



Mit Geoengineering gegen die Klimaerwärmung: Dilemma zwischen Möglichkeiten und Risiken

Hauptursache für die globale Erwärmung sind die vom Menschen in die Atmosphäre freigesetzten Treibhausgase. Trotz politischer Anstrengungen zeigt die Entwicklung der weltweiten Emissionen einen deutlich ansteigenden Trend. Dies verstärkt die Suche nach rasch wirksamen Mitteln gegen die Klimaerwärmung und deren Auswirkungen. Geoengineering gehört zu diesen Ansätzen.

Die Idee, mit Hilfe moderner Technik in den Prozess der Klimaänderung einzugreifen, ist äusserst umstritten. Ein Teil der Wissenschaftler wehrt sich grundsätzlich gegen die Idee, und ihre Skepsis ist nicht unbegründet: Geoengineering-Methoden bergen die Gefahr, vom eigentlichen Problem der Treibhausgasreduktion abzulenken. Im Weiteren bestehen Risiken in Bezug auf unerwartete Folgen.

Andererseits gibt es Wissenschaftler, welche die Risiken des Geoengineering in vollem Umfang eingestehen und sich dennoch für Forschung in diesem Bereich engagieren. Sie sind überzeugt, dass alle Möglichkeiten, die unseren Handlungsspielraum in Bezug auf Emissionsreduktionen vergrössern, in Betracht gezogen werden müssen und es unverantwortlich wäre, dies nicht zu tun. Eine abschliessende Beurteilung der Methoden und deren Risiken ist zum heutigen Zeitpunkt nicht möglich.

Im Jahre 2006 veröffentlichte Paul Crutzen, Atmosphärenwissenschaftler und Nobelpreisträger, in einer klimawissenschaftlichen Fachzeitschrift einen Artikel zur Möglichkeit, die Klimaerwärmung

durch die Injektion von Sulfataerosolen in die Atmosphäre zu bremsen. Crutzen steht zu den Risiken, die mit solchen Massnahmen verbunden sind. Er setzt sich dafür ein, dass Anstrengungen zu deren besserer Erforschung aufgrund der enttäuschenden Fortschritte in der globalen Klimapolitik nicht tabuisiert werden sollten. Crutzen betont, dass Geoengineering-Methoden nur dann zur Anwendung kommen dürften, wenn der politische Wille der internationalen Staatengemeinschaft, Treibhausgasemissionen massiv zu senken, weiterhin ausbliebe. Die Diskussion über Geoengineering-Methoden hat nicht zuletzt durch die Äusserungen von Crutzen stark zugenommen.

Zu den bekanntesten und derzeit meist diskutierten Geoengineering-Methoden gehören die „Düngung“ der Meere mit Eisen zur Förderung der CO₂-Aufnahme durch Meeresorganismen, die Zufuhr grosser Mengen an Sulfataerosolen in höhere Atmosphärenschichten, die Intensivierung der Bewölkung über den Weltmeeren oder die Positionierung von Sonnenschutzschilden im Weltraum zur Abschwächung der Sonneneinstrahlung. Diese Methoden zur Verlangsamung der Klimaerwärmung werden nachfolgend erläutert und anschliessend deren mögliche Vor- und Nachteile erörtert.

Methoden des Geoengineering

Eisensulfat zur Düngung der Meere

Die Idee, das Oberflächenwasser der Meere mit Eisen zu düngen, entstand aufgrund der Erkenntnis, dass die Algen für ihr Wachstum

