

Dovern, Jonas et al.

Working Paper

Radiation Management: Gezielte Beeinflussung des globalen Strahlungshaushalts zur Kontrolle des anthropogenen Klimawandels

Kieler Diskussionsbeiträge, No. 549/550

Provided in Cooperation with:

Kiel Institute for the World Economy – Leibniz Center for Research on Global Economic Challenges

Suggested Citation: Dovern, Jonas et al. (2015) : Radiation Management: Gezielte Beeinflussung des globalen Strahlungshaushalts zur Kontrolle des anthropogenen Klimawandels, Kieler Diskussionsbeiträge, No. 549/550, Institut für Weltwirtschaft (IfW), Kiel

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/125518>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.



Kieler **Diskussionsbeiträge**



Radiation Management: Gezielte Beeinflussung des globalen Strahlungshaushalts zur Kontrolle des anthropogenen Klimawandels

**Jonas Dovern, Sebastian Harnisch, Gernot
Klepper, Ulrich Platt, Andreas Oschlies
und Wilfried Rickels**

Nr. 549/550 | Dezember 2015

Institut für Weltwirtschaft Kiel

Web: www.ifw-kiel.de

Jun.Prof. Dr. Jonas Dovern

Alfred-Weber-Institut für Wirtschaftswissenschaften, Universität Heidelberg
Bergheimer Straße 58
69115 Heidelberg
Tel.: +49/6221/54-2958
E-Mail: jonas.dovern@awi.uni-heidelberg.de

Prof. Dr. Sebastian Harnisch

Institut für Politische Wissenschaft, Universität Heidelberg
Bergheimer Str. 58
69115 Heidelberg
Tel.: +49/6221/54-2859
E-Mail: sebastian.harnisch@uni-heidelberg.de

Prof. Gernot Klepper, Ph.D.

Institut für Weltwirtschaft
24100 Kiel
Tel.: +49/431/8814-485
E-Mail: gernot.klepper@ifw-kiel.de

Prof. Dr. Ulrich Platt

Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg
Bergheimer Straße 58
69115 Heidelberg
Tel.: +49/6221/54-6339
E-Mail: ulrich.platt@iup.uni-heidelberg.de

Prof. Dr. Andreas Oschlies

GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel
Düsternbrooker Weg 20
24105 Kiel
Tel.: +49/431/600-1936
E-Mail: aoschlies@geomar.de

Dr. Wilfried Rickels

Institut für Weltwirtschaft
24100 Kiel
Tel.: +49/431/8814-408
E-Mail: wilfried.rickels@ifw-kiel.de

KIELER DISKUSSIONSBEITRÄGE

Herausgegeben vom Institut für Weltwirtschaft
24100 Kiel
Tel: +49/431/8814-1; Website: <http://www.ifw-kiel.de>

Schriftleitung:

Prof. Dr. Harmen Lehment
Tel: +49/431/8814-232; E-Mail: harmen.lehment@ifw-kiel.de

ISSN 0455-0420

© Institut für Weltwirtschaft an der Universität Kiel 2015.

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es auch nicht gestattet, das Werk oder Teile daraus in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) zu vervielfältigen oder unter Verwendung elektronischer Systeme zu verarbeiten oder zu verbreiten.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Radiation Management als klimapolitische Option?	3
1.2	Die öffentliche und politische CE-Debatte	5
1.3	Gliederung und Ansatz des Diskussionsbeitrages	5
2	Die anthropogen verursachte Störung der Strahlungsbilanz der Erde und Radiation Management	7
2.1	Die Strahlungsbilanz der Erde	7
2.2	Die anthropogene Störung der Strahlungsbilanz	8
2.3	Klimasensitivität und Kipppunkte	9
2.4	Beeinflussung der Strahlungsbilanz durch Radiation Management	10
2.5	Nebenwirkungen von Radiation Management	11
2.6	Radiation Management und der globale Kohlenstoffkreislauf	13
2.7	Die Messbarkeit von RM-Eingriffen	15
3	Technische und betriebswirtschaftliche Bewertungen von RM-Technologien	16
3.1	Reflektoren im Weltall	17
3.2	Ausbringen von Aerosolen in der Stratosphäre	19
3.3	Modifikation von Zirruswolken	22
3.4	Modifikation mariner Schichtwolken	23
3.5	Modifikation der Erdoberflächenalbedo	26
3.6	Neue Technologie-Entwicklungen	27
4	Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Kosten und Effektivität	28
4.1	Die Bedeutung von Preis- und Skaleneffekten	30
4.2	Symptomatische versus ursächliche Beeinflussung der Strahlungsbilanz und dynamische Effizienz	31
4.3	Berücksichtigung sozialer Kosten und Erträge	32
4.4	Bewertung zukünftiger Ereignisse	33
5	Wirtschaftliche, politische und soziale Interdependenzen und Konflikte	34
5.1	Gesamtwirtschaftliche Interdependenzen	35
5.2	Politisches Konfliktpotential	38
5.3	Soziales Konfliktpotential	40

