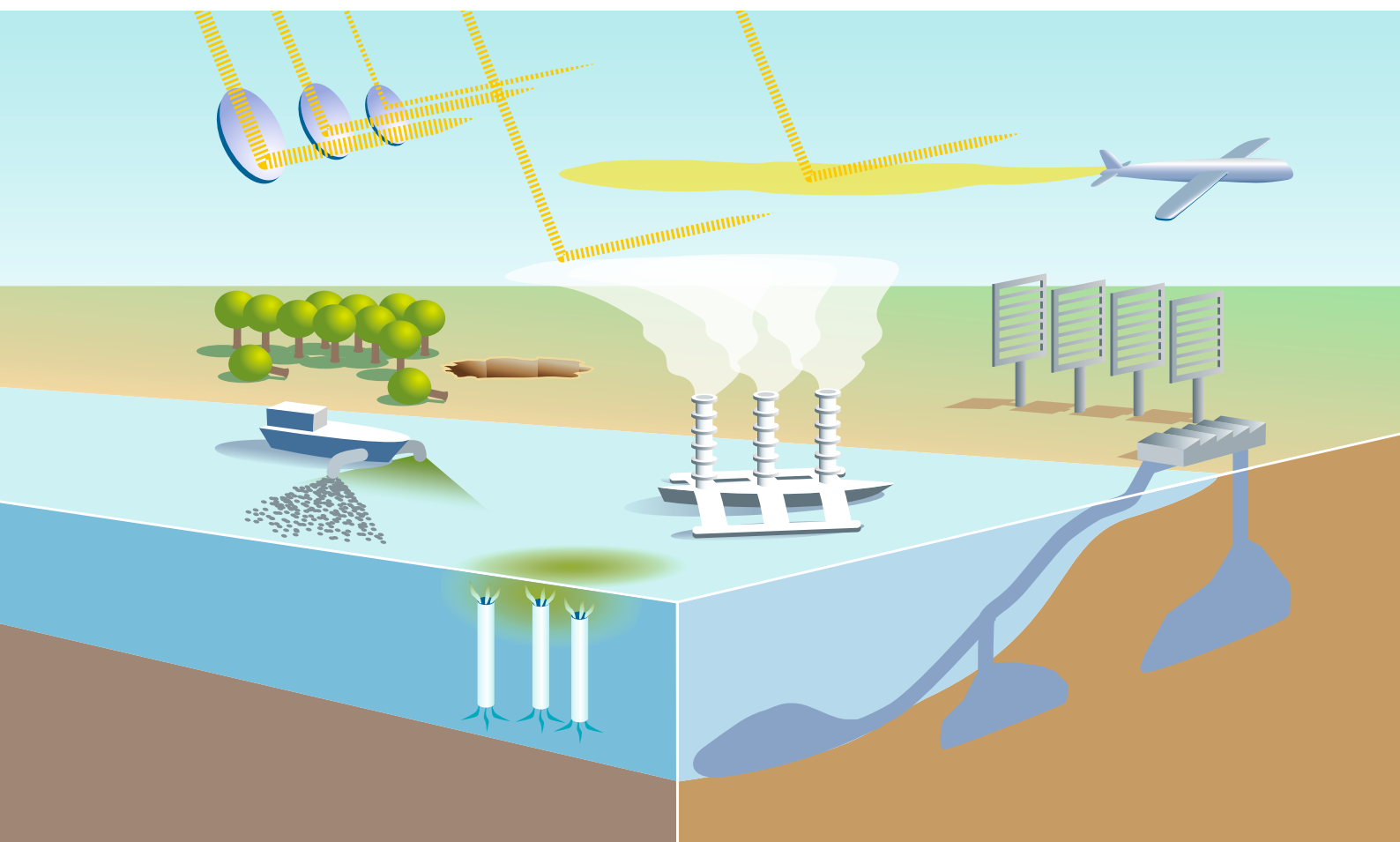


Jost Heintzenberg

Climate Engineering

Chancen und Risiken einer Beeinflussung der Erderwärmung

Naturwissenschaftliche und technische Aspekte



BEAUFTRAGT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

**Climate Engineering:
Chancen und Risiken einer Beeinflussung der Erderwärmung.
Naturwissenschaftliche und technische Aspekte**

Jost Heintzenberg
Leibniz-Institut für Troposphärenforschung
Permoserstr. 15
04318 Leipzig

Inhalt	Seite
Zusammenfassung	3
1. EINLEITUNG	6
2. METHODENKLASSIFIZIERUNG	7
3. VERRINGERUNG DER SOLARKONSTANTE	10
4. ERHÖHUNG DER PLANETAREN ALBEDO	11
4.1 Erhöhung der planetaren Albedo durch reflektierende Staubpartikel	12
4.2 Erhöhung der planetaren Albedo durch reflektierende Wolken	14
4.3 Erhöhung der planetaren Albedo durch reflektierende Landoberflächen	15
4.4 Erhöhung der planetaren Albedo durch Verringerung absorbierender Rußpartikel	16
5. ERHÖHUNG DER THERMISCHEN AUSSTRAHLUNG	18
5.1 Modifikation von Zirruswolken	18
5.2 Beschleunigung der physikalischen Kohlenstoffpumpe im Ozean	18
5.3 Beschleunigung der physikochemischen Kohlenstoffpumpe im Ozean	19
5.4 Beschleunigung der biologischen Kohlenstoffpumpe im Ozean	20
5.5 Erhöhung der Kohlenstoffbindung in terrestrischen Pflanzen und Pflanzenresten	22
5.6 Beschleunigung der natürlichen Verwitterung	23
5.7 Technische Entfernung von CO ₂ aus der Luft	24
6. SYNOPSE UND AUSBLICK	25
Literaturverzeichnis	29

Zusammenfassung

Das vorliegende Gutachten behandelt naturwissenschaftliche und technische Aspekte der Chancen und Risiken von Geoengineering zur Beeinflussung der Erderwärmung. Nach einer Eingrenzung des Themas von Geoengineering auf Climate Engineering (CE) wird, ausgehend von der Energiebilanz der Erde, eine Typisierung möglicher CE-Eingriffe vorgenommen. Physikalische Gesetze legen grundsätzlich die Möglichkeiten der globalen Klimabeeinflussung und bestimmen deren Typisierung. Damit werden die zu den einzelnen CE-Typen veröffentlichten Vorschläge im Lichte ihrer Effektivität, Nebenwirkungen und ihrem Stand der technischen Entwicklung diskutiert.

Während physikalische Gesetze grundsätzlich die Möglichkeiten der globalen Klimabeeinflussung festlegen, sind der Spekulation keine Grenzen gesetzt, immer neue Eingriffe in das Erdsystem vorzuschlagen, die die Folgen menschlicher Treibhausgasemissionen mildern sollen. Dementsprechend explodiert die Anzahl zugehöriger Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und die vorliegende Übersicht kann daher auch keine abschließende Zusammenstellung bieten. Trotz dieser raschen Zunahme von Veröffentlichungen zu CE liegt aus mehreren Gründen für keines der im Gutachten diskutierten Verfahren eine akzeptable Bewertung vor, die hier referiert und mit anderen CE-Ansätzen abschließend verglichen werden könnte. Zum ersten begrenzt der Stand der Erdsystemforschung die Möglichkeiten der Simulation einzelner CE-Ansätze. Insbesondere, die regionale Simulation von Klimavariablen, die über Temperaturangaben hinausgeht, ist noch weit davon entfernt, die möglichen Nebenwirkungen von CE zu erfassen. Zum zweiten ist zu beachten, dass die gewünschten Klimawirkungen und Nebenfolgen bisher oft nur auf Abschätzungen der Vertreter der entsprechenden Ansätze bauen, ohne dass diese von unabhängigen Gremien wie dem IPCC¹ überprüft wurden. Zum dritten steht eine kritische Beurteilung und Harmonisierung der zur Simulation von CE verwendeten Modelle aus. Auch hier wäre das IPCC das geeignete Gremium für diese Aufgabe.

Eine weitere, wesentliche Unsicherheit betrifft die Messung und Überwachung von CE-Maßnahmen. Anthropogene Klimaänderungen werden vor einem Hintergrund natürlichen Klimarauschens beobachtet. Um eine CE-Wirkung in der Größenordnung dieses Rauschens von der natürlichen Variabilität zu unterscheiden müsste mit den gegenwärtigen Satellitensystemen mindestens 10-15 Jahre gemessen werden. Allerdings ist die Stabilität der heutigen Satellitensysteme für solche Zeiträume keineswegs gesichert.

¹ IPCC = Intergovernmental Panel for Climate Change

Die Zahl der Patente zum Geoengineering stieg in den letzten Jahren rasch, und das vorliegende Gutachten erhebt mit den erwähnten geschützten Verfahren keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Sicherung eines CE-Patents sollte nicht als eindeutiges Zeichen der Annäherung an die Verwirklichung des dort genannten Verfahrens gedeutet werden. Oft sollen damit nur in ferner Zukunft liegende technische Möglichkeiten gegenüber potentiellen Konkurrenten gesichert oder auch nur gewisse technische Ansätze von der Verfolgung durch Andere ausgeschlossen werden. Dem Verfasser sind keine großtechnischen Verwirklichungen der im Gutachten diskutierten CE-Ansätze bekannt.

Grundlage aller CE-Forschung ist die Erdsystemforschung, mit der das vor jedem CE-Eingriff notwendige Systemverständnis und die mögliche Systemvorhersagbarkeit ermittelt werden. Mit einem globalen „Manhattan-Projekt der Klimaforschung“ halte ich es für möglich, das notwendige Erdsystemverständnis für eine abschließende Bewertung von CE in etwa zehn Jahren zu erzeugen. Das Ergebnis dieser Grundlagenforschung sind Erdsystemmodelle mit denen die Effektivität und Nebenfolgen potentiellen CEs simuliert werden können. Entsprechend den Unsicherheiten bei der Überwachung der Energiebilanz der Erde müssten Feldversuche zum Test von SRM von der Größenordnung eines global wirkenden Vulkanausbruchs über einen Zeitraum von mindestens einem Jahrzehnt betrieben werden um die Effektivität der Maßnahme vom Klimarauschen sicher unterscheiden zu können. Dies bedeutet aber praktisch schon den Einsatz der betreffenden CE-Maßnahme mit allen Nebeneffekten. Bei jeder Veränderung von Landoberflächen im Sinne von CE sind zunächst nur kleine Effekte auf die Energiebilanz zu erwarten, deren Betrag sehr schwer von den natürlichen Variationen der Bilanz zu unterscheiden wäre. Feldversuche zur Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre (CDR) erscheinen harmlos weil nur ein Treibhausgas entsprechend der Skala des Feldversuches entfernt würde. Abgesehen von dem völlig offenen Problem der Lagerung des entfernten CO₂ ist aber auch hier eine langjährige CO₂-Entnahme notwendig, bevor die Minderung gegenüber der natürlichen Variabilität des Kohlenstoffkreislaufs messbar wird. Die bei mariner Sequestrierung notwendige Skala von Feldexperimenten um die Folgen für die gesamte marine Nahrungskette zu erkennen schließt wohl auch hier einen alle Forderungen befriedigenden Feldversuch aus. Aerosol- und Wolkenforschung zum Prozessverständnis möglicher diesbezüglicher CE-Ansätze können im Labor und auf kleiner Feldskala ohne großes Risiko für Nebenwirkungen durchgeführt werden. Dies gilt wohl auch für Prozessforschung bei der CE-Technologieentwicklung.

Zwei Grundprobleme betreffen nahezu alle bisherigen CE-Ansätze. Zum ersten wird vor Entwicklungspfaden des Erdsystems gewarnt, auf denen gewollt oder ungewollt Zustände

auftreten, die deutlich über gewissen Grenzen oder Kipppunkten liegen. Nach Überschreiten dieser Grenzen ist mit regionalen oder sogar globalen Hystereseerscheinungen zu rechnen, die eine Rückkehr in den heutigen Zustand des Klimasystems erschweren bzw. stark verzögern würden. Grundsätzlich hängt die Reversibilität von Klimaeingriffen von der Stärke und der Dauer des Eingriffs ab. Während eine Sonnenfinsternis zwar messbare Wetteränderungen verursacht, die in kürzester Zeit wieder ausgeglichen werden, führen Eingriffe auf Zeitskalen von Jahrzehnten oder Jahrhunderten zu Systemveränderungen, die nur von Prozessen, die auf den betreffenden Zeitskalen wirken, ausgeglichen werden. Dabei ist zu beachten, dass das chaotische Erdsystem Bifurkationen zulässt, die eine Rückkehr zu gegebenen Ausgangslagen des Klimas möglicherweise erst nach Durchlaufen langer Hystereseschleifen zulassen.

Das zweite Problem steht im Zusammenhang mit den in jedem Fall notwendigen extrem langen Anwendungszeiten. Grundsätzlich besteht bei jeder CE-Maßnahme die Möglichkeit einer gleitenden Reduktion entsprechend den zugehörigen technischen Möglichkeiten, die schon den Aufbau des betreffenden CE-Einsatzes bestimmen. Allerdings ist bei einem möglichen Ausstieg zu beachten, dass das Klimasystem von seinem dann herrschenden Zustand nicht notwendigerweise auf direktem Wege zu seinem Zustand vor dem CE-Einsatz zurückkehren wird. Erste Klimamodellrechnungen zeigen, wie empfindlich das Klima mit katastrophalen Temperaturerhöhungen auf einen plötzlichen Ausfall einer Jahrhunderte langen Stratosphärenbeeinflussung reagieren würde. Sowohl Oberflächentemperaturen als auch CO₂-Konzentrationen nach einem solchen CE-Stopp möglicherweise auf Werte, wie sie ohne diese Eingriffe nicht erreicht worden wären.