Eisen und CO₂ benötigen, welches sie aus dem Oberflächenwasser aufnehmen. Bei einem Unterangebot an Eisen beschleunigt eine Eisenzufuhr das Algenwachstum und dadurch deren CO₂-Aufnahme. Das durch die Algen dem Wasser entnommene CO₂ wird teilweise durch Aufnahme aus der Atmosphäre kompensiert (Jin et al., 2008). Wenn die Algen absterben und in die Tiefe der Meere sinken, kann das zu einem etwas tieferen CO₂-Gehalt in der Atmosphäre führen. Die Eisensulfatdüngung als Methode zur Reduktion des atmosphärischen CO₂-Gehaltes wurde durch die spätere Erkenntnis gestützt, dass die Zufuhr von Eisen in das oberflächennahe Wasser während der Eiszeiten wesentlich grösser war und vermutlich zu einem erhöhten Algenwachstum führte. Es scheint, dass dieser Prozess zum damaligen Rückgang des CO₂ in der Atmosphäre beigetragen hat, wobei aufgrund neuerer Studien dieser Beitrag aber als eher gering beurteilt wird (z.B. Parekh et al., 2007). Der momentane Kenntnisstand lässt keinen Rückschluss auf eine wirklich erhöhte Kohlenstoffaufnahme zu, legt hingegen negative Nebenwirkungen auf den gelösten Sauerstoff, veränderte ozeanische Spurengaskonzentrationen und Beeinträchtigungen der ozeanischen Biodiversität nahe. Daher äusserte sich das wissen-

schaftliche Komitee von SOLAS (Surface Ocean - Lower Atmosphere Study) bereits im 2006 klar ablehnend gegenüber einem grossskaligen Einsatz der Ozeandüngung (<http://solas-int.org/aboutsolas/organisationsandstructure/science-steercomm/sscmmins/positionstatement.pdf>).

Sonnenschirme im Weltall

Eine andere Idee ist die Installation von „Sonnenschirmen“ im Weltall, welche die auf der Erde eintreffende Strahlungsenergie reduzieren sollen. Bereits 1989 schlug der Amerikaner James T. Early (Early, 1989) vor, zwischen Sonne und Erde ein Sonnensegel mit einem Durchmesser von 2000 km zu installieren. In späteren Varianten dieses Vorschlags wurde der Einsatz einer grossen Zahl kleinerer Segel angeregt. 1992 stellte die U.S. National Academy of Sciences eine Variante mit 55'000 Segel mit einer Fläche von je 100 km² vor, welche in der Umlaufbahn der Erde kreisen sollen. Bei „Miniatur-Sonnenschirmen“ (Angel, 2006) mit einem Durchmesser von 60 cm würde die erforderliche Zahl auf 16 Billionen (16'000'000'000'000) steigen. Diese müssten mit Hilfe von 20 Millionen Raketenstarts an ihren Bestimmungsort ins All befördert werden. Die Kosten für diese Aktion werden auf einige Billionen \$ über den Zeitraum von 25 Jahren geschätzt.

Definition und Abgrenzung

Mit dem Begriff Geoengineering werden Versuche zur absichtlichen Veränderung der Natur beschrieben, die sich in der Größenordnung des Planeten bewegen (Keith, 2001). Die Massnahmen haben nicht unbedingt eine offenkundige Veränderung der natürlichen Umwelt zum Ziel. Sie können auch den Erhalt des gegenwärtigen Zustandes gegenüber menschlichen oder natürlichen Einflüssen anstreben. Heute wird der Begriff häufig im Zusammenhang mit der Klimaänderung verwendet: Geoengineering als möglicher Ansatz, die natürliche Umwelt so zu beeinflussen, dass die durch den Menschen verursachte unerwünschte globale Erwärmung abgewendet, vermindert oder zumindest ein zeitlicher Aufschub erreicht werden kann.

Eine scharfe Abgrenzung zu anderen Massnahmen gegen die Klimaänderung gibt es nicht. Häufig werden Massnahmen zur Minderung der Klimaänderung (Mitigation) und Massnahmen zur Anpassung an die Klimaänderung (Adaptation) unterschieden. Unter den Begriff Mitigation fallen insbesondere alle Anstrengungen, die Treibhausgasemissionen zu vermindern. Der Begriff Adaptation umfasst jene Massnahmen, die darauf abzielen, mit den Folgen der Klimaänderung umzugehen. Beispiele dafür sind Anpassungsmassnahmen an den steigenden Meeresspiegel, an die Veränderungen im Wasserkreislauf (z.B. Bewässerung, Hochwasserschutz) oder die wirtschaftliche Neuausrichtung von Wintertourismusregionen.

