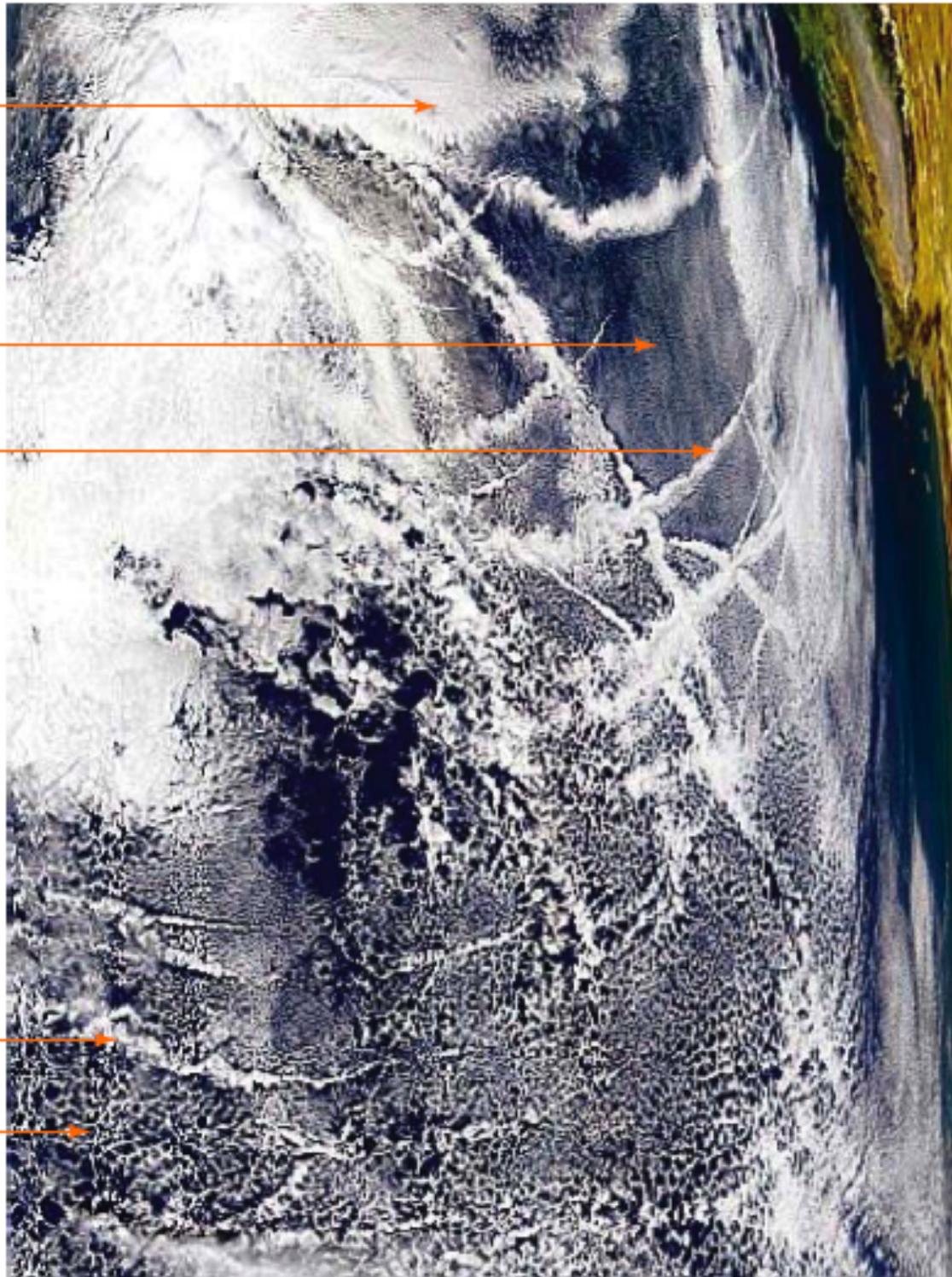
Thin closed-cellular
stratocumulus convection

Ship tracks brightening
clouds (albedo effect?)