1. EINLEITUNG

Das Geoengineering begann mit dem Übergang des Menschen von einer Ernährung als Jäger und Sammler zu Agrarwirtschaft, weil diese Erfindung eine Veränderung der Oberflächeneigenschaften der Erde und erste Veränderungen der Zusammensetzung der Atmosphäre zur Folge hatte. Heute umfasst der Begriff Geoengineering eine große Anzahl von Eingriffen in das Erdsystem, die auf weiten Skalenbereichen in Raum und Zeit stattfinden. Diese Eingriffe können unterschiedliche Ziele im Auge haben, Wetter und Klima sind nur zwei davon. Die Beeinflussung von Wettersystemen kann volkswirtschaftlich begründet sein wie Projekt *Cirrus* (1982) und Projekt *Stormfury* (Willoughby et al., 1985) oder aus militärischen Gesichtspunkten zur Schlachtfeldbeeinflussung dienen (Hoffman, 2002). Auch gesundheitliche Aspekte können zu Geoengineeringansätzen führen wie zum Beispiel Pläne zur Stabilisierung der stratosphärischen Ozonschicht (Cicerone et al., 1991).

Die vorliegende Sondierungsstudie konzentriert sich auf Climate-Engineering (CE) im Sinne von Maßnahmen, die die Energiebilanz des gesamten Erdsystems in Richtung einer Abkühlung oder zumindest im Sinne einer Verringerung des weltweiten Temperaturanstiegs zu beeinflussen suchen. Nicht behandelt werden dabei Maßnahmen, die eine Vermeidung von Treibhausgasen bevor diese die Atmosphäre erreichen zum Ziel haben. Ebenfalls ausgeschlossen werden CE-Maßnahmen, die einer mit der globalen Erwärmung verbundene Meeresspiegelerhöhung entgegen wirken sollen (siehe z.B. Moore et al., 2010).

2. METHODENKLASSIFIZIERUNG

Ausgangspunkt der Untersuchung ist die Energiebilanz des Erdsystems am Oberrand der Atmosphäre. Auf planetarer Skala wird diese Bilanz von zwei Größen bestimmt. Diese sind der am Oberrand der Atmosphäre zur Verfügung stehende einfallende, kurzwellige Sonnenenergiefluss S , (auch Solarkonstante genannt, $S \approx 1370 \text{ Watt m}^{-2}$) und die Gesamtrefektion von Sonnenstrahlung durch das Erdsystem A_p (planetare Albedo, $A_p \approx 30\%$). Vermindert um die Reflektion steht dem Erdsystem zur Verfügung ein kurzwelliger Sonnenstrahlungsfluss $F_k = S (1 - A_p)$ in Watt m^{-2} zur Verfügung. Im Energiegleichgewicht muss dieser gleich dem ausgestrahlten, langwelligen, thermischen (Infrarot)-Strahlungsfluss $F_l = \sigma T^4$ ($\sigma = \text{Stefan-Boltzmann-Konstante}$) in Watt m^{-2} sein: $F_k = F_l$, d.h. Es wird genau so viel Sonnenenergie eingestrahlt wie thermische Energie ausgestrahlt wird.

Seit Beginn der Industrialisierung wird dieses Energiegleichgewicht zunehmend und in mehrfacher Weise gestört: Hauptsächlich durch die Anreicherung zusätzlicher Treibhausgase, die F_l verringern (IPCC, 2007), über Wärmerückkopplung auch die Konzentration des Haupttreibhausgases Wasserdampf (Manabe und Wetherald, 1967), in der Stratosphäre möglicherweise auch eine Wasserdampfzunahme aus Methanoxidation (Myhre et al., 2007), aber auch durch Veränderungen der Erdoberfläche (Pongratz et al., 2009) und der Sonnenstrahlung reflektierenden Staubpartikel, die A_p verändern (Charlson et al., 1990; Tsigaridis et al., 2006), möglicherweise auch durch Wolkenveränderungen (Heintzenberg und Charlson, 2009). Zurzeit verbleiben deshalb $\approx 0.9 \text{ Watt m}^{-2}$ mehr Energie im Erdsystem als abgestrahlt werden (Hansen et al., 2005; Trenberth et al., 2009). Als Folge davon muss es wärmer werden und zwar so lange bis die dadurch erhöhte Wärmeausstrahlung F_l die Energiebilanz wieder ausgleicht.

Wegen der großen Wärmekapazität der Weltmeere (Cess und Goldenberg, 1981) wurde nur ein Teil der Erwärmung durch die bisher während der Industrialisierung der letzten 150 Jahre zusätzlich emittierten Treibhausgase sichtbar und auch die zukünftigen Treibhausgas bedingten globalen Erwärmungen werden erst mit Verzögerungen von mehreren Jahrzehnten in voller Höhe spürbar werden (Hansen et al., 2005).

Eine sehr viel längere Verzögerung gilt für die natürliche Entfernung zusätzlicher Treibhausgase aus der Atmosphäre. Für das wichtigste anthropogene Treibhausgas CO_2 zieht sich dieser Prozess über viele Jahrhunderte hin, wonach immer noch mehr als 20% des CO_2 für mehr als 1000 Jahre in der Luft bleiben (Archer, 2008; Solomon et al., 2009) bis der Rest durch langsame geologische Prozesse ausgeglichen wird.

Die im Folgenden diskutierten Möglichkeiten des CE orientieren sich an den Komponenten der bei der Beschreibung der Ausgangslage geschilderten Energiebilanz des Erdsystems. Dem entsprechend stehen potentiell CE zur Kompensation oder zur Verringerung der Treibhausgas-bedingten Erwärmung drei Komponenten der Energiebilanz zur Verfügung:

1. Verringerung der Solarkonstante S ,
2. Erhöhung der planetaren Albedo A_p ,
3. Erhöhung der thermischen Ausstrahlung des Erdsystems F_1 .

Als allgemeiner Vorbehalt bei CE-Ansätzen, die die ersten beiden Komponenten betreffen, ist zu beachten, dass selbst bei ihrer vollkommenen Verwirklichung zur Reduktion der globalen Mitteltemperatur wegen der Form der Erde mit verbleibenden Unterschieden zwischen niedrigen und hohen Breiten zu rechnen ist. Die Pole verbleiben also relativ wärmer und die Tropen relativ wärmer als den mittleren Verhältnissen entsprechen. Der bis zum CE-Einsatz zu verzeichnende Verlust an polarem Meereis müsste durch eine Überkompensation der Erwärmung in den Tropen ausgeglichen werden um sowohl dem erhöhten Wärmeinhalt der Ozeane, einer verstärkten zonalen Winterzirkulation als auch der anthropogen veränderten thermischen Ausstrahlung der Erde zu begegnen (Ammann et al., 2010).

Tabelle 1 gibt eine Übersicht der im Folgenden diskutierten CE-Maßnahmen. Maßnahmen zur Beeinflussung des kurzwelligen Sonnenstrahlungsflusses (F_k) werden als Solar Radiation Management (SRM) bezeichnet, Maßnahmen zur Beeinflussung des langwelligen thermischen Strahlungsflusses (F_1) als Thermal Radiation Management (TRM). Zusätzlich lassen sich die Maßnahmen danach unterscheiden, ob sie die anthropogene Beeinflussung der Albedo und der Treibhausgaskonzentration reduzieren oder kompensieren.

Tabelle 1: Überblick über die verschiedenen CE-Maßnahmen

Kürzel	Prozess	CE-Maßnahme	kompensierend	reduzierend
SRM	Reduktion der Einstrahlung	Modifikationen im Weltall	x	
	Erhöhung der Reflektion von Sonnenstrahlung	Modifikation der Erdoberfläche	x	
		Modifikation mariner Schichtwolken	x	
		Modifikation der Stratosphäre	x	
TRM	Erhöhung der TR-Ausstrahlung von Atmosphärenkomponenten	Modifikation von Zirruswolken	x	
		Reduktion TR-absorbierender Atmosphärenkomponenten (CDR)		
	physikalisch/ Ozean		x	
	chemisch/ Ozean		x	
	biologisch/ Ozean		x	
	biologisch/ Land		x	
chemisch/ Land		x		

Derzeit werden innerhalb des SRM nur kompensierende Maßnahmen diskutiert. Als reduzierende SRM Maßnahme würden die Entfernung von Rußpartikeln aus der Atmosphäre dienen, da diese Sonnenstrahlung absorbieren und damit das Erdsystem erwärmen. Wegen der relativ kurzen Aufenthaltsdauer von Ruß in der Atmosphäre setzen effektive Maßnahmen hier allerdings an, bevor die Rußpartikel in die Atmosphäre emittiert werden. Dementsprechend stellen solche Maßnahmen kein CE da, sondern fallen in den Bereich der herkömmlichen Emissionsvermeidung. Da sich die Rußeffekte auf die Energiebilanz allerdings auch nach seiner natürlichen Entfernung aus der Atmosphäre noch in einer Albedoerniedrigung heller Landoberflächen fortsetzen können, wird der Ruß in Kapitel 4.4 dieses Gutachtens aufgenommen.

3. VERRINGERUNG DER SOLARKONSTANTE

Am inneren Lagrangeunkt (L1), 1,6 Millionen Kilometer von der Erde heben sich die Anziehungskräfte von Erde und Sonne auf. Nach einer Idee von Early (1989) schlug Angel (2006) vor, dass dorthin über einen Zeitraum von einigen Jahrzehnten verbrachte Millionen von Spiegeln eine 100000 Kilometer lange und 13000 Kilometer breite spiegelnde Wolke erzeugen könnten, die die Solarkonstante S in der Energiebilanz der Erde um etwa 1.8% verringert um dadurch die menschenbedingte globale Erwärmung aufzuheben. Eine erste Simulation dieser Erniedrigung mit einem einfachen Klimamodell (Govindasamy und Caldeira, 2000) zeigte, dass tatsächlich die räumlichen und zeitlichen Klimaänderungen durch das anthropogene CO_2 deutlich verringert würden.

Außerhalb der Erdatmosphäre aber noch auf einer Umlaufbahn um die Erde schlagen Mautner (1991) und Pearson et al. (2006) reflektierende Schirme oder fein verteilten Staub mit einer Gesamtmasse, die etwa einem Asteroiden entspricht, vor.

Lunt et al. (2008) untersuchen mit einem gekoppelten allgemeinen Zirkulationsmodell (GCM) die möglichen Folgen dieses CE-Ansatzes und finden bei einer signifikanten Abkühlung in den Tropen eine Erwärmung mit Meereisabnahme in hohen Breiten. Darüber hinaus zeigt ihr Modell eine Abschwächung des Wasserkreislaufes, der Variabilität des ENSO-Phänomens² und der atlantischen Tiefenwasserbildung. Sie weisen darauf hin, dass mit diesem CE-Ansatz das Problem der Meeresversauerung nicht gelöst würde. Nach den Modellrechnungen von Caldeira und Wood (2008) wäre die starke arktische Meereisabnahme allerdings vermeidbar.

Stand der technischen Entwicklung

Mautner (1991) schätzt die mit vorhandener Technologie auszubringenden Reflektoren auf weniger als 1% der durch die globale Erwärmung verursachten Kosten ab. Eine Sonnenumlaufbahn am L1-Punkt ist als Sattelpunkt prinzipiell instabil, sodass die Position dieser Wolke dauernd korrigiert werden müsste. Trotzdem werden für die Lebensdauer einer solchen Wolke von den Protagonisten 50 Jahre angesetzt. Ein europäisches Patent hierzu wurde 2008 angemeldet (Wakefield, 2008). Die US-Firma *Star Technologies and Research Inc.* verfolgt die von Pearson et al. (2006) vorgeschlagene Idee.

² ENSO = Quasi-periodische Umstellung von Meeres- und Luftzirkulation über dem südlichen Ozean

4. ERHÖHUNG DER PLANETAREN ALBEDO

Ein Großteil ($\approx 60\%$) des an der Obergrenze der Atmosphäre einfallenden solaren Strahlungsflusses durchdringt die Atmosphäre ungehindert bis er an der Erdoberfläche reflektiert oder absorbiert wird (siehe Abb. 1). Eine Reihe von CE-Vorschlägen setzt hier an um durch Maßnahmen in der Atmosphäre oder an der Erdoberfläche die planetare Albedo A_p zu erhöhen und dadurch die Zufuhr solarer Energie zu verringern um damit der globale Erwärmung zu begegnen. Der Mittelwert von A_p liegt bei 0.3, d.h. im Langzeitmittel über alle Wellenlängen der Sonnenstrahlung reflektiert die Erde 30% der einfallenden Sonnenstrahlung.

Unterschiedliche Oberflächen unterscheiden sich stark in ihrer Reflektionsfähigkeit (siehe Tabelle 2), sodass es denkbar wird, durch gewollte Oberflächenänderungen die planetare Albedo zu erhöhen um einer Erwärmung zu begegnen. Schon an dieser Stelle ist jedoch zu bedenken, dass dadurch der gesamte Energiehaushalt der Erde beeinflusst wird, insbesondere die wichtige, in Abb. 1 „latent heat“ genannte Komponente, die von großer Bedeutung für den lebenswichtigen Wasserkreislauf ist. Bei allen Oberflächenänderungen mit Klimafolgen sind grundsätzlich die vorgenannten biogeophysikalischen von biogeochemischen Effekten zu unterscheiden. Nach Klimamodellrechnungen von Pongratz et al. (2010) haben erstere im Zuge der Industrialisierung ein leicht kühlenden Effekt gehabt. Letztere wirken vor allem über eine Beeinflussung des Kohlenstoffkreislaufs und hatten in den letzten 150 Jahren nach Pongratz et al. (2010) ein deutlich stärkeren aber erwärmenden Effekt.