Der Bereich Geoengineering liegt zwischen den Möglichkeiten zur Minderung der Klimaänderung und den Massnahmen zur Anpassung. Ebenfalls in diesem Grenzbereich liegt das so genannte Carbon Capture and Storage (CCS), auch Industrial Carbon Management (ICM) genannt. CCS bedeutet, dass bei Verbrennungsvorgängen (z.B. in Kohlekraftwerken) das entstehende CO₂ aus der Abluft ausgetrennt und im Boden oder in der Tiefsee eingelagert wird. Die auch als CO₂-Sequestrierung bezeichnete Einlagerung in tiefe Sedimentschichten soll verhindern, dass das CO₂ in die Atmosphäre gelangt. Diese Methode wird in diesem Beitrag nicht dem Bereich des Geoengineering zugeordnet, sondern soll in einer nachfolgenden Ausgabe besprochen werden. CCS-Techniken erfahren eine wesentlich breitere Unterstützung als die in diesem Text beschriebenen Verfahren.

Künstlicher „Dauervulkan“

Wie bereits erwähnt hat Paul Crutzen vor knapp zwei Jahren mit dem Vorschlag wissenschaftliche Schlagzeilen gemacht, durch Schwefelinjektionen im grossen Stil Vulkanausbrüche zu imitieren (Crutzen, 2006). Seine Idee erhielt nicht zuletzt deshalb sehr viel öffentliche Aufmerksamkeit, weil Crutzen als Nobelpreisträger für seine Ozonforschung sowie für sein ökologisches Engagement bekannt ist.

Schwefelaerosole, die bei einer starken Vulkaneruption bis in höhere Atmosphärenschichten (Stratosphäre: oberhalb von ca. 10 km Höhe) gelangen, reflektieren einen Teil des Sonnenlichts und führen daher zu einer Abkühlung der untersten Atmosphärenschicht und am Boden. Grosse Vulkanausbrüche können folglich die globale Temperatur über einen längeren Zeitraum beeinflussen. So hatte beispielsweise der Ausbruch des Pinatubo 1991 einen weltweiten Temperaturrückgang von rund 0.25 °C über einen Zeitraum von zwei Jahren zur Folge. Auf dieser Tatsache beruht der Vorschlag Crutzens, mit Hilfe einer „kontrollierten Emission an Schwefelaerosolen“ den Prozess der Klimaerwärmung zu verlangsamen. Die Menge des einzubringenden Schwefels würde sich auf mehrere Millionen Tonnen pro Jahr belaufen, die mit Geschossen oder Ballonen in die untere Stratosphäre gebracht werden müssten (Crutzen, 2006).

*Systeme zur Erzeugung**maritimer Stratocumuluswolken*

Stratocumuluswolken bedecken weite Flächen der Weltmeere, wo sie durch die Reflektion des Sonnenlichtes einen signifikanten Kühlfaktor im Klimasystem darstellen. Eine Idee ist, diesen Effekt zu verstärken, indem speziell konstruierte Schiffe das Meereswasser als kleinste Tröpfchen versprühen und die somit entstehenden Salzaerosole als Kondensationskerne für weitere Wolken dienen (Salter and Latham, 2005).

Pumpsystem zur Umwälzung des Meerwassers

Der jüngste Vorschlag (Lovelock and Rapley, 2007) zielt darauf ab, durch die Umwälzung des Meerwassers, die CO₂-Aufnahme der Ozeane zu erhöhen. Mit Hilfe eines technisch einfachen Pumpsystems (im Meer senkrecht schwimmende lange Röhren) soll das nährstoffreiche Wasser aus der Tiefe an die Oberfläche gebracht werden. Dieser Düngungseffekt hat zum Ziel, das Algenwachstum und damit die CO₂-Aufnahme aus der Atmosphäre

zu fördern. Wie bei der Eisendüngung würde der Anteil der Algen, welcher in die Tiefe der Meere absinkt, das gebundene CO₂ dem atmosphärischen Kreislauf entziehen. Ein zusätzlicher Effekt wird von den Algenblüten erwartet, welche eine Vorläufersubstanz (Dimethylsulfid) für Aerosolpartikel produzieren. Diese können als Kondensationskerne für die Wolkenbildung in der Atmosphäre dienen. Als Folge davon könnte wiederum ein Teil der Sonneneinstrahlung reflektiert und dadurch die auf die Erdoberfläche einfallende Strahlung reduziert werden.