Stevens & Feingold, 2009

Ship tracks filling open
cells (lifetime effect?)

Open-cellular convection



A propos Schiff- Spuren

Aufhellung mariner Grenzschichtwolken

Vorteil:

Es heißt, es funktioniert, siehe Schiffsspuren
Angeblich neben Erhöhung der Wolkenalbedo
auch Erhöhung der Wolkenlebensdauer

Simulierung: Schwierig, da Veränderung im
Erdsystem, dessen Prozesse nicht alle erfasst
sind

Nachteile:

Dämpfung des globalen Wasserkreislaufes (?),
Meeresversauerung nach wie vor

Planetare Albedo A_p

5. Vorschlag: *Ruß raus aus der Atmosphäre*

Warum:

Ruß absorbiert Sonnenstrahlung

Vorteile:

Technik existiert. Positiver Gesundheits- und Ventilationsnebeneffekt; Albedoerhöhung von ehemals rußbedeckten Schnee- und Eisoberflächen

Simulierung:

Gesamtmomentaneinfluß von Ruß auf die Energiebilanz in der Größenordnung des entsprechenden Wertes für CO_2

Planetare Albedo A_p

Nachteile:

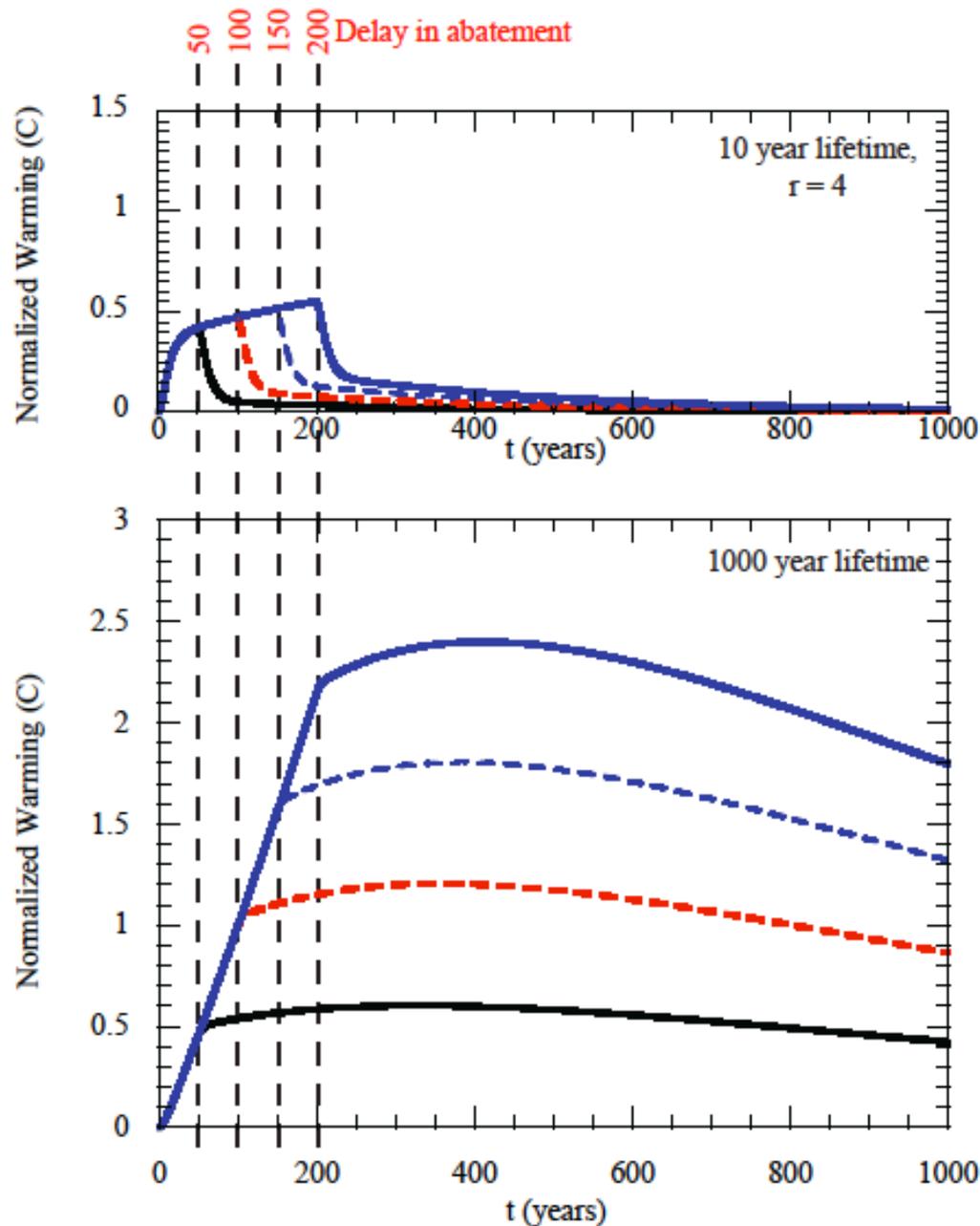
Die meisten gefilterten Verbrennungspartikel sind keine Rußpartikel sondern reflektieren Sonnenstrahlung