Tabelle 2 Albedo unterschiedlicher Oberflächen

Oberfläche	Albedo (%)
Frischer Schnee	80-90
Wolken	60-90
Wüste	30
Unbestellte Felder	26
Wald	5-18
Wasserfläche, je nach Einfallswinkel	3-22

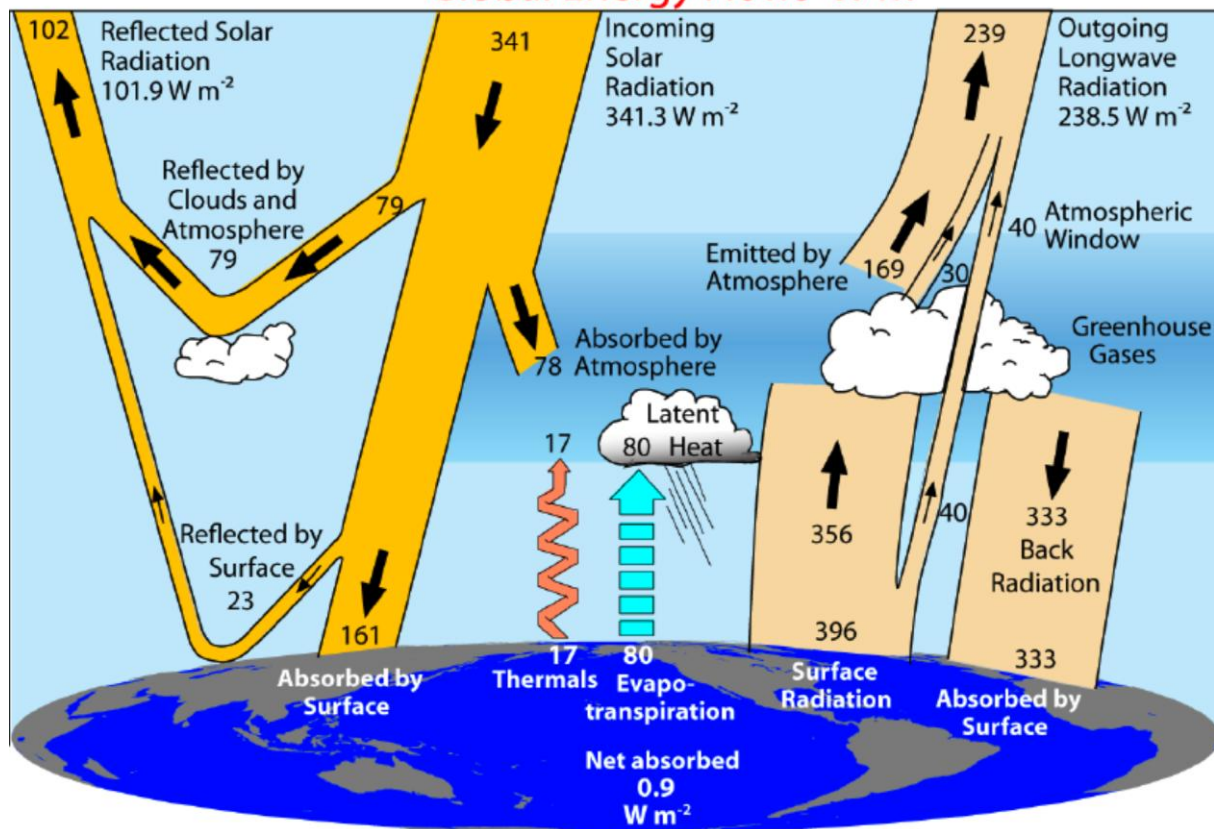


Abb. 1 Strahlungshaushalt der Erde nach Trenberth et al. (2009)

4.1 Erhöhung der planetaren Albedo durch reflektierende Staubpartikel

Paul Crutzen belebte 2006 ein Idee von Budyko (1982) neu, Schwefeldioxid in die Stratosphäre einzubringen (Crutzen, 2006; Wigley, 2006; Rasch et al., 2008), das dann nach Umwandlung als Wolke von Schwefelsäuretröpfchen die planetare Albedo erhöhen würde. Diese Idee gleicht früheren Vorschlägen reflektionserhöhende Materialien in die Stratosphäre einzubringen (Dickinson, 1996; Teller et al., 1997; Keith, 2000). Trotz ihrer Schwererreichbarkeit bietet sich die Stratosphäre für solche Maßnahmen an, weil sie weitgehend frei von reinigenden Wetterprozessen ist und daher eingebrachtes Material dort für lange Zeit wirksam bleiben könnte. Dieser Vorschlag belebte die CE-Diskussion seither ungemein (Bengtsson, 2006; Cicerone, 2006; Kiehl, 2006; Lawrence, 2006; Mc Cracken, 2006). Pierce et al. (2010) modifizierten die Technik zur Schwefeleinbringung in ihrem Vorschlag um eine ungewünschte Erwärmung der unteren Stratosphäre zu vermeiden. Die ersten Angaben zur Menge der Injektionen wurde nach oben (Katz, 2010) und die erwartete stratosphärische Aufenthaltsdauer der Aerosole wurde nach unten korrigiert (Tuck et al.,

2008). Eine Reihe weiterer Vorschläge und Modellrechnungen zur Effektivität verschiedener Vorschläge (Lenton und Vaughan, 2009) und zu den möglichen Nebeneffekten (Govindasamy et al., 2003; Tilmes et al., 2008; Heckendorn et al., 2009; Murphy, 2009; Jones et al., 2010) wurden veröffentlicht.

Robock (2008) gibt eine Liste von 20 Gründen an, warum diese Art von CE abzulehnen ist, worunter auch eine erhöhte Azidität im Niederschlag gehört, was wiederum in einer Modelstudie von Kravitz et al. (2009; 2010) als vernachlässigbar bezeichnet wurde. Darüber hinaus wurden mögliche negative Effekte auf den globalen Wasserkreislauf aus dem Vergleich der vorgeschlagenen Stratosphärenmanipulation mit dem größten Vulkanausbruch des 20. Jahrhunderts, Pinatubo, von Hegerl and Solomon (2009) abgeleitet. In Modellrechnungen von Ricke et al. (2010) war es nicht möglich, eine Abkühlung durch Albedoerhöhung bei stabilen Niederschlagsverhältnissen zu erreichen. Allerdings argumentieren Irvine et al. (2010) mit ihren GCM-Simulationen etwas optimistischer, was die Möglichkeiten betrifft, bei einer Verringerung der solaren Einstrahlung verschiedene gegenläufige regionale Nebeneffekte zu beherrschen. Ban-Weiss und Caldeira (2010) und Eliseev et al. (2010) schlagen Optimierungsmaßnahmen bei der Breitenverteilung des eingebrachten stratosphärischen Aerosols vor um die negativen Nebenwirkungen zu minimieren.

Als positiver Nebeneffekt wird die Erhöhung der durch die Sulfatpartikel erhöhten diffusen Sonnenstrahlung genannt, die sich positiv auf die Pflanzenproduktivität auswirkte (Roderick et al., 2001; Mercado et al., 2009).

Stand der technischen Entwicklung

Seit der Erkenntnis, dass menschliche Aktivitäten die Zusammensetzung der Stratosphäre gefährden werden technische Eingriffe mittels Aerosolen diskutiert. Ein Patent aus dem Jahr 1991 behandelt schon das Einbringen von Aerosolen in die Stratosphäre (Chang, 1991). Ein neueres Patent behandelt ein Verfahren, in dem Treibstoffzusätze in Verkehrsflugzeugen zum Ausbringen Sonnenreflektierender Substanzen genutzt werden soll (Mark, 2009). Eine von Microsoft finanzierte Firma *Intellectual Ventures* fördert die Entwicklung eines „Stratoshield“ genannten Verfahrens, bei dem die Aerosolerzeugung in der Stratosphäre über einen Ballon getragenen Schlauch vom Erdboden aus laufen soll. Mittels photophoretischer Kräfte will Keith (2010) spezielle Partikel bis über die Stratosphäre hinaus levitieren um deren Lebensdauer zu erhöhen und Auswirkungen auf die Ozonchemie zu verringern. Robock et al. (2010) geben Argumente dafür, dass Feldtests der stratosphärischen

Aerosolverstärkung nur auf globaler Skala sinnvoll wären, dass dann aber mit allen möglichen Nebeneffekten zu rechnen wäre.

4.2 Erhöhung der planetaren Albedo durch reflektierende Wolken

Die Grenzschichtbewölkung über den Weltmeeren zeichnet sich in mehrfacher Hinsicht als mögliche Erdsystemkomponente für CE-Ansätze mit Bezug auf A_p aus. Diese niedrigen Wolken bedecken große Teile der Ozeane; sie sind besonders empfindlich für gewisse mikrophysikalische Einflussnahmen (Schwartz und Slingo, 1996); sie schweben über dem natürlichen Medium Seewasser, das zur Einflussnahme genutzt werden kann und sie sind relativ leicht zugänglich. Diese Voraussetzungen führten zu dem Vorschlag von John Latham und Kollegen (Latham, 1990; Bower et al., 2006; Latham et al., 2008; Salter et al., 2008), in dem von Schiffen Seewasser versprüht wird um die Anzahl der hocheffektiven Seesalzkondensationskerne für Wolkentropfen zu erhöhen. Dadurch soll erreicht werden, dass entsprechend dem so genannten Twomey-Effekt (Twomey, 1974) die mittlere Tropfengröße sinkt, was bei festem Flüssigwassergehalt eine erhöhte Wolkenalbedo zur Folge hätte. Die vorschlagenden Wissenschaftler hoffen gleichzeitig, dass mit dieser Maßnahme die Lebensdauer der marinen Wolken entsprechend einer Studie von Albrecht (1989) erhöht würde, was eine weitere Erhöhung der planetaren Albedo zur Folge hätte. Als Hauptargument für die Funktionsfähigkeit eines solchen Ansatzes wird oft das Beispiel von durch Rauchemissionen von Schiffen aufgehellte marine Wolken genannt, die im Satellitenbild deutlich zu sehen sind (Coakley Jr. et al., 1987). Insbesondere das Argument einer erhöhten Lebensdauer der Wolken wird allerdings von neueren Untersuchungen (Jiang et al., 2006; Small et al., 2009; Stevens und Feingold, 2010) zunehmend in Frage gestellt.

Als Nebeneffekt wird eine Veränderung des globalen Wasserkreislaufes in Richtung einer globalen Verringerung der Niederschläge und einer Reduktion des Wasserabflufs von den Kontinenten vermutet (Trenberth und Dai, 2007; Bala et al., 2008). Jüngste Modellstudien finden allerdings deutlich geringere Nebeneffekte auf den Wasserkreislauf (Bala et al., 2008; Bala et al., 2010).

Mittels Rechnungen mit einem globalen Aerosoltransportmodell finden Korhonen et al. (2010), dass die ausgebrachten Seesalzpartikel dieses CE-Ansatzes in manchen Gebieten negative Effekte auf marine Wolken haben können. Selbst mit fünfmal höheren Partikelkonzentrationen als bisher angenommen zeigen diese Modellrechnungen einen

geringeren Albedoeffekt als frühere Abschätzungen. Die Verfasser weisen auch auf zu erwartende Reduktionen von Schwefelkomponenten in den eingesäten Gebieten, deren Wirkungen noch zu untersuchen wären.

Stand der technischen Entwicklung

Auch die Entwicklung von technischen Verfahren zur Aufhellung mariner Wolken wird durch die von Microsoft finanzierte Firma *Intellectual Ventures* gefördert.

4.3 Erhöhung der planetaren Albedo durch reflektierende Landoberflächen

Grundsätzlich ist eine anthropogene Erhöhung der Albedo von natürlichen und künstlichen Landoberflächen denkbar und findet ja auch schon seit etwa 10.000 Jahren statt. Der landwirtschaftlich nutzbare Teil der Erdoberfläche wird heute schon praktisch voll genutzt (CIA, 2011), sodass einer Ausweitung des kultivierten Flächenanteils für globale CE-Maßnahmen enge Grenzen gesetzt sind. Auch zeigen Doughty et al. (2010), dass die notwendigen Albedoänderungen mit den heutigen Pflanzen nicht möglich sind. Bei jeder Ausweitung auf Kosten weniger fruchtbarer oder unfruchtbarer Flächen wäre mit Biodiversitätsminderungen zu rechnen (Govindasamy et al., 2002; Huston, 2005). Bei natürlichen Oberflächen gilt bei jeder damit verbundenen Vegetationsänderung die Beachtung möglicher Einflüsse auf den Kohlenstoffkreislauf, die beispielsweise bei einer Änderung von Wald- in stärker reflektierende Grassflächen die terrestrische CO₂-Senke verändern können. Daneben sind Einflüsse auf die Flüsse von Energie, Wasserdampf und Impuls zu beachten (Marland et al., 2003), sodass eine durch Aufforstung erreichte Verringerung atmosphärischer CO₂-Mengen teilweise durch gegenläufige Klimaeffekte kompensiert werden. Gemittelt über große Flächen können tropische Wälder als kühlend und boreale Wälder als wärmend angesehen werden (Bathiany et al., 2010).

Singarayer et al (2009) und Ridgwell et al. (2009) schlagen ein „Bio-Geoengineering“ vor, um der anthropogenen Erwärmung dadurch zu begegnen, dass Variationen von Nutzpflanzen mit spezifischem Blattglanz und/oder Gestalt angebaut werden, mit denen die Albedo der betreffenden Agrarflächen maximiert wird. Mit einem gekoppelten Klimamodel des Hadley Centers simulieren sie mit diesem Effekt eine sommerliche Abkühlung von mehr als einem Grad Celsius über großen Teilen der nordhemisphärischen Landmassen, was der Kompensation etwa eines Fünftels der Erwärmung bei CO₂-Verdopplung entspricht. Der

mögliche Einfluss ihres Vorschlags auf den globalen Kohlenstoffkreislauf wird von den Verfassern nicht diskutiert.

Akbari et al. (2009) schlagen vor, die Albedo urbaner Flächen zu erhöhen um lokal oder sogar global der Treibhausgaserwärmung entgegen zu wirken. Mit einer globalen Hochrechnung, die 1% der Landflächen als urban annimmt, schätzen sie den Abkühlungseffekt dieser Flächen auf einen Wert, der etwa der für 2025 vorhergesagten Jahresemission von CO₂ entspricht.