Beurteilung durch den IPCC-Bericht

Die Vorschläge aus dem Bereich des Geoengineering führen innerhalb der Wissenschaft zu Diskussionen, welche das Dilemma zwischen Besorgnis über die Klimaerwärmung und Skepsis gegenüber den technischen Möglichkeiten und deren Risiken illustrieren.

Das IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) beurteilt die vorgeschlagenen Techniken insgesamt skeptisch (Barker T. et al., 2007), weil sie spekulativ seien und viele der ökologischen Nebenwirkungen noch nicht beurteilt werden könnten. Ausserdem fehlten detaillierte Kostenabschätzungen sowie ein institutioneller Rahmen für die Realisierung. Bei jenen Methoden, die nicht zu einer Reduktion der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre führen (z.B. Sonnenschirme oder die Zufuhr von Aerosolen in die Atmosphäre), stellt das IPCC klar, dass die Risiken negativer Auswirkungen der erhöhten CO₂-Konzentration nicht gemindert würden, allen voran die fortschreitende Ozeanversauerung.

Klimanotbremse...

Das wichtigste Argument zu Gunsten von Geoengineering-Methoden liefert die Klimapolitik selbst: Allzu schleppend ist das Tempo bei den Reduktionsanstrengungen, allzu gering die Fortschritte in der Bewältigung des Problems, allzu gross der Energiehunger aufstrebender Schwellenländer wie China und Indien. So ist auch für Crutzen der Hauptgrund für sein Engagement die Enttäuschung über die internationale Politik, welche nicht angemessen auf die Problematik der globalen Erwärmung reagiere. Crutzen sieht die technischen Optionen nicht als Alternative zu Emissionsreduktionen, sondern als Ergänzung zu emissionsmindernden Massnahmen.

Es gibt schwerwiegende ethische Bedenken – wer trifft den Entscheid über den Einsatz solcher Massnahmen, wer übernimmt die Verantwortung

für Nebenwirkungen, die regional unterschiedlich sein können und verschiedene Länder ungleich stark betreffen? Wesentliches Argument zur Erforschung technischer Methoden ist, dass das Erreichen der CO₂-Reduktion – selbst bei entsprechendem politischen Willen – ungewiss ist. So könnten technische Manipulationen als Übergangsmassnahmen betrachtet werden, die nur in Kombination mit Reduktionsanstrengungen zur Lösung des Klimaproblems führen. Ein Teil derjenigen, welche die Forschung im Geoengineering-Bereich unterstützen, sieht in den Methoden lediglich einen Notanker, der nur zur Vergrößerung des Handlungsspielraums für Emissionsszenarien und zur Verhinderung der schwersten Folgen der Klimaänderung eingesetzt werden sollte.

Andererseits gibt es Befürworter, welche Geoengineering als Ersatz für klimapolitische Massnahmen sehen. Sie argumentieren, dass mit technischen Mitteln die Erwärmung gestoppt werden könnte, ohne dass einschneidende Massnahmen zur CO₂-Reduktion ergriffen werden müssten. Eine Umstellung unseres Lebensstils und damit verbundene mögliche Einschränkungen könnten so abgewendet werden. Allerdings bleibt dabei die Tatsache unberücksichtigt, dass die Abhängigkeit von Erdöl aufgrund der geopolitischen Risiken und mittel- bis langfristig auch aufgrund der Endlichkeit der fossilen Ressourcen fragwürdig ist.

Die Befürworter sehen Geoengineering nicht nur als Alternative zu einer grundlegenden Umstellung, weil eine solche von der Gesellschaft abgelehnt wird. Sie betonen auch, dass technische Lösungen wesentlich billiger realisiert werden könnten als die erforderliche massive Reduktion der CO₂-Emissionen. Ob dieses Argument auch bei näherer Betrachtung tatsächlich Bestand hat, ist ungewiss. So wäre die erforderliche Investition bei der „Sonnenschirm-Variante“ beispielsweise gewaltig. Bei anderen Geoengineering-Massnahmen wäre die Anfangsinvestition zwar kleiner, dafür müssten die Folgekosten für das Aufrechterhalten der Massnahme berücksichtigt werden. Die Nettokosten technischer Lösungen sind daher nicht zu unterschätzen. Dazu kommen möglicherweise kostspielige Nebenwirkungen.