Neuere Klimasimulationen finden eine globale **Erwärmung** von 0.25 bis 0.5 C gemittelt über 10 Jahre nach Entfernung aller anthropogener Aerosolpartikel.

Meeresversauerung wie zuvor

P.S. Auch stratosphärische Rußinjektionen wurden vorgeschlagen um den Energieeintrag am Boden zu verringern

Großer Vorbehalt bei Ruß



- Wegen der langen atmosphärischen Aufenthaltsdauer von CO_2 sind seine kumulativen Effekte zu beachten
- ⇒ Jede Verzögerung bedingt eine länger anhaltende Erwärmung

Pierrehumbert, 2013

Thermische Ausstrahlung F_L

Fast alle Vorschläge wollen F_L durch Entnahme von CO_2 aus der Atmosphäre erhöhen

- Beschleunigung der **physikalischen Kohlenstoffpumpe** im Ozean
- Beschleunigung der marinen **physikochemischen Kohlenstoffpumpe**
- Beschleunigung der marinen **biologischen Kohlenstoffpumpe**
- Erhöhung der **Kohlenstoffbindung in terrestrischen Pflanzen** und Pflanzenresten
- Beschleunigung der natürlichen **Verwitterung**
- Technische **Entfernung von CO_2 aus der Luft**

Thermische Ausstrahlung F_L

Alle Vorschläge zur Entnahme von CO_2 aus der Atmosphäre haben das gleiche Grundproblem:

- **Wohin mit dem CO_2 ?**
- Die dauerhafte Lagerung in flüssiger oder gasförmiger Form erscheint so „sicher wie die Rente“
- Feststofflagerung in Form von Holzkohle oder Schwarzerde erscheint noch am sichersten und nützlichsten

Die biologische Kohlenstoffpumpe

- Baut auf der ***Eisenhypothese*** von Martin (1988)
- Düngung von Meeresgebieten mit Substanzen, die das Algenwachstum fördern
- **Vorteile:** Minderung von CO₂ und Meeresversauerung
- **Simulierung:** Schwierig weil nicht alle Prozesse bekannt, und weil die gesamte marine Nahrungskette betroffen ist
- **Nachteile:** Nach 15 Feldversuchen keine klaren Langzeitergebnisse; jedoch messbare Nebenwirkungen wie erhöhte Treibhausgasemissionen
- Der Verbleib biologisch aufgenommenen Kohlenstoffs hängt nicht nur von biologischen sondern auch von physikalischen und chemischen Prozessen im Meerwasser ab

Künstliche Bäume



Institution of
Mechanical Engineers



“ ”

A NORTH SEA LOCATION
WOULD BE ADVANTAGEOUS AS
RENEWABLE ENERGY COULD
POWER THE TREES AND EMPTY
OIL WELLS COULD BE USED
TO STORE CAPTURED CO₂.