4.4 Erhöhung der planetaren Albedo durch Verringerung absorbierender Rußpartikel

Neben Mineralstaub ist Ruß der einzige partikelförmige Spurenstoff in der Atmosphäre mit signifikanter Absorption der einfallenden oder reflektierten Sonnenstrahlung. Aufgenommen in Wolken kann diese Absorption noch verstärkt werden (Heintzenberg und Wendisch, 1996). Sein Effekt auf die Energiebilanz der Erde geht also in die gleiche Richtung wie die der Treibhausgase, betrifft allerdings im Wesentlichen den kurzweiligen Teil der Bilanz. Alle kohlenstoffhaltigen Stoffe (Gas, flüssig, fest) erzeugen bei ihrer Verbrennung Rußpartikel. Da die Hauptrussquellen anthropogen sind liegt der Vorschlag nahe, anthropogene Rußpartikel aus der Atmosphäre zu entfernen bzw. ihre Emission zu reduzieren (Hansen et al., 2000; Hansen und Sato, 2001; Jacobson, 2002; Bond und Sun, 2005; Jacobson, 2005). Im Gegensatz zu den wichtigsten anthropogenen Treibhausgasen ist die atmosphärische Aufenthaltszeit von Ruß mit 10 bis 20 Tagen sehr kurz (Ogren und Charlson, 1983), sodass seine Entfernung aus der Atmosphäre nach Reduktion der menschlichen Quellen natürlichen Reinigungsprozessen der Atmosphäre überlassen werden kann. Allerdings gibt es Vermutungen, dass Ruß in deponierter Form (Clarke und Noone, 1985) durch Albedoerniedrigung nach seinem atmosphärischen Kreislauf zu einer anhaltenden Erwärmung sonnenbelegter Oberflächen führen könnte (Hansen und Nazarenko, 2003). Für die momentane Gesamtwirkung von Ruß in Luft und deponierter Form auf die Strahlungsbilanz werden Werte bis in Größenordnung der Hälfte des entsprechenden Wertes für CO₂ modelliert (Hansen und Sato, 2001; Hansen, 2002; Hansen et al., 2002).

Als positiver Nebeneffekt würde mit dem Ruß auch ein als toxisch erkannter Spurenstoff entfernt, da mit Rußpartikeln auch darauf kondensierte krebserregende, polyaromatische Kohlenwasserstoffe eingeatmet werden. Als weiterer positiver Nebeneffekt kann die dadurch erhöhte Labilisierung der urbanen Grenzschichtatmosphäre gesehen werden (Wendisch et al.,

2008), die die Ventilation über hoch verschmutzten Städten verbessern würde. Ein möglicher negativer Nebeneffekt besteht in der gleichzeitigen, unvermeidbaren Entfernung anderer, aus den gleichen Quellen emittierter Partikel, die entweder über ihre Reflektion von Sonnenstrahlung oder durch ihren Einfluss auf die Albedo von Wolken die Treibhausgaswärmerung dämpfen (Chen et al., 2010).

Stand der technischen Entwicklung

Die Technik zur katalytischen Rußentfernung in Diesel getriebenen Fahrzeugen ist vorhanden.

5. ERHÖHUNG DER THERMISCHEN AUSSTRAHLUNG

Die Verlustkomponente F_1 der Energiebilanz der Erde kann zur Verringerung der globalen Erwärmung auf mehreren Wegen erhöht werden. Entweder wird die Menge der IR-absorbierenden Atmosphärenkomponenten oder deren Temperatur verringert oder der Emissionsgrad³ der ausstrahlenden Oberfläche oder Atmosphärenkomponenten erhöht. Jede Verringerung der CO₂-Konzentration in der Luft hat neben dem Einfluss auf den Strahlungshaushalt den positiven Nebeneffekt, dass die Meeresversauerung dadurch gemildert würde.

5.1 Modifikation von Zirruswolken

Durch Modifikation kalter hoher Eiswolken könnte nach einem Vorschlag von Mitchell und Finnegan (2009) die langwellige Ausstrahlung erhöht werden. Durch ein Einsäen mit Eiskernen, vielleicht von den meist im Zirrusniveau verkehrenden kommerziellen Flugzeugen, würden nach den Verfassern größere Eiskristalle entstehen, die das Verhältnis der Reflektion von Sonnenstrahlung zu langwelliger Ausstrahlung bei den tiefen Wolkentemperaturen zugunsten der Ausstrahlungseffekte veränderten. Nach ersten Abschätzungen könnte dadurch der Treibhauseffekt einer CO₂-Verdoppelung kompensiert werden.

Von den Verfassern aufgeführte Nachteile dieses Ansatzes sind die relativ kurze Aufenthaltsdauer von troposphärischen Partikeln und die dadurch nicht zu behebende Meeresversauerung. Aus der kurzen Lebensdauer der Partikel folgt eine notwendige hohe Wiederholrate des Einsäens mit den damit verbundenen Kosten. Aus wolkenphysikalischer Sicht ergibt sich eine sehr hohe Unsicherheit aus der bisher noch sehr wenig gefestigten Kenntnis des Zusammenhangs zwischen Eiskerneigenschaften und den Eigenschaften von Eiswolken (Siebesma et al., 2009).

5.2 Beschleunigung der physikalischen Kohlenstoffpumpe im Ozean

Die Weltmeere sind die größten CO₂-Senken des Planeten und spielen schon heute eine entscheidende Rolle bei der Verarbeitung des anthropogenen CO₂. Zhou and Flynn (2005)

³ Die Emissionsgrad eines Körpers gibt an, wie viel Strahlung er im Vergleich zu einem idealen Wärmestrahler, einem schwarzen Körper, abgibt.

diskutieren in einer konzeptuellen Studie mit einem zugegeben Minimum an Ingenieurleistung die Kosten von sieben potentiellen Techniken um absinkende Meeresströmungen so zu modifizieren, dass der Transport von atmosphärischem CO₂ in die Tiefsee verstärkt wird. Dabei musste angenommen werden, dass eine künstlich verstärkte Tiefenwasserbildung nicht zu kompensierendem erhöhten Wassertransport aus der Tiefsee führt. Zu Nebeneffekten dieser Ansätze liegen dem Verfasser keine Studien vor. Zhou und Flynn sehen die potentiell wichtigste Anwendung dieses letzten Ansatzes in dem Fall, dass die globale Erwärmung zu einer Abschwächung der nordatlantischen Tiefenwasserbildung führen sollte.

Stand der technischen Entwicklung

Ein Patent zur Beeinflussung der thermohalinen Zirkulation im Sinne einer erhöhten marinen Sequestrierung von CO₂ wurde beantragt (Bailey und Bailey, 2010). Die Firma *Atmocean, Inc* Santa Fe, NM, USA betreibt die Entwicklung von Wellen getriebenen Pumpverfahren zur Beschleunigung der marinen CO₂-Aufnahme. Kritische Annahmen von Zhou und Flynn (2005) für den Salztransport in frierendem Meerwasser wären noch experimentell zu überprüfen.

5.3 Beschleunigung der physikochemischen Kohlenstoffpumpe im Ozean

Die physikochemische oder Löslichkeitspumpe ist ein Vorgang, bei dem Kohlenstoff in gelöster, anorganischer Form in die Tiefsee transportiert. Dabei spielen gleichzeitig zwei Prozesse zusammen. Die Löslichkeit von CO₂ nimmt mit abnehmender Wassertemperatur zu. Die globale thermohaline Zirkulation der Ozeane wird durch die Tiefenwasserbildung in hohen Breiten angetrieben, wo das Wasser normalerweise kälter und dichter ist. Da also Tiefenwasser unter den gleichen Bedingungen gebildet werden, die auch die Löslichkeit von CO₂ begünstigen, enthält es einen höheren Gehalt an gelöstem, anorganischem Kohlenstoff als man ohne den Löslichkeitseffekt erwarten würde. Großtechnisch in die Weltmeere eingebrachter Staub von Kalkmineralen (Kheshgi, 1995; Rau und Caldeira, 1999; Caldeira und Rau, 2000; Rau, 2008) soll in gelöster Form die Alkalinität erhöhen, was zu einer verstärkten Lösung von CO₂ führen soll. Allerdings würden die dadurch reduzierten atmosphärischen CO₂-Konzentrationen zum regionalen Ausgasen von CO₂ führen (Harvey, 2008).

Stand der technischen Entwicklung

Eine technische Lösung zur mineralischen Sequestrierung von CO₂ wurde zum Patent angemeldet (Cooper, 2008).

5.4 Beschleunigung der biologischen Kohlenstoffpumpe im Ozean

Obwohl die Weltmeere nur einen kleinen Teil der globalen Biomasse unseres Planeten (1-2%) beherbergen so spielen doch vor allem marine Cyanobakterien und Algen (Massenanteil \approx 0.2%) in Oberflächennähe eine viel größere Rolle (\approx 50%) in der globalen Photosynthese als ihrem globalen Massenanteil entspricht (Groombridge und Jenkins, 2002). Die Verteilung der zur Photosynthese benötigten Nähr- und Spurenstoffe im Oberflächenwasser hängt vom Eintrag aus Tiefenwasser, Flüssen und aus der Luft ab und ist dementsprechend ungleichmäßig. Als Folge gibt es große Gebiete, in denen einer oder mehrere Nähr- oder Spurenstoffe wie zum Beispiel Eisen die Möglichkeiten mariner Biosynthese begrenzen. Hierauf baut die von Martin (Martin und Fitzwater, 1988; Martin, 1990) formulierte Eisenhypothese, die ursprünglich zur Erklärung der Eiszeiten, in denen der äolische Eiseneintrag in den Ozean durch Mineralstaub stark erhöht war, formuliert wurde bevor sie für CE-Ansätze weiterentwickelt wurde. Geprüft wurde diese Hypothese zunächst im Labor und dann, seit 1993, in einer Vielzahl von Feldexperimenten in Meeresgebieten mit bekanntem Eisenmangel im Oberflächenwasser, zu dem man Eisen zusetzte um festzustellen, ob sich dadurch das Planktonwachstum beschleunigen und damit die biologische Aufnahme von CO₂ in den Ozean nachhaltig beschleunigen lässt.

Mit einem zusätzlichen Eisen- oder auch Stickstoffeintrag wird die gesamte marine Nahrungskette von Mikroorganismen bis hin zu den größten Säugetieren beeinflusst und damit auch die globalen Kreisläufe von Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor. Hinzu kommt, dass der Verbleib biologisch aufgenommenen Kohlenstoffs nicht nur von biologischen sondern auch von anderen, physikalischen und chemischen, Prozessen im Meerwasser abhängt. Weiterhin ist mit Nebeneffekten zu rechnen, die möglicherweise Produktivität (Gnanadesikan et al., 2003) und die gesamte Nahrungskette des Ozeans (Denman, 2008) beeinflussen und einen negativen Effekt auf die Treibhausgasbilanz (Jin und Gruber, 2003; Wingenter et al., 2004) und auf die Ozonschicht (Lawrence, 2002) haben. Auch die erhöhte Produktion neurotoxischer Mikroorganismen wird vermutet (Trick et al., 2010). Der heutige

Stand der Wissenschaft lässt es nach (www.gesamp.org) nicht zu, abzuschätzen, welche Langzeiteffekte eine großskalige Ozeandüngung hätte, sodass nach Cullen und Boyd (2008) dieser Ansatz bis zu einem Wissensstand, der den Nachweis und die Zuordnung von Nebeneffekten zulässt, nicht als sinnvolle Option betrachtet werden sollte.

Stand der technischen Entwicklung

Die Lagerung von CO₂ in der Tiefsee erhielt schon Patente (Ebinuma, 1993; Asai, 1994). Patente auf die Ozeandüngung wurden ebenfalls erteilt (Markels Jr., 1996; Howard Jr. et al., 1999; Markels Jr., 1999; Markels Jr., 2000; Markels Jr., 2001; Markels Jr., 2003; Mitsutaka et al., 2003). Statt großräumig den Ozean zu düngen möchte eine zum Patent angemeldete Erfindung von Liu (2008) durch autonome, schwimmende Photosynthesebojen CO₂ aus der Atmosphäre entfernen. Selbst zur Überwachung dieser CE-Methode wurde schon ein Patentantrag eingereicht (Whaley et al., 2009).

In einem Patent von Jones et al. (1999) wird angeregt Stickstoff in den Ozean einzuleiten um das Algenwachstum und damit die CO₂-Aufnahme zu beschleunigen. Ein weiteres Verfahren will zum gleichen Zweck Harnstoff in den Ozean leiten (Ferguson et al., 2010). Auch ohne Stimulierungssubstanzen werden Verfahren vorgeschlagen, die mittels verstärktem Algenwachstum CO₂ aus der Atmosphäre entfernen (z.B. Jovine, 2008) oder durch Elektrolyse des Meeresoberflächenwassers die Kalziumkarbonatbildung anregen wollen (Tatenuma et al., 2005).

Ein Vorschlag von Lovelock und Rapley (Lovelock und Rapley, 2007) sieht vor, mittels Wellen angetriebener Pumpen nährstoffreiches Wasser aus 100 – 200 m Tiefe an die Meeresoberfläche zu pumpen, wo es eine Algendüngung bewirkt, die wiederum über die Photosynthese zusätzliches atmosphärisches CO₂ binden und in die Tiefsee befördern würde. Tiefseewasser enthält aber auch erhöhte Mengen von gelöstem CO₂, das bei Rückführung an die Oberfläche ausgast (Shepherd und Inglesias-Rodriguez, 2007). Die Effektivität dieses CE-Ansatzes wurde von Oschlies et al. (2010) mit einem gekoppelten Kohlenstoff-Klimamodell untersucht und zu 0.9 PgC pa. modelliert. Allerdings wird in ihrem Modell der größte Teil des mit diesem CE-Ansatz aus der Atmosphäre entfernte Kohlenstoffs an Land gelagert, was zu großen Problem bei der Überwachung einer solchen Methode führen würde. Für einen positiven Nebeneffekt dieser Maßnahme ziehen die Verfasser die CLAW-Hypothese (Charlson et al., 1987) heran, nach der algenbedingte Emissionen von Dimethylsulfid ein Vorläufergas von Kondensationskernen erzeugen, die „Sonnenlicht reflektierende Wolken erzeugen“. Die Mechanismen dieser CLAW-Hypothese allerdings

verbleiben selbst nach über 20 Jahren intensiver diesbezüglicher Forschung ungeklärt und strittig.