...oder gefährliches Experiment?

Wäre es nicht beruhigend, einen Notanker zu haben? Was spricht gegen eine solche Haltung? Die Gegner des Geoengineering, die häufig bereits Forschungsanstrengungen in diesem Bereich ablehnen, befürchten, dass die Aussicht auf einen Notanker als Bremse in der

Klimapolitik wirken könnte. Sie weisen darauf hin, dass bereits die Aussicht auf den möglichen Einsatz einer „Pflasterlimethode“ den Druck zur Senkung der Treibhausgasemissionen stark abschwächen würde. Anstrengungen zu grundsätzlichen Veränderungen, z.B. in Bezug auf den Energieverbrauch und die Nachhaltigkeit unserer Energieversorgung, liefen Gefahr zu versanden.

Geoengineering-Methoden, welche nicht gleichzeitig zu einer Reduktion der CO₂-Konzentration im Atmosphäre-Ozean-System führen, haben den Nachteil, dass die negativen Effekte der höheren CO₂-Konzentration bestehen bleiben, insbesondere die als sehr problematisch beurteilte Versauerung der Ozeane (The Royal Society, 2005). Ein erhöhter CO₂-Gehalt hat auch ohne Temperaturzunahme schwerwiegende Auswirkungen auf das Meeresökosystem. Auch die Nachhaltigkeit jener Methoden, welche zur Bindung des CO₂ durch Meeresorganismen führen, um es auf dem Meeresboden zu deponieren (Eisensulfatdüngung, Pumpsysteme zur Umwälzung des Meerwassers), ist unsicher. Letztlich wird dadurch die totale Kohlendioxidmenge im Ozean-Land-Atmosphäre-System nicht vermindert und die Frage, ob zukünftige Bedingungen die Sicherheit des Depots gewährleisten, kann heute nur sehr schlecht oder gar nicht beantwortet werden.

Ethische Argumente spielen im Hinblick auf die Erforschung und potenzielle Anwendung technischer Massnahmen ebenfalls eine Rolle. Der Einsatz von Geoengineering zwingt zukünftige Generationen dazu, diese Massnahme weiterzuführen und zu bezahlen. Denn alle beschriebenen Methoden bedingen eine ständige Wiederholung respektive Aufrechterhaltung der Massnahmen. Bei einem plötzlichen Stopp könnte es zu einem noch sehr viel rascheren als dem heute beobachteten Temperaturanstieg kommen (Matthews and Caldeira, 2007).

Nebst diesen Argumenten, welche sich generell gegen Geoengineering richten, haben sämtliche beschriebenen Methoden weitere individuelle Nebenwirkungen:

Zum Beispiel hat die *Eisendüngung* eine Verringerung des Sauerstoffgehaltes in den tieferen Schichten des Ozeans zur Folge, da der von der Oberfläche exportierte organische Kohlenstoff in diesen Schichten abgebaut wird. In gewissen Regionen kann diese Zehrung zu hypoxischen Bedingungen führen, d.h. sehr tiefen Sauerstoffkonzentrationen, die für viele Fische und andere höhere Organismen nicht mehr ausreichend

sind. Der verstärkte Abbau von organischem Material und die tieferen Sauerstoffkonzentrationen führen zu einer starken Zunahme der marinen Produktion von Lachgas (N_2O) im Meer, welches dann in die Atmosphäre gelangt (Jin und Gruber, 2003). Da N_2O ein 200mal stärkeres Treibhausgas ist als CO_2 , kann der Prozess letztlich zu einer noch stärkeren Erwärmung führen. Im Weiteren verändert die Eisendüngung die Meeresökosysteme in einer noch weitgehend unbekanntem Art und Weise.

Bei der *Sonnenschirm-Variante* sind die offensichtlich problematischen Aspekte die Verschärfung des bereits bestehenden Problems des Weltraumschrotts sowie die Frage, was nach Ablauf der Lebensdauer der Segel passiert.