„Air capture“: Direkte, technische CO₂-Entfernung aus der Luft

„Air Capture“

- Die Luft wird über Adsorber wie Natriumhydroxid geleitet, die selektiv CO₂ binden
- Der Adsorber wird dann regeneriert
- ⇒ Reines CO₂ zum Transport und Lagerung
- ⇒ Der Absorber steht wieder zur Verfügung
- Funktioniert als geschlossener Kreislauf ohne Verbrauch von Chemikalien
- Für Substanztransport und Regeneration wird allerdings Energie benötigt

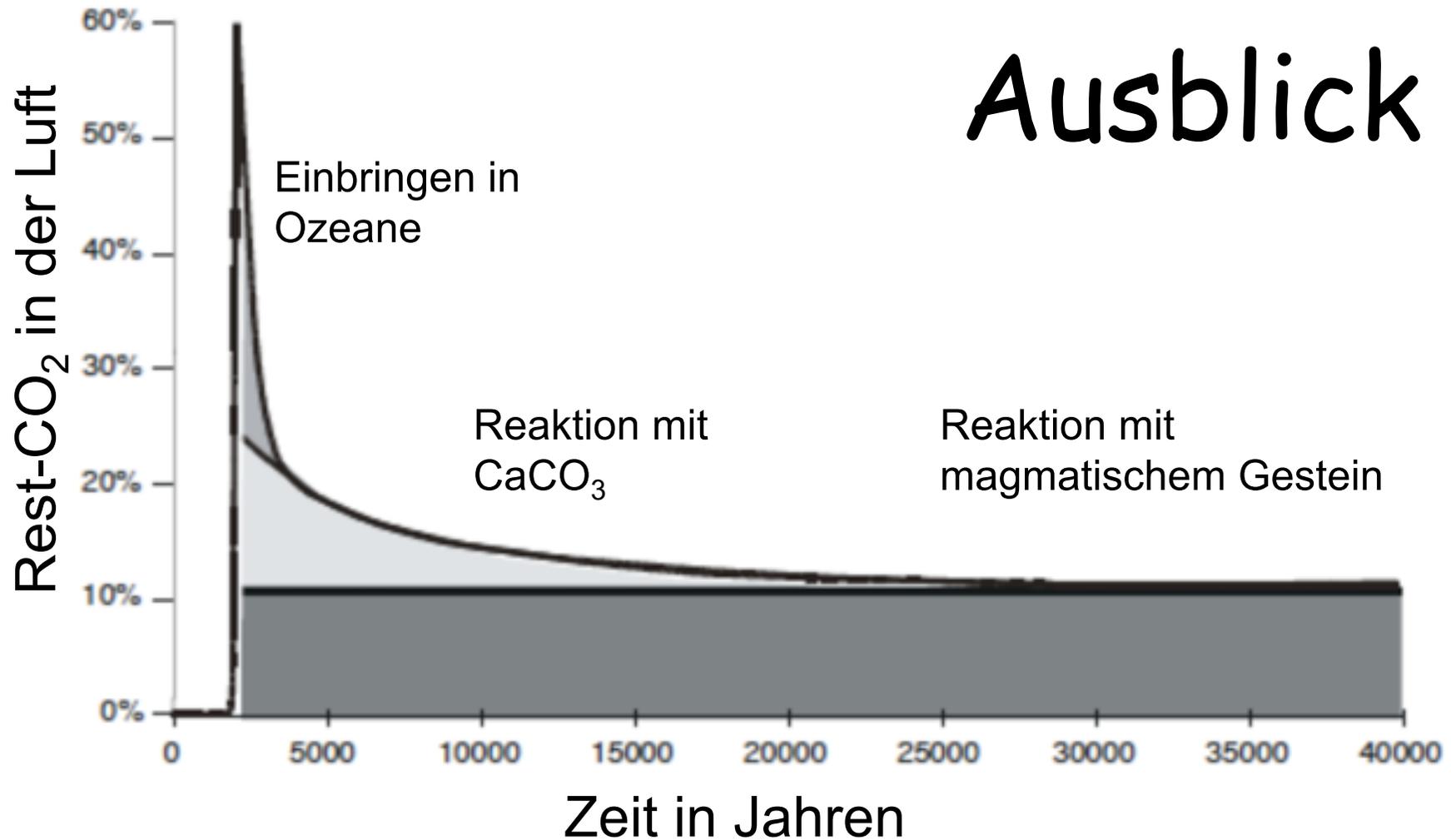
„Air Capture“

- Aber auch hier kommt die Frage:
- Wohin mit dem CO₂?

Wieviel CO_2 müsste aus der Atmosphäre entfernt werden?

- Klimamodelle zeigen:
- Die Hysterese des Erdsystems im Permafrost-Kohlenstoffreservoir erfordert, dass bis zu 180% der ursprünglichen CO_2 -Emissionen entfernt werden müssen, um zu vorindustriellen Klimabedingungen zurückzukehren
- MacDougall, 2013

Ausblick



- Die natürliche Entfernung von CO₂ zieht sich über viele Jahrhunderte hin
- >20% bleiben für mehr als 1000 Jahre in der Luft bis der Rest durch geologische Prozesse ausgeglichen wird

Wann wird sich die Erde vom Menschen erholt haben?

- Geologische Prozesse der Kohlenstoffaufnahme sind also sehr langsam
- Diese Prozesse müssen im schlimmsten Fall eine verdoppelte oder verdreifachte CO₂-Menge aus der Atmosphäre entfernen
- Dies wird so lange dauern wie die gesamte bisherige Geschichte des *homo sapiens*:

100 - 200 Tausend Jahre

Wir kommen zu den
nicht-
naturwissenschaftlichen
Fragen