Stand der technischen Entwicklung

Karl und Letelier (2008) schlagen die Nutzung wellengetriebener Pumpen nach Isaacs et al. (1976) zur Auftriebsanregung vor. Patente zu dieser CE-Methode wurden angemeldet (Howard Jr. et al., 1999; Maruzama et al., 2000; Lee, 2008). Auch hier wurde schon ein Verfahren zur Überwachung der Methode zum Patent angemeldet (Suzuki, 2005).

5.5 Erhöhung der Kohlenstoffbindung in terrestrischen Pflanzen und Pflanzenresten

Alle Ansätze zur Erhöhung der Kohlenstoffbindung in terrestrischen Pflanzen und Pflanzenresten bauen auf der Photosynthese auf. Sie unterscheiden sich danach in der Behandlung des auf diese Weise durch Biosynthese gewonnen kohlenstoffhaltigen Materials. Alle solche Verfahren zusammengenommen haben nach den optimistischen Schätzungen von Lenton und Vaughan (2009) das Potential 100 ppm CO₂ aus der Atmosphäre zu entfernen. Die zugehörigen Szenarien tragen allerdings das Risiko eines Konflikts mit der Nahrungsmittelproduktion in sich.

Im so genannten „Biochar“-Prozess (Lehmann et al., 2006) soll durch Pyrolyse der Feststoff Holzkohle erzeugt werden, die wegen ihrer chemischen Inertheit für viele Tausend Jahre sicher gelagert werden könnte. Als Nebenprodukte würden in diesem Prozess Biogas und Bioöl erzeugt, mit denen fossile Energiequellen ersetzt werden können. Auch als Bodenzusatz kann Holzkohle nützlich sein.

Ornstein et al. (2009) schlagen zur Erhöhung der Kohlenstoffbindung in terrestrischen Pflanzen die Aufforstung der Sahara und der australischen Wüstengebiete vor. Nach der Charney-Hypothese (Charney, 1975; Charney et al., 1975) sollte eine künstlich bewässerte Vegetation in der Sahara die regional Zirkulation zu Gunsten höhere Niederschläge verändern, was den späteren Bewässerungsaufwand erheblich senken sollte. Das Klimamodel von Ornstein et al. (2009) zeigt wegen der Wolkenbildung über den neu angelegten Wäldern keine signifikante Albedoerniedrigung, die den gewünschten Effekt auf die globale Energiebilanz mindern würde. Als Nebeneffekte diskutieren die Verfasser eine Verringerung der kalten Auftriebsströmung vor Westafrika durch ein aufgrund der Aufforstung verändertes Windfeld, was die regionale Fischerei beeinträchtigen würde und eine Verringerung des Staub

getragenen Eisenexports aus dem Saharagebiet, der heute das nordatlantische Plankton und südamerikanische Wälder düngt. Wegen der biophysikalischen Tundra-Taiga-Rückkopplung hätten Aufforstungen in borealen Breiten nach Bala et al. (2007) eher ein globalen Erwärmungseffekt (Bathiany et al., 2010).

Stand der technischen Entwicklung

Der technische Pyrolyseprozess zur Holzkohleerzeugung ist ausgereift. Zur Pyrolyse von Biomasse wurden Meier et al. (2005) ein Patent erteilt und zur Lagerung von Holzkohle an Ueno et al. (2004). Die Verwendung von Holzkohle als Bodenzusatz erfordert noch weitergehende Forschung (Sohi et al., 2009). Die technischen Voraussetzungen für eine künstliche Bewässerung der Sahara existieren. Zur landbasierten biologischen Sequestrierung von CO₂ wurden mehrere Patente erteilt (Kodo et al., 2000; Bayless et al., 2003; Baird, 2010; Rau und Caldeira, 2010).

5.6 Beschleunigung der natürlichen Verwitterung

Auf geologischen Zeitskalen ist die Kohlensäureverwitterung eine wesentliche CO₂-Senke. Dabei wird mineralisches Kalziumcarbonat gelöst und zerfällt in Kalzium- und Hydrogenkarbonationen, die durch Fließgewässer entfernt werden.

Schuiling und Krijgsman (2006) und Köhler et al. (2010) diskutieren die Möglichkeit die Silikatverwitterung dadurch zu verstärken, dass hochdisperses Olivinpulver⁴ in feuchten, tropischen Wäldern, möglicherweise auch in Küstengewässern, ausgebracht wird. Die benötigte Olivinmenge liegt in der Größenordnung der Weltkohleproduktion. Begrenzt durch die Sättigungskonzentration der Kieselsäure schätzen die Verfasser das Sequestrierungspotential dieses Ansatzes auf 1PgC pro Jahr. Als möglicher positiver Nebeneffekt wird eine Verstärkung der marinen biologischen Kohlenstoffpumpe als Folge eines erhöhten fluvialen Eintrags von Kieselsäure in die Weltmeere genannt. Negative Nebenwirkungen könnten geänderte Alkalinität und pH-Wert in Flüssen und Küstenzonen sein.

House et al. (2007) schlagen eine elektrochemische Beschleunigung der Verwitterungsprozesse vor um CO₂ rascher als natürlich zu entfernen. Dabei soll

⁴ Olivin ist eines der häufigsten Minerale der Erde und ist ein Magnesium-Eisen-Silikat (MgFe)₂SiO₄

elektrochemisch Salzsäure aus dem Meer entnommen werden, um dann an Land den langsamen natürlichen Verwitterungsprozess im großindustriellen Maßstab zu beschleunigen. Als positiver Nebeneffekt wird durch die Entnahme von HCl aus dem Ozean dessen Alkalinität erhöht, was die Lösung von CO₂ im Meer begünstigt, ohne dass dadurch die Ozeanversauerung verstärkt wird, weil dadurch die Übersättigung von Kalzit und Aragonit und deren Ausfall aus dem Meerwasser erhöht werden.

Stand der technischen Entwicklung

Der Chloralkaliprozess zur Entfernung der Bestandteile von HCl aus dem Meerwasser und deren Kombination zu Salzsäure sind bekannte Prozesse der Chemietechnik.

5.7 Technische Entfernung von CO₂ aus der Luft

Alle Ansätze zur direkten physikalischen oder chemischen Entfernung von CO₂ aus der Luft kämpfen gegen die Tatsache an, dass damit ein Spurenstoff, dessen Konzentration in der Größenordnung 0.01% des Trägergases Luft liegt, behandelt werden muss. Der Energieaufwand für diesbezügliche Adsorptionssysteme wächst mit der Menge abgetrennten Kohlenstoffs, nicht mit der Menge der gereinigten Luft. Das abgetrennte CO₂ muss dann permanent und sicher gelagert werden.

Bei dem "Air Capture" genannten Verfahren wird die Luft über Adsorber wie Natriumhydroxid geleitet, die selektiv CO₂ adsorbieren. Der Adsorber wird dann regeneriert um dabei reines CO₂ zu Transport und Lagerung bereitzustellen und selbst wieder zur Adsorption zur Verfügung zu stehen. Zum Substanztransport und zur Regeneration wird Energie benötigt, die aus jeder möglichen Quelle stammen kann. Diese Anlagen funktionieren also als geschlossene Kreislaufsysteme ohne Verbrauch von Chemikalien. Keith et al. (2006) geben einen Überblick über diesen Verfahrenstyp und Pielke (2009) vergleicht diesen Ansatz mit anderen Maßnahmen gegen die Klimaerwärmung. Mit einer Klimamodellrechnung finden Cao und Caldeira (2010), dass nach einer raschen Entfernung allen anthropogenen CO₂'s um 2050 die globale Oberflächentemperatur um 0.8 C reduziert würde. Allerdings bleibt die Modelltemperatur noch für mehrere Jahrhunderte über dem vorindustriellen Niveau. Zur nachfolgenden Erhaltung von sowohl atmosphärischem CO₂ als auch der Temperatur auf niedrigen Werten müsste auch das in den Weltmeeren gespeicherte anthropogene CO₂ entfernt werden, um sein Ausgasen zu verhindern.

Stand der technischen Entwicklung

Lackner (2009) schätzt, dass mit heutiger Technologie passive Adsorber hergestellt werden können, die mehrere Größenordnungen mehr CO₂ aufnehmen können als ein Baum und suchte dazu ein Patent (2009). Bis heute gibt es allerdings keine Technologie, die die Machbarkeit einer großtechnischen Entfernung von CO₂ aus der Luft demonstriert hätte. Keith et al. (2006) argumentieren, dass wegen der fehlenden Technologie die Kosten bis zum späten 21. Jahrhundert nur innerhalb eines Faktors drei abgeschätzt werden könnten.

6. SYNOPSIS UND AUSBLICK

Während physikalische Gesetze wie in Kapitel 2 dargelegt grundsätzlich die Möglichkeiten der globalen Klimabeeinflussung festlegen, sind „Lehnstuhl-Ingenieuren“ keine Grenzen gesetzt, immer neue Eingriffe in das Erdsystem vorzuschlagen, die die Folgen menschlicher Treibhausgasemissionen mildern sollen. Es hat zurzeit den Anschein, als fühle sich nahezu jeder Wissenschaftler, der über ein globales numerisches Modell von Teilen des Erdsystems verfügt oder Zugang zu einem solchen hat, dazu berufen, befindliche oder neue Möglichkeiten der Klimabeeinflussung durchzuspielen. Dementsprechend explodiert die Anzahl zugehöriger Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und die vorliegende Übersicht kann daher auch keine abschließende Zusammenstellung bieten. Trotz dieser raschen Zunahme von Veröffentlichungen zu CE liegt aus mehreren Gründen für keines der angebotenen Verfahren eine akzeptable Bewertung vor, die hier referiert und mit anderen CE-Ansätzen abschließend verglichen werden könnte. Zum ersten begrenzt der Stand der Erdsystemforschung die Möglichkeiten der Simulation einzelner CE-Ansätze. Insbesondere, die regionale Simulation von Klimavariablen, die über Temperaturangaben hinausgeht, ist noch weit davon entfernt, die möglichen Nebenwirkungen von CE zu erfassen. Zum zweiten ist zu beachten, dass die gewünschten Klimawirkungen und Nebenfolgen bisher oft nur auf Abschätzungen der Vertreter der entsprechenden Ansätze bauen, ohne dass diese von unabhängigen Gremien wie dem IPCC überprüft wurden. Zum dritten steht eine kritische Beurteilung und Harmonisierung der zur Simulation von CE verwendeten Modelle aus. Auch hier wäre das IPCC das geeignete Gremium für diese Aufgabe.

Eine weitere, wesentliche Unsicherheit betrifft die Messung und Überwachung von CE-Maßnahmen. Anthropogene Klimaänderungen werden vor einem Hintergrund natürlichen Klimarauschens beobachtet. Zum Beispiel zeigen Satellitenmessungen auf Jahresbasis ein globales natürliches Rauschen im kurzwelligen Strahlungsfluss von 0.3 W m^{-2} (1σ). Um eine CE-Wirkung in dieser Größenordnung vom Rauschen zu unterscheiden müsste mit den gegenwärtigen Satellitensystemen mindestens 10-15 Jahre gemessen werden (Loeb et al., 2007). Allerdings ist die Stabilität der heutigen Satellitensysteme für solche Zeiträume keineswegs gesichert.

Die Zahl der Patente zum Geoengineering stieg in den letzten Jahren rasch, und dieses Gutachten erhebt mit den 27 erwähnten geschützten Verfahren keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Sicherung eines CE-Patents sollte nicht als eindeutiges Zeichen der Annäherung an die Verwirklichung des dort genannten Verfahrens gedeutet werden. Oft

sollen damit nur in ferner Zukunft liegende technische Möglichkeiten gegenüber potentiellen Konkurrenten gesichert oder auch nur gewisse technische Ansätze von der Verfolgung durch Andere ausgeschlossen werden. Dem Verfasser sind keine großtechnischen Verwirklichungen der im Gutachten diskutierten CE-Ansätze bekannt.

Grundlage aller CE-Forschung ist die Erdsystemforschung, mit der das vor jedem CE-Eingriff notwendige Systemverständnis und die mögliche Systemvorhersagbarkeit ermittelt werden. Mit einem globalen „Manhattan-Projekt der Klimaforschung“ halte ich es für möglich, das notwendige Erdsystemverständnis für eine abschließende Bewertung von CE in etwa zehn Jahren zu erzeugen. Das Ergebnis dieser Grundlagenforschung sind Erdsystemmodelle mit denen die Effektivität und Nebenfolgen potentiellen CEs simuliert werden können. Entsprechend den Unsicherheiten bei der Überwachung der Energiebilanz der Erde müssten Feldversuche zum Test von SRM von der Größenordnung eines global wirkenden Vulkanausbruchs über einen Zeitraum von mindestens einem Jahrzehnt betrieben werden um die Effektivität der Maßnahme vom Klimarauschen sicher unterscheiden zu können. Dies bedeutet aber praktisch schon den Einsatz der betreffenden CE-Maßnahme mit allen Nebeneffekten. Bei jeder Veränderung von Landoberflächen im Sinne von CE sind zunächst nur kleine Effekte auf die Energiebilanz zu erwarten, deren Betrag sehr schwer von den natürlichen Variationen der Bilanz zu unterscheiden wäre. Feldversuche zur Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre (CDR) erscheinen harmlos weil nur ein Treibhausgas entsprechend der Skala des Feldversuches entfernt würde. Abgesehen von dem völlig offenen Problem der Lagerung des entfernten CO₂ ist aber auch hier eine langjährige CO₂-Entnahme notwendig, bevor die Minderung gegenüber der natürlichen Variabilität des Kohlenstoffkreislaufs messbar wird. Die bei mariner Sequestrierung notwendige Skala von Feldexperimenten, um die Folgen für die gesamte marine Nahrungskette zu erkennen, schließt wohl auch hier einen alle Forderungen befriedigenden Feldversuch aus. Aerosol- und Wolkenforschung zum Prozessverständnis möglicher diesbezüglicher CE-Ansätze können allerdings im Labor und auf kleiner Feldskala ohne großes Risiko für Nebenwirkungen durchgeführt werden. Dies gilt wohl auch für Prozessforschung bei der CE-Technologieentwicklung.