Die *Zuführung von Schwefelteilchen in die Atmosphäre* könnte zwar den Temperaturanstieg im globalen Mittel mindern oder stoppen. Hingegen sind Veränderungen im Niederschlagsregime wahrscheinlich. Trenberth und Dai (2007) zeigten dies anhand einer Untersuchung der Wirkung eines Vulkanausbruchs, welcher gebietsweise zu Dürren führte. Überdies könnte eine konstante Erhöhung der Aerosolkonzentration in der Stratosphäre zu Ozonverlusten führen und die Ozonschicht schwächen, die die gefährliche UV-Strahlung von uns fernhält.

Welche Auswirkungen eine *Verstärkung der maritimen Stratocumulusbewölkung* auf die Meteorologie und Dynamik der globalen Atmosphäre hat, ist zur Zeit völlig unerforscht. Gefährliche Veränderungen von Wetter und Klima auch über den Kontinenten lassen sich zur Zeit nicht beurteilen und nicht ausschliessen.

Wird das *Meerwasser durch ein Pumpsystem umgewälzt*, so ist die Nettoaufnahme von CO_2 aus der Atmosphäre sehr gering. Das liegt daran, dass nebst den Nährstoffen auch CO_2 aus den tieferen Schichten hochgepumpt wird, welches dann bevorzugt gebunden wird, so dass der Bedarf für eine zusätzliche Aufnahme aus der Atmosphäre stark reduziert wird. Das bedeutet, dass diese Massnahme eine äusserst beschränkte Wirksamkeit hat. Es ist sogar möglich, dass das Gegenteil passiert. Falls die Algen weniger stark wachsen als erhofft (z.B. durch Eisenlimitierung), würde das hochgepumpte CO_2 in die Atmosphäre entweichen und so die Klimaänderung anheizen.

Zusätzlich zu diesen bereits bekannten Nachteilen bergen Geoengineering-Methoden aufgrund des beschränkten Verständnisses des globalen Klimasystems und dessen Wechselwirkungen mit den Ökosystemen der Erde das Risiko unabseh-

barer Folgen. Dieses Risiko müsste nebst den bereits abschätzbaren Nebenwirkungen beim Vergleich mit anderen Massnahmen berücksichtigt werden.

Fazit

Die Diskussion über Geoengineering zeigt, dass das Vertrauen in den Willen und die Durchsetzbarkeit einschneidender politischer Massnahmen zur Emissionsreduktion beschränkt ist. Die Befürworter von Forschungsanstrengungen im Geoengineering-Bereich argumentieren mit den geringen Fortschritten in der Klimapolitik. Die Gegner befürchten, dass bereits die theoretische Auseinandersetzung mit „technischen Lösungen“ den politischen Prozess zusätzlich bremsen könnte.

Restriktive klimapolitische Massnahmen werden aus Furcht vor Einschränkungen – beispielsweise in Bezug auf die Mobilität – und Verminderung der Lebensqualität abgelehnt. Auch befürchten viele Entwicklungsländer, dass sie durch solche Massnahmen an ihrer Entwicklung und Verbesserung ihrer Lebensgrundlagen eingeschränkt werden. Die gesellschaftliche Akzeptanz klimapolitischer Massnahmen kann nur erreicht werden, wenn die erforderlichen Veränderungen nicht als Bevormundung, sondern als Chance wahrgenommen werden.

Nebst der gesellschaftlichen Akzeptanz spielt auch die Kostenfrage von klimapolitischen Massnahmen eine entscheidende Rolle. Bei den Methoden des Geoengineering darf nicht vergessen werden, dass sie eine teure Massnahme darstellen, nicht nur in Bezug auf ihre technische

Kontaktpersonen:

Prof. Nicolas Gruber
ETH Zürich, Institut für Biogeochemie
und Schadstoffdynamik, CHN E 21.1,
Universitätstrasse 16, 8092 Zürich
Tel.: 044 632 03 52, Fax: 044 632 16 91
e-mail: nicolas.gruber@env.ethz.ch

Prof. Fortunat Joos
Physikalisches Institut, Klima- und Umweltphysik,
Universität Bern, Sidlerstr. 5, 3012 Bern
Tel. 031 631 44 61, Fax: 01 631 87 42,
e-mail: joos@climate.unibe.ch

Prof. Thomas Peter
ETH Zürich, Institut für Atmosphäre und Klima,
CHN O 12.1, Universitätstrasse 16, 8092 Zürich
Tel. 044 633 27 56, Fax: 044 633 10 58
e-mail: thomas.peter@env.ethz.ch

Realisierung, sondern auch in Bezug auf ihre noch nicht erforschten Nebenwirkungen. Da keine der Methoden das eigentliche Problem der Klimaerwärmung löst, sind sie in diesem Sinne nicht nachhaltig. Es stellt sich damit die Frage, welche Wirkung mit der Investition einer ähnlich grossen Geldmenge in klimapolitische Massnahmen erreicht werden könnte.