Ein schlüpfriger Abhang

- Wenn wir die Tür zu Klimaingenieur-Maßnahmen nach Forschung dazu öffnen, besteht die Gefahr, dass einmal „erforschte KI-Technologien“ auch angewandt werden
- Selbstläufer, Dammbbruch...
- Beispiel: Atombombe

Ein moralisches Risiko

- Auch subjektives Risiko oder moralische Versuchung
- Beschreibt das Problem einer Verhaltensänderung durch eine Versicherung gegen ein Risiko
- Die Entscheidung KIM zu unterstützen könnte die Anstrengungen untergraben, die globalen Emissionen von Treibhausgasen zu verringern
- Könnte durch abschreckende Wirkung aber auch zu verstärkten Minderungsmaßnahmen oder zu vertretbaren Substitutionseffekten führen

Klimaingenieure und Völkerrecht?

- Die meisten KI-Maßnahmen lassen sich entweder einseitig (von „Mr. Greenfinger“) oder durch eine Koalition weniger, starker Staaten finanzieren und durchführen
- Es gibt keine völkerrechtlichen Verbote, so dass eine legale Rechtfertigung der Erforschung und des Einsatzes von KIM möglich erscheint

“Wir sollten zumindest KIM beforschen“

- Falls die Forschung zu KIM erfolgreich ist und die Erdentwicklung ihre Anwendung nahelegt, würde diese in einer Weise erfolgen, die die wissenschaftlichen Erkenntnisse nutzt und die Interessen der Schwachen und Gefährdeten berücksichtigt
- Glauben wir dies wirklich?
- Die Ironie ist: Falls wir wirklich an eine solche Entwicklung glaubten hätte sich die Frage: KIM-Forschung ja / nein nie gestellt

C. Hamilton (2013), Nature **496**, 139