Abschließend sollen in diesem Ausblick nur zwei Probleme angesprochen werden, die nahezu alle bisherigen CE-Ansätze betreffen. Zum ersten warnen Lowe et al. (2009) und Molina et al. (2009) wie Andere zuvor vor Entwicklungspfaden des Erdsystems, auf denen gewollt oder ungewollt Zustände auftreten, die deutlich über gewissen Grenzen oder Kippunkten (Lenton et al., 2008) liegen. Nach Überschreiten dieser Grenzen ist mit

regionalen oder sogar globalen Hystereseerscheinungen zu rechnen, die eine Rückkehr in den heutigen Zustand des Klimasystems erschweren bzw. stark verzögern würden. Ein häufig diskutiertes Phänomen dieser Art wäre ein irreversibles Abschmelzen des Grönlandeises (Alley et al., 2005). Allerdings liegen für diesen Fall auch Modellrechnungen vor, die behaupten, dass durch ein SRM, das nicht auf Temperaturenniedrigung bis zum vorindustriellen Niveau, dieser Fall vermieden werden könnte (Irvine et al., 2009).

Grundsätzlich hängt die Reversibilität von Klimaeingriffen von der Stärke und der Dauer des Eingriffs ab. Während eine Sonnenfinsternis zwar messbare Wetteränderungen verursacht, die in kürzester Zeit wieder ausgeglichen werden, führen Eingriffe auf Zeitskalen von Jahrzehnten oder Jahrhunderten zu Systemveränderungen, die nur von Prozessen, die auf den betreffenden Zeitskalen wirken, ausgeglichen werden. Dabei ist zu beachten, dass das chaotische Erdsystem Bifurkationen (Thompson und Sieber, 2011) zulässt, die eine Rückkehr zu gegebenen Ausgangslagen des Klima möglicherweise erst nach Durchlaufen langer Hystereseschleifen zulassen (Rahmstorf, 2001).

Das zweite Problem steht im Zusammenhang mit den in Kapitel 2 geschilderten notwendigen extrem langen Anwendungszeiten. Grundsätzlich besteht bei jeder CE-Maßnahme die Möglichkeit einer gleitenden Reduktion entsprechend den zugehörigen technischen Möglichkeiten, die schon den Aufbau des betreffenden CE-Einsatzes bestimmen. Allerdings ist bei einem möglichen Ausstieg zu beachten, dass das Klimasystem von seinem dann herrschenden Zustand nicht notwendigerweise auf direktem Wege zu seinem Zustand vor dem CE-Einsatz zurückkehren wird. Brovkin et al. (2009) und Ross und Matthews (2009) zeigen mit Klimamodellrechnungen, wie empfindlich das Klima mit katastrophalen Temperaturerhöhungen auf einen plötzlichen Ausfall einer Jahrhunderte langen Stratosphärenbeeinflussung reagieren würde. Oschlies et al. (2010) schließlich widmen sich den Folgen des Stopps einer Methode am Beispiel der in Kapitel 5.1 diskutierten Beeinflussung der physikalischen Kohlenstoffpumpe im Ozean. In ihrem Modell steigen sowohl Oberflächentemperaturen als auch CO₂-Konzentrationen nach einem solchen Stopp auf Werte, wie sie ohne diese Eingriffe nicht erreicht worden wären.

Literaturverzeichnis

- Akbari, H., Menon, S. und Rosenfeld, A. 2009. Global Cooling: Increasing World-Wide Urban Albedos to Offset CO_2 . *Clim. Change* **94**, 275–286.
- Albrecht, B. A. 1989. Aerosols, Cloud Microphysics, and Fractional Cloudiness. *Science* **245**, 1227-1230.
- Alley, R. B., Clark, P. U., Huybrechts, P. und Joughin, I. 2005. Ice-Sheet and Sea-Level Changes. *Science* **310**, 456-460.
- Ammann, C. M., Washington, W. M., Meehl, G. A., Buja, L. und Teng, H. 2010. Climate Engineering through Artificial Enhancement of Natural Forcings: Magnitudes and Implied Consequences. *J. Geophys. Res.* **115**, D22109, doi:22110.21029/22009JD012878.
- Angel, R. 2006. Feasibility of Cooling the Earth with a Cloud of Small Spacecraft near the Inner Lagrange Point (L1). *PNAS* **103**, 17184 –17189.
- Archer, D. 2008. The Millennial Atmospheric Lifetime of Anthropogenic CO_2 . *Clim. Change* **90**, 283-297.
- Asai, K. 1994. Method and System for Throwing Carbon Dioxide into the Deep Sea, United States Patent Office No. 5,293,751.
- Bailey, L. J. und Bailey, J. T. 2010. Mechanically Produced Thermocline Based Ocean Temperature Regulatory System, United States Patent Office No. US20080449841 20080229.
- Baird, J. R. 2010. Global Warming Mitigation Method, United States Patent Office No. 20090408656 20090320
- Bala, G., Caldeira, K., Nemani, R., Cao, L., Ban-Weiss, G. und Shin, H.-J. 2010. Albedo Enhancement of Marine Clouds to Counteract Global Warming: Impacts on the Hydrological Cycle. *Clim. Dyn.*, DOI 10.1007/s00382-00010-00868-00381.
- Bala, G., Caldeira, K., Wickett, M., Phillips, T. J., Lobell, D. B., Delire, C. und Mirin, A. 2007. Combined Climate and Carbon-Cycle Effects of Large-Scale Deforestation. *PNAS* **104**, 6550–6555.
- Bala, G., Duffy, P. und Taylor, K. 2008. Impact of Geoengineering Schemes on the Global Hydrological Cycle. *PNAS* **105**, 7664–7669.
- Ban-Weiss, G. A. und Caldeira, K. 2010. Geoengineering as an Optimization Problem. *Environ. Res. Lett.* **5**, 9.
- Bathiany, S., Claussen, M., Brovkin, V., Raddatz, T. und Gayler, V. 2010. Combined Biogeophysical and Biogeochemical Effects of Large-Scale Forest Cover Changes in the Mpi Earth System Model. *Biogeosciences* **7**, 1383–1399.
- Bayless, D. J., Vis-Chiasson, M. L. und Kremer, G. G. 2003. Enhanced Practical Photosynthetic CO_2 Mitigation, United States Patent Office No. 6,667,171.
- Bengtsson, L. 2006. Geo-Engineering to Confine Climate Change: Is It at All Feasible ? *Clim. Change* **77**, 229-234.
- Bond, T. C. und Sun, H. 2005. Can Reducing Black Carbon Emissions Counteract Global Warming? *Environ. Sci. Technol.* **39**, 5921-5926.
- Bower, K., Choullarton, T., Latham, J., Sahraei, J. und Salter, S. 2006. Computational Assessment of a Proposed Technique for Global Warming Mitigation Via Albedo-Enhancement of Marine Stratocumulus Clouds. *Atmos. Res.* **82**, 328-336.
- Brovkin, V., Petoukhov, V., Claussen, M., Bauer, E., Archer, D. und Jaeger, C. 2009. Geoengineering Climate by Stratospheric Sulfur Injections: Earth System Vulnerability to Technological Failure. *Clim. Change* **92**, 243-259.
- Budyko, M. I. 1982. *The Earth's Climate, Past and Future*. New York, NY, Academic Press.

- Caldeira, K. und Rau, G. H. 2000. Accelerating Carbonate Dissolution to Sequester Carbon Dioxide in the Ocean: Geochemical Implications. *Geophys. Res. Lett.* **27**, 225-228.
- Caldeira, K. und Wood, L. 2008. Global and Arctic Climate Engineering: Numerical Model Studies. *Phil. Trans. R. Soc. A*, doi:10.1098/rsta.2008.0132.
- Cao, L. und Caldeira, K. 2010. Atmospheric Carbon Dioxide Removal: Long-Term Consequences and Commitment. *Environ. Res. Lett.* **5**, 6.
- Cess, R. D. und Goldenberg, S. D. 1981. The Effect of Ocean Heat Capacity Upon Global Warming Due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide. *J. Geophys. Res.* **86C1**, 498–502.
- Chang, D. B. 1991. Stratospheric Welsbach Seeding for Reduction of Global Warming, United States Patent Office No. 50031,86.
- Charlson, R. J., Langner, J. und Rodhe, H. 1990. Sulphate Aerosol and Climate. *Nature* **348**, 22.
- Charlson, R. J., Lovelock, J. E., Andreae, M. O. und Warren, S. G. 1987. Oceanic Phytoplankton, Atmospheric Sulphur, Cloud Albedo and Climate. *Nature* **326**, 655-661.
- Charney, J. 1975. Dynamics of Deserts and Drought in the Sahel. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* **428**, 193–202.
- Charney, J., Stone, P. H. und Quirk, W. J. 1975. Drought in the Sahara: A Biogeophysical Feedback Mechanism. *Science* **187**, 434–435.
- Chen, W.-T., Lee, Y. H., Adams, P. J., Nenes, A. und Seinfeld, J. H. 2010. Will Black Carbon Mitigation Dampen Aerosol Indirect Forcing? *Geophys. Res. Lett.* **37**, L09801, doi:09810.01029/02010GL042886.
- CIA 2011. *The World Factbook 2011*. Washington, DC:, Central Intelligence Agency.
- Cicerone, R. J. 2006. Geoengineering: Encouraging Research and Overseeing Implementation. *Clim. Change* **77**, 221-226.
- Cicerone, R. J., Elliott, S. und Turco, R. P. 1991. Reduced Antarctic Ozone Depletions in a Model with Hydrocarbon Injections. *Science* **254**, 1191–1194.
- Clarke, A. D. und Noone, K. J. 1985. Soot in the Arctic Snowpack: A Cause for Perturbations in Radiative Transfer. *Atmos. Environ.* **19**, 2045-2053.
- Coakley Jr., J. A., Bernstein, R. L. und Durkee, P. A. 1987. Effect of Ship-Stack Effluents on Cloud Reflectivity. *Science* **237**, 1020-1022.
- Cooper, J. B. 2008. Atmospheric Carbon Dioxide Removal, Unites States Patent Office No. 20070009362 20070516.
- Crutzen, P. J. 2006. Albedo Enhancement by Stratospheric Sulfur Injections: A Contribution to Resolve a Policy Dilemma? *Clim. Change* **77**, 211-219.
- Cullen, J. J. und Boyd, P. W. 2008. Predicting and Verifying the Intended and Unintended Consequences of Large-Scale Ocean Iron Fertilization. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **364**, 295-301.
- Denman, K. L. 2008. Climate Change, Ocean Processes and Ocean Iron Fertilization. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **364**, 219–225.
- Dickinson, R. E. 1996. Climate Engineering: A Review of Aerosol Approaches to Changing the Global Energy Balance. *Clim. Change* **33**, 279-290.
- Doughty, C. E., McMillan, A. M. S. und Field, C. B. 2010. Can Crop Albedo Be Increased through the Modification of Leaf Trichomes, and Could This Cool Regional Climate? *Climatic Change Lett.* **104**, 379-387.
- Early, J. T. 1989. The Space Based Solar Shield to Offset Greenhouse Effect. *J. Br. Interplanet. Soc.* **42**, 567–569.
- Ebinuma, T. 1993. Method for Dumping and Disposing of Carbon Dioxide Gas and Apparatus Therefore, United States Patent Office No. 5,261,490.