Zum heutigen Zeitpunkt ist eine abschliessende Beurteilung von technischen Lösungskonzepten unmöglich. Forschungsanstrengungen und daraus resultierende wissenschaftliche Erkenntnisse könnten eine bessere Einschätzung der Kosten

und Risiken ermöglichen, insbesondere wenn der Fokus nicht nur auf Machbarkeit und Wirkung, sondern auch auf mögliche Nebenwirkungen und langfristige Konsequenzen gelegt wird. Grundsätzlich ist aufgrund der bisherigen Erfahrungen von Eingriffen des Menschen in komplexe Systeme eine grosse Skepsis gegenüber Geoengineering angebracht. Das Ausmass der Folgen ist derzeit für keine der Methoden in umfassender Weise abschätzbar. Daher darf die Hoffnung auf einen solchen Behelf in keiner Weise die dringliche Umsetzung einer schlagkräftigen Klimapolitik beeinflussen.

Literatur

Düngung der Meere mit Eisensulfat

Parekh P., Joos F., and Müller S.A. (2007): The role of aeolian iron flux in controlling carbon dioxide fluctuations during Antarctic warm events. *Paleoceanography*, submitted.

Jin X., Gruber N., Frenzel H., Doney S.C. and McWilliams J.C. (2008). The impact on atmospheric CO₂ of iron fertilization induced changes of the biological pump, *Biogeosciences*, in press.

Jin X. and Gruber N. (2003): Offsetting the radiative benefit of ocean iron fertilization by enhancing N₂O emissions. *Geophysical Research Letters*, Vol. 30, No. 24, 2249, doi:10.1029/2003GL018458.

Sonnenschirme im Weltall

Angel R. (2006): Feasibility of cooling the Earth with a cloud of small spacecraft near the inner Lagrange point (L1). *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 103, No. 46, p. 17184–17189.

Early James T. (1989): Space-Based Solar Shield to Offset Greenhouse Effect, *J. Brit. Interplanetary Soc.*, 42, p. 567–69.

Schwefelinjektionen in die Atmosphäre

Crutzen P. (2006): Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: a contribution to resolve a policy dilemma? *Climatic Change*, DOI 10.1007/s10584-006-9101-y.

Trenberth K.E. and Dai A. (2007): Effects of Mount Pinatubo volcanic eruption on the hydrological cycle as an analog of geoengineering. *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, L15702, doi:10.1029/2007GL030524.

Verstärkung maritimer Stratocumuluswolken

Salter S.H., und Latham J., (2007): The reversal of global warming by the increase of the albedo of marine stratocumulus cloud. In: *Engineering and Technology*, August 2007, 28–31, siehe <http://www.see.ed.ac.uk/%7Eshs/Global%20warming/Albedo%20control/ET%20geo-eng.pdf>.

Umwälzung des Meerwassers

Lovelock J.E. and Rapley C.G. (2007): Ocean pipes could help the Earth to cure itself, *Nature*, Vol. 49, No 27, p. 403.

Hintergrund / Stellungnahmen

Keith D.W. (2001): Geoengineering and carbon management: Is there a meaningful distinction? *Greenhouse Gas Control Technologies: Proceedings of the 5th International Conference*. Williams D., Durie B., McMullan P., Paulson C. and Smith A. eds., CSIRO Publishing, Collingwood, Australia, p. 1192–1197.

Barker T. et al. (2007): Mitigation from a cross-sectoral perspective. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, p. 624–625.

The Royal Society (2005): Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. *Royal Society Policy Document 12/05*.

Matthews H.D. and Caldeira K. (2007): Transient climate-carbon simulations of planetary geoengineering. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 104, No. 24, p. 9949–9954.