- Eliseev, A. V., Chernokulsky, A. V., Karpenko, A. A. und Mokhov, I. 2010. Global Warming Mitigation by Sulphur Loading in the Stratosphere: Dependence of Required Emissions on Allowable Residual Warming Rate. *Theor. Appl. Climatol.* **101**, 67-81.
- Ferguson, J. I. S., Rodgers, W., Wheen, R. J. und Judd, B. J. 2010. Carbon Sequestration Using a Floating Vessel, United States Patent Office No. 20100597700 20100405.
- Gnanadesikan, A., Sarmiento, J. L. und Slater, R. D. 2003. Effects of Patchy Ocean Fertilization on Atmospheric Carbon Dioxide and Biological Production. *Global Biochem. Cycles* **17**, 1050, doi:10.1029/2002GB001940.
- Govindasamy, B. und Caldeira, K. 2000. Geoengineering Earth's Radiation Balance to Mitigate CO₂-Induced Climate Change. *Geophys. Res. Lett.* **27**, 2141-2144.
- Govindasamy, B., Caldeira, K. und Duffy, P. B. 2003. Geoengineering Earth's Radiation Balance to Mitigate Climate Change from a Quadrupling of CO₂. *Global Planet. Change* **37**, 157-168.
- Govindasamy, B., S., Thompson, Duffy, P. B., Caldeira, K. und Delire, C. 2002. Impact of Geoengineering Schemes on the Terrestrial Biosphere. *Geophys. Res. Lett.* **29**, 2061, doi:10.1029/2002GL015911.
- Groombridge, B. und Jenkins, M. D. 2002. *World Atlas of Biodiversity: Earth's Living Resources in the 21st Century*. Berkeley, CA, University of California Press.
- Hansen, J. 2002. A Brighter Future. *Clim. Change* **52**, 435-440.
- Hansen, J. und Nazarenko, L. 2003. Soot Climate Forcing Via Snow and Ice Albedos. *PNAS* **101**, 423-428.
- Hansen, J., Nazarenko, L., Ruedy, R., Sato, M., Willis, J., Del Genio, A. D., Koch, D., Lacis, A., Lo, K., Menon, S., Novakov, T., Perlwitz, J., Russell, G., Schmidt, G. A. und Tausnev, N. 2005. Earth's Energy Imbalance: Confirmation and Implications. *Science* **308**, 1431-1435.
- Hansen, J., Sato, M., Nazarenko, L., Ruedy, R., Lacis, A., Koch, D., Tegen, I., Hall, T., Shindell, D., Santer, B., Stone, P., Novakov, T., Thomason, L., Wang, R., Wang, Y., Jacob, D., Hollandsworth, S., Bishop, L., Logan, J., Thompson, A., Stolarski, R., Lean, J., Willson, R., Levitus, S., Antonov, J., Rayner, N., Parker, D. und Christy, J. 2002. Climate Forcings in Goddard Institute for Space Studies Si2000 Simulations. *J. Geophys. Res.* **107**, ACL 2-1 - 2.37.
- Hansen, J. E. und Sato, J. 2001. Trends of Measured Climate Forcing Agents. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **98**, 14778-14783.
- Hansen, J. E., Sato, J., Ruedy, R., Lacis, A. A. und Oinas, V. 2000. Global Warming in the Twenty-First Century: An Alternative Scenario. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **97**, 9875-9880.
- Harvey, L. D. D. 2008. Mitigating the Atmospheric CO₂ Increase and Ocean Acidification by Adding Limestone Powder to Upwelling Regions. *J. Geophys. Res.* **113**, C04028, doi:10.1029/2007JC004373.
- Heckendorn, P., Weisenstein, D., Fueglistaler, S., Luo, B. P., Rozanov, E., Schraner, M., Thomason, L. W. und Peter, T. 2009. The Impact of Geoengineering Aerosols on Stratospheric Temperature and Ozone *Environ. Res. Lett.* **4**, 045108.
- Hegerl, G. C. und Solomon, S. 2009. Risks of Climate Engineering. *Science* **235**, 955-956.
- Heintzenberg, J. und Charlson, R. J. 2009. *Clouds in the Perturbed Climate System : Their Relationship to Energy Balance, Atmospheric Dynamics, and Precipitation*. Cambridge, MA, USA, MIT Press.
- Heintzenberg, J. und Wendisch, M. 1996. On the Sensitivity of Cloud Albedo to the Partitioning of Particulate Absorbers in Cloudy Air. *Contr. Atmos. Phys.* **69**, 491-499.
- Hoffman, R. N. 2002. Controlling the Global Weather. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **83**, 241-248.
- House, K. Z., House, C. H., Schrag, D. P. und Aziz, M. J. 2007. Electrochemical Acceleration of Chemical Weathering as an Energetically Feasible Approach to Mitigating Anthropogenic Climate Change. *Environ. Sci. Technol.* **41**.

- Howard Jr., E. G., Edward, G. und O'Brien, T. C. 1999. Water-Bouyant Particulate Materials Containing Micronutrients for Phytoplankton, United States Patent Office No. 5,965,117.
- Huston, M. A. 2005. The Three Phases of Land-Use Change: Implications for Biodiversity. *Ecol. App.* **15**, 1864–1878.
- IPCC 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Irvine, P. J., Lunt, D. J., Stone, E. J. und Ridgwell, A. 2009. The Fate of the Greenland Ice Sheet in a Geoengineered, High Co₂ World. *Environ. Res. Lett.* **4**, doi:10.1088/1748-9326/1084/1084/045109.
- Irvine, P. J., Ridgwell, A. und Lunt, D. J. 2010. Assessing the Regional Disparities in Geoengineering Impacts. *Geophys. Res. Lett.* **37**, L18702, doi:18710.11029/12010GL044447.
- Isaacs, J., Castel, D. und Wick, G. 1976. Utilization of the Energy in Ocean Waves. *Oceanography* **3**, 175–187.
- Jacobson, M. Z. 2002. Control of Fossil-Fuel Particulate Black Carbon and Organic Matter, Possibly the Most Effective Method of Slowing Global Warming. *J. Geophys. Res.* **107**, doi:10.1029/2001JD001376.
- Jacobson, M. Z. 2005. Correction To "Control of Fossil-Fuel Particulate Black Carbon and Organic Matter, Possibly the Most Effective Method of Slowing Global Warming". *J. Geophys. Res.* **110**, D14105, doi:14110.11029/12005JD005888.
- Jiang, H., Xue, H., Teller, A., Feingold, G. und Levin, Z. 2006. Aerosol Effects on the Lifetime of Shallow Cumulus. *Geophys. Res. Lett.* **33**, L14806, doi:14810.11029/12006GL026024.
- Jin, X. und Gruber, N. 2003. Offsetting the Radiative Benefit of Ocean Iron Fertilization by Enhancing N₂O Emissions. *Geophys. Res. Lett.* **30**, 2249, doi:2210.1029/2003GL018458.
- Jones, A., Haywood, J., Boucher, O., Kravitz, B. und Robock, A. 2010. Geoengineering by Stratospheric So₂ Injection: Results from the Met Office Hadgem(2) Climate Model and Comparison with the Goddard Institute for Space Studies Modele. *Atmos. Chem. Phys.* **10**, 5999-6006.
- Jones, I. S. F., Rodgers, W., Gunaratnam, M. K. und Young, H. E. 1999. Process for Sequestering into the Ocean the Atmospheric Greenhouse Gas Carbon Dioxide by Means of Supplementing the Ocean with Ammonia or Salts Thereof, United States Patent Office No. 5,992,089.
- Jovine, R. 2008. Method of Sequestering Carbon Dioxide Using Algae, Patent Office of the United Kingdom No. GB2464763.
- Karl, D. M. und Letelier, R. M. 2008. Nitrogen Fixation-Enhanced Carbon Sequestration in Low Nitrate, Low Chlorophyll Seascapes. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **364**, 257-268.
- Katz, J. I. 2010. Stratospheric Albedo Modification. *Energy & Environmental Science* **3**, 1634-1644.
- Keith, D., Ha-Duong, M. und Stolaroff, J. K. 2006. Climate Strategy with Co₂ Capture from the Air. *Clim. Change* **74**, 17-45.
- Keith, D. W. 2000. Geoengineering the Climate: History and Prospect. *Annu. Rev. Energy Environ.* **25**, 245–284.
- Keith, D. W. 2010. Photophoretic Levitation of Engineered Aerosols for Geoengineering. *PNAS* **107**, 16428-16431.
- Kheshgi, H. S. 1995. Sequestering Atmospheric Carbon Dioxide by Increasing Ocean Alkalinity. *Energy* **20**, 915–922.
- Kiehl, J. T. 2006. Geoengineering Climate Change: Treating the Symptom over the Cause? *Clim. Change* **77**, 227-228.

- Kodo, K., Kodo, Y. und Tsuruoka, M. 2000. System for Purifying a Polluted Air by Using Algae, United States Patent Office No. 6,083,740.
- Köhler, P., Hartmann, J. und Wolf-Gladrowa, D. A. 2010. Geoengineering Potential of Artificially Enhanced Silicate Weathering of Olivine. *PNAS*, doi: 10.1073/pnas.1000545107.
- Korhonen, H., Carslaw, K. S. und Romakkaniemi, S. 2010. Enhancement of Marine Cloud Albedo Via Controlled Sea Spray Injections: A Global Model Study of the Influence of Emission Rates, Microphysics and Transport. *Atmos. Chem. Phys.* **10**, 4133-4143.
- Kravitz, B., Robock, A., Oman, L., Stenchikov, G. L. und Marquardt, A. 2009. Acid Deposition from Stratospheric Geoengineering with Sulfate Aerosols. *J. Geophys. Res.* **114**, D14109, doi:14110.11029/12009JD011918.
- Kravitz, B., Robock, A., Oman, L., Stenchikov, G. L. und Marquardt, A. 2010. Correction To "Acid Deposition from Stratospheric Geoengineering with Sulfate Aerosols". *J. Geophys. Res.* **115**, D16119, doi:16110.11029/12010JD014579.
- Lackner, K. S. 2009. Capture of Carbon Dioxide from Ambient Air. *Eur. Phys. J. Special Topics* **173**, 93-106.
- Lackner, K. S. und Wright, A. B. 2009. Removal of Carbon Dioxide from Air, United States Patent Office No. US200912088A1.
- Latham, J. 1990. Control of Global Warming? *Nature* **347**, 339-340.
- Latham, J., Rasch, P. J., Chen, C.-C., Kettles, L., Gadian, A., Gettelman, A., Morrison, H., Bower, K. und Choullarton, T. W. 2008. Global Temperature Stabilization Via Controlled Albedo Enhancement of Low-Level Maritime Clouds. *Phil. Trans. R. Soc. A* **366**, 3969–3987.
- Lawrence, M. G. 2002. Side Effects of Oceanic Iron Fertilization. *Science* **297**, 1993.
- Lawrence, M. G. 2006. The Geoengineering Dilemma: To Speak or Not to Speak. *Clim. Change* **77**, 245-248.
- Lee, J. W. 2008. Method for Reducing Carbon Dioxide in Atmosphere Using Deep-Ocean Water and Method for Preventing Global Warming Using the Same, Korean Patent Office No. WO2010035939.
- Lehmann, J., Gaunt, J. und Rondon, M. 2006. Bio-Char Sequestration in Terrestrial Ecosystems— a Review. *Mitigation Adaptation Strategies Global Change* **11**, 403-427.
- Lenton, T. M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J. W., Lucht, W., Rahmstorf, S. und Schellnhuber, H. J. 2008. Tipping Elements in the Earth's Climate System. *PNAS* **105**, 1786–1793.
- Lenton, T. M. und Vaughan, N. E. 2009. The Radiative Forcing Potential of Different Climate Geoengineering Options. *Atmos. Chem. Phys.* **9**, 5539-5561.
- Liu, J. Y. 2008. Description of the Global Warming Control System, United States Patent Office No. 20070698235 20070126.
- Loeb, N. G., Wielicki, B. A., Su, W., Lukashin, C., S., W., W., T., P., K. J., M., G., M., W. F. und Davies, R. 2007. Multi-Instrument Comparison of Top-of-Atmosphere Reflected Solar Radiation. *J. Clim.* **20**, 575-591.
- Lovelock, J. E. und Rapley, C. G. 2007. Ocean Pipes Could Help the Earth to Cure Itself. *Nature* **449**, 403.
- Lowe, J. A., Huntingford, C., Raper, S. C. B., Jones, C. D., Liddicoat, S. K. und Gohar, L. K. 2009. How Difficult Is It to Recover from Dangerous Levels of Global Warming? *Environ. Res. Lett.* **4**, 014012 doi:014010.011088/011748-019326/014014/014011/014012.
- Lunt, D. J., Ridgwell, A., Valdes, P. J. und Seale, A. 2008. "Sunshade World": A Fully Coupled Gcm Evaluation of the Climatic Impacts of Geoengineering. *Geophys. Res. Lett.* **35**, L12710, doi:12710.11029/12008GL033674.

- Manabe, S. und Wetherald, R. T. 1967. Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity. *J. Atmos. Sci.* **24**, 241-259.
- Mark, H. 2009. System and Method of Control of the Terrestrial Climate and Its Protection against Warming and Climatic Catastrophes Caused by Warming Such as Hurricanes, United States Patent Office No. 20080131242 20080602.
- Markels Jr., M. 1996. Method of Increasing Seafood Production in the Ocean, United States Patent Office No. 5,535,70.
- Markels Jr., M. 1999. Method of Increasing Seafood Production in the Barren Ocean, No. 5,967,087.
- Markels Jr., M. 2000. Method of Sequestering Carbon Dioxide, No. 6,056,919.
- Markels Jr., M. 2001. Method of Sequestering Carbon Dioxide with Spiral Fertilization, United States Patent Office No. 6,200,530.
- Markels Jr., M. 2003. Method of Sequestering Carbon Dioxide with Fertilizer Comprising Chelated Iron, United States Patent Office No. 6,4087,92.
- Marland, G., Roger A. Pielke, S., Apps, M., Avissar, R., Betts, R. A., Davis, K. J., Frumhoff, P. C., Jackson, S. T., Joyce, L. A., Kauppi, P., Katzenberger, J., MacDicken, K. G., Neilson, R. P., Niles, J. O., Niyogi, D. d. S., Norby, R. J., Pena, N., Sampson, N. und Xue, Y. 2003. The Climatic Impacts of Land Surface Change and Carbon Management, and the Implications for Climate-Change Mitigation Policy. *Climate Policy* **3**, 149–157.
- Martin, J. H. 1990. Glacial-Interglacial Change: The Iron Hypothesis. *Paleoceanography* **5**, 1-13.
- Martin, J. H. und Fitzwater, S. E. 1988. Iron Deficiency Limits Phytoplankton Growth in the North-East Pacific Subarctic. *Nature* **331**, 341.
- Maruzama, S., Ishikawa, M. und Taira, K. 2000. Method and Equipment for Pumping up Deep Water as Well as Ocean Greening Method Using Them, Japanese Patent Office No. 2001336479.
- Mautner, M. 1991. A Space-Based Solar Screen against Climatic Warming. *J. Br. Interplanet. Soc.* **44**, 135-138.
- Mc Cracken, M. C. 2006. Geoengineering: Worthy of Cautious Evaluation? *Clim. Change* **77**, 235-243.
- Meier, D., Klaubert, H. und Schoell, S. 2005. Method and Device for the Pyrolysis of Biomass, European Patent Office No. EP1608721A1.
- Mercado, L. M., Bellouin, N., Sitch, S., Boucher, O., Huntingford, C., Wild, M. und Cox, P. M. 2009. Impact of Changes in Diffuse Radiation on the Global Land Carbon Sink. *Nature* **458**, 1014–1017.
- Mitchell, D. L. und Finnegan, W. 2009. Modification of Cirrus Clouds to Reduce Global Warming. *Environ. Res. Lett.* **4**, 8.
- Mitsutaka, H., Tanuguchi, A., Yamamoto, T. und Namikawa, M. 2003. Method for Promoting CO₂ Absorption in Ocean Using Iron and Steel Slag, Japanese Patent Office No. JP2003134958.
- Molina, M., Zaelke, D., Sarma, K. M., Andersen, S. O., Ramanathan, V. und Kaniaru, D. 2009. Reducing Abrupt Climate Change Risk Using the Montreal Protocol and Other Regulatory Actions to Complement Cuts in CO₂ Emissions. *PNAS*, doi: 10.1073/pnas.0902568106.
- Moore, J. C., Jevrejevad, S. und Grinstede, A. 2010. Efficacy of Geoengineering to Limit 21st Century Sea-Level Rise. *PNAS* **107**, 15699–15703.
- Murphy, D. M. 2009. Effect of Stratospheric Aerosols on Direct Sunlight and Implications for Concentrating Solar Power. *Environ. Sci. Technol.* **43**, 2784-2786.

- Myhre, G., Nilsen, J. S., Gulstad, L., Shine, K. P., Rognerud, B. und Isaksen, I. S. A. 2007. Radiative Forcing Due to Stratospheric Water Vapour from CH_4 Oxidation. *Geophys. Res. Lett.* **34**, L01807, doi:01810.01029/02006GL027472.
- Ogren, J. A. und Charlson, R. J. 1983. Elemental Carbon in the Atmosphere: Cycle and Lifetime. *Tellus* **35**, 241-254.
- Ornstein, L., Aleinov, I. und Rind, D. 2009. Irrigated Afforestation of the Sahara and Australian Outback to End Global Warming. *Clim. Change* **97**, 409–437.
- Oschlies, A., Pahlow, M., Yool, A. und Matear, R. J. 2010. Climate Engineering by Artificial Ocean Upwelling: Channelling the Sorcerer's Apprentice. *Geophys. Res. Lett.* **37**, L04701, doi:04710.01029/02009GL041961.
- Pearson, J., Oldson, J. und Levin, E. 2006. Earth Rings for Planetary Environmental Control. *Acta Astronautica* **58**.
- Pielke, J., R.A. 2009. An Idealized Assessment of the Economics of Air Capture of Carbon Dioxide in Mitigation Policy. *Environmental Science & Policy* **12**, 216-225.
- Pierce, J. R., Weisenstein, D. K., Heckendorn, P., Peter, T. und Keith, D. W. 2010. Efficient Formation of Stratospheric Aerosol for Climate Engineering by Emission of Condensable Vapor from Aircraft. *Geophys. Res. Lett.* **37**, L18805, doi:18810.11029/12010GL043975.
- Pongratz, J., Raddatz, T., Reick, C. H., Esch, M. und Claussen, M. 2009. Radiative Forcing from Anthropogenic Land Cover Change since A.D. 800. *Geophys. Res. Lett.* **36**, L02709, doi:02710.01029/02008GL036394.
- Pongratz, J., Reick, C. H., Raddatz, T. und Claussen, M. 2010. Biogeophysical Versus Biogeochemical Climate Response to Historical Anthropogenic Land Cover Change. *Geophys. Res. Lett.* **37**, L08702, doi:08710.01029/02010GL043010.
- Rahmstorf, S. 2001. Abrupt Climate Change. In: *Encyclopaedia of Ocean Sciences* eds. J. Steele, S. Thorpe und K. Turekian). Academic Press, London, 1-6.
- Rasch, P. J., Crutzen, P. J. und Coleman, D. B. 2008. Exploring the Geoengineering of Climate Using Stratospheric Sulfate Aerosols: The Role of Particle Size. *Geophys. Res. Lett.* **35**, L02809, doi:02810.01029/02007GL032179.
- Rau, G. H. 2008. Electrochemical Splitting of Calcium Carbonate to Increase Solution Alkalinity: Implications for Mitigation of Carbon Dioxide and Ocean Acidity. *Environ. Sci. Technol.* **42**, 8935–8940.
- Rau, G. H. und Caldeira, K. 1999. Enhanced Carbonate Dissolution: A Means of Sequestering Waste CO_2 as Ocean Bicarbonate. *Energy Conversion and Management* **40**, 1803–1813.
- Rau, G. H. und Caldeira, K. G. 2010. Apparatus for Extracting and Sequestering Carbon Dioxide, United States Patent Office No. 7,655,19.
- Ricke, K., Morgan, M. G. und Allen, M. R. 2010. Regional Climate Response to Solar Radiation Management. *Nature Geoscience* **3**, 537–541.
- Ridgwell, A., Singarayer, J. S., Hetherington, A. M. und Valdes, P. J. 2009. Tackling Regional Climate Change by Leaf Albedo Bio-Geoengineering. *Current Biology* **19**, 146-150.
- Robock, A. 2008. 20 Reasons Why Geoengineering May Be a Bad Idea. *Bulletin of the Atomic Scientists* **64**, 14–18.
- Robock, A., Bunzl, M., Kravitz, B. und Stenchikov, G. L. 2010. A Test for Geoengineering? *Science* **327**.
- Roderick, M. L., Farquhar, G. D., Berry, S. L. und Noble, I. R. 2001. On the Direct Effect of Clouds and Atmospheric Particles on the Productivity and Structure of Vegetation. *Oecologia* **129**, 21-30.
- Ross, A. und Matthews, H. D. 2009. Climate Engineering and the Risk of Rapid Climate Change. *Environ. Res. Lett.* **4**, 045103.

- Salter, S., Sortino, G. und Latham, J. 2008. Sea-Going Hardware for the Cloud Albedo Method of Reversing Global Warming. *Phil. Trans. R. Soc. A* **366**, 3989–4006.
- Schuiling, R. D. und Krijgsman, P. 2006. Enhanced Weathering: An Effective and Cheap Tool to Sequester CO₂. *Clim. Change* **74**, 349–354.
- Schwartz, S. E. und Slingo, A. 1996. Enhanced Shortwave Cloud Radiative Forcing Due to Anthropogenic Aerosols. In: *Clouds, Chemistry and Climate* eds. P. J. Crutzen und V. Ramanathan). Springer-Verlag, Heidelberg, 191-236.
- Shepherd, J. G. und Inglesias-Rodriguez, D. 2007. Geo-Engineering Might Cause, Not Cure, Problems. *Nature* **449**, 781.
- Siebesma, A. P., Brenguier, J.-L., Bretherton, C. S., Grabowski, W. W., Heintzenberg, J., Kärcher, B., Lehmann, K., Petch, J. C., Spichtinger, P., Stevens, B. und Stratmann, F. 2009. Cloud-Controlling Factors. In: *Clouds in the Perturbed Climate System Their Relationship to Energy Balance, Atmospheric Dynamics, and Precipitation* eds. J. Heintzenberg und R. J. Charlson). MIT Press, Cambridge, MA, 269-290.
- Singarayer, J. S., Ridgwell, A. und Irvine, P. 2009. Assessing the Benefits of Crop Albedo Bio-Geoengineering. *Environ. Res. Lett.* **4**, 045110.
- Small, J. D., Chuang, P. Y., Feingold, G. und Jiang, H. 2009. Can Aerosol Decrease Cloud Lifetime? *Geophys. Res. Lett.* **36**, L16806, doi:16810.11029/12009GL038888.
- Sohi, S., Lopez-Capel, E., Krull, E. und Bol, R. 2009. Biochar's Roles in Soil and Climate Change: A Review of Research Needs. CSIRO, Clayton, Australia.
- Solomon, S., Plattner, G.-K., Knutti, R. und Friedlingstein, P. 2009. Irreversible Climate Change Due to Carbon Dioxide Emissions. *PNAS* **106**, 1704–1709.
- Stevens, B. und Feingold, G. 2010. Untangling Aerosol Effects on Clouds and Precipitation in a Buffered System. *Nature* **461**.
- Suzuki, T. 2005. Method for Evaluating Amount of Immobilized CO₂ in Artificial Upwelling Sea Area, Japanese Patent Office No. JP20030315219 20030908.
- Tatenuma, K., Yoshida, K., Arai, O., Suzuki, J. und Kurosawa, K. 2005. Reduction Method of Atmospheric Carbon Dioxide, Recovery and Removal Method of Carbonate Contained in Seawater, and Disposal Method of the Recovered Carbonate, United States Patent Office No. 2,0050117,70.
- Teller, E., Wood, L. und Hyde, R. 1997. Global Warming and Ice Ages: 1. Prospects for Physics Based Modulation of Global Change. Livermore National Laboratory, Livermore, CA.
- Thompson, J. M. T. und Sieber, J. 2011. Climate Tipping as a Noisy Bifurcation: A Predictive Technique. *International Journal of Bifurcation and Chaos* **76**, 27-46.
- Tilmes, S., Müller, R. und Salawitch, R. 2008. The Sensitivity of Polar Ozone Depletion to Proposed Geoengineering Schemes. *Science* **320**, 1201.
- Trenberth, K. und Dai, A. 2007. Effects of Mount Pinatubo Volcanic Eruption on the Hydrological Cycle as an Analog of Geoengineering. *Geophys. Res. Lett.* **34**, L15702. doi:15710.11029/12007GL030524.
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T. und Kiehl, J. 2009. Earth's Global Energy Budget. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **90**, 311-324.
- Trick, C., Billb, B. D., Cochlan, W. P., Wells, M. L., Trainer, V. L. und Pickell, L. D. 2010. Iron Enrichment Stimulates Toxic Diatom Production in High-Nitrate, Low-Chlorophyll Areas. *PNAS*, 10.1073/pnas.0910579107, 0910572010.
- Tsigaridis, K., Krol, M., Dentener, F. J., Balkanski, Y., Lathièrè, J., Metzger, S., Hauglustaine, D. A. und Kanakidou, M. 2006. Change in Global Aerosol Composition since Preindustrial Times. *Atmos. Chem. Phys.* **6**, 5143-5162.
- Tuck, A. F., Donaldson, D. J., Hitchman, M. H., Richard, E. C., Tervahattu, H., Vaida, V. und Wilson, J. C. 2008. On Geoengineering with Sulphate Aerosols in the Tropical Upper Troposphere and Lower Stratosphere. *Clim. Change* **90**, 315-331.

- Twomey, S. 1974. Pollution and the Planetary Albedo. *Atmos. Environ.* **8**, 1251-1256.
- Ueno, M., Kawamitsu, Y., Yasusato, S., Hisagai, J., Naksone, A., Kitano, S. und Cho, M. 2004. Method for Suppressing the Amount of Carbon Dioxide Discharged, Japanese Patent Office No. JP2004148176A.
- Wakefield, S. R. 2008. A Dust- or Particle-Based Solar Shield to Counteract Global Warming, European Patent Office No. GB20070024255 20071212.
- Wendisch, M., Hellmuth, O., Ansmann, A., Heintzenberg, J., Engelmann, R., Althausen, D., Eichler, H., Müller, D., Hu, M., Zhang, Y. und Mao, J. 2008. Radiative and Dynamic Effects of Absorbing Aerosol Particles over the Pearl River Delta, China. *Atmos. Environ.* **42**, 6405-6416.
- Whaley, D., Leinen, M. und Whilden, N. 2009. Quantification and Quality Grading for Carbon Sequestered Via Ocean Fertilization, Unites States Patent Office No. 2008US82879 20081107.
- Whipple, A. B. C. 1982. *Storm*. Alexandria, VA, Time-Life Books.
- Wigley, T. M. L. 2006. A Combined Mitigation/Geoeengineering Approach to Climata Stabilization *Science* **314**, 452-454.
- Willoughby, H. E., Jorgensen, D. P., Black, R. A. und Rosenthal, S. L. 1985. Project Stormfury: A Scientific Chronicle 1962–1983. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **66**, 505–514.
- Wingenter, O. W., Haase, K. B., Strutton, P., Friederich, G., Meinardi, S., Blake, D. R. und Rowlan, F. S. 2004. Changing Concentrations of Co, Ch₄, C₅h₈, Ch₃br, Ch₃i, and Dimethyl Sulfide During the Southern Ocean Iron Enrichment Experiments. *PNAS* **101**, 8537-8541.
- Zhou, S. und Flynn, P. C. 2005. Geoeengineering Downwelling Ocean Currents: A Cost Assessment. *Clim. Change* **71**, 203-220.

Impressum

Climate Engineering: Chancen und Risiken einer Beeinflussung der Erderwärmung.
Naturwissenschaftliche und technische Aspekte

Herausgeber

Leibniz-Institut für Troposphärenforschung e.V.

Autor

Jost Heintzenberg

Grafische Gestaltung des Titelbilds

Rita Erven

Leipzig, 2011

Diese Studie wurde im Auftrag des BMBF erstellt. Das BMBF hat das Ergebnis der Studie nicht beeinflusst; der Auftragnehmer trägt allein die Verantwortung.

Alle in dieser Studie veröffentlichten Beiträge sind urheberrechtlich geschützt. Das gilt auch gegenüber Datenbanken und ähnlichen Einrichtungen. Die Reproduktion - ganz oder in Teilen - durch Nachdruck, fototechnische Vervielfältigung oder andere Verfahren, auch Auszüge, Bearbeitungen sowie Abbildungen bedarf der vorherigen schriftlichen Zustimmung des Herausgebers. Alle übrigen Rechte vorbehalten.

© 2011, Leibniz-Institut für Troposphärenforschung e.V.