6	Forschungsvorhaben und Akteure der Forschung	42
6.1	Öffentlich geförderte Forschungsvorhaben	42
6.2	Private Forschungsvorhaben	47
7	Zusammenfassung der Ergebnisse	48
	Literaturverzeichnis	55

1 Einleitung

Jonas Dovern, Gernot Klepper, Wilfried Rickels

1.1 Radiation Management als klimapolitische Option?

Naturwissenschaftliche Messungen bestätigen mittlerweile eindeutig eine weltweite Veränderung des Klimas, als dessen wesentliche Ursache die anthropogene Freisetzung von Kohlendioxid (CO₂) gilt. Anstrengungen, diese CO₂-Emissionen global zu kontrollieren, sind bislang gescheitert, und die auf zukünftigen Emissionspfaden basierenden Schätzungen lassen eine weitere deutliche Zunahme der globalen Temperatur und eine Veränderung des Klimas erwarten. Entsprechend beschränkt sich die klimapolitische Diskussion schon lange nicht mehr allein auf die Vermeidung bzw. Verringerung des Klimawandels (*mitigation*), sondern hat auch die Anpassung an den Klimawandel (*adaptation*) in den Blick genommen. Aufgrund der großen Unsicherheiten über die tatsächliche Temperaturreaktion und über nichtlineare Reaktionen innerhalb des komplexen Klimasystems wird seit ein paar Jahren aber auch über direkte technologische Eingriffe in das Klima diskutiert, die es teilweise erlauben, relativ schnell auf den Klimawandel zu reagieren.

Grundsätzlich werden diese Technologien unter dem Sammelbegriff *Climate Engineering* (CE) zusammengefasst. Dabei soll der Teilbegriff Engineering aber nicht die ingenieurtechnische Kontrolle des Klimas suggerieren sondern verdeutlichen, dass diese Eingriffe gezielt vorgenommen werden, um das Klima zu beeinflussen bzw. den Klimawandel zu begrenzen.¹ Dabei umfasst der Sammelbegriff *Climate Engineering* sowohl Technologien zur ursächlichen Rückführung des Strahlungsantriebs, welche die Konzentration des atmosphärischen CO₂ (und ggf. anderer Treibhausgase) senken, als auch Technologien zur symptomatischen Kompensation des Strahlungsantriebs, welche die Strahlungsbilanz direkt beeinflussen. Erstere werden als *Carbon Dioxide Removal* (CDR) bezeichnet und die zweite Technologiegruppe als *Radiation Management* (RM).

Berücksichtigt man bei der Definition des Begriffs *Climate Engineering* als zusätzliches Kriterium, dass eine schnelle und signifikante Veränderung des Klimas erreicht werden soll, so könnte man den Begriff auch auf jene Technologien einschränken, die eine direkte Beeinflussung der Strahlungsbilanz zulassen – also RM (z.B. Barrett 2009; Barrett 2014). Beim Einsatz dieser Technologien kommt nicht zu einer ursächlichen Rückführung des treibhausgasbedingten Strahlungsantriebs, sondern nur zu einem Ausgleich. Entsprechend unterscheiden sie sich sehr deutlich von der Emissionskontrolle. Um dieses Charakteristik hervorzuheben, wurde in einer Studie des Bipartisan Policy Center als neuer Begriff *Climate Remediation* eingeführt (Long et al. 2011). Da dieser Begriff der Sanierung jedoch eher eine grundsätzliche Behebung des Problems suggeriert, wird in dieser Arbeit weiterhin der Oberbegriff *Radiation Management* für solche Technologien verwendet (Rickels et al. 2011: 41), die direkt entweder die kurzwellige (*Solar Radiation Management*, SRM) oder die langwellige Strahlung (*Thermal Radiation Management*, TRM) beeinflussen. Durch Verwendung dieses Begriffs anstelle von *Climate Engineering*, soll verdeutlicht werden, dass es um einen direkten Eingriff in den Strahlungshaushalt der Erde geht und nicht um eine ursächliche Rückführung des Strahlungsantriebs.

In Abgrenzung dazu erlauben die CDR-Technologien die Senkung der atmosphärischen CO₂-Konzentration und wirken damit auf die Ursache des Strahlungsantriebs. Allerdings ist das Potential dieser Technologien entweder aus technischen Gründen oder durch die Betriebskosten einer globalen Durchführung so begrenzt, dass sie keine schnelle Beeinflussung der Temperatur erlauben (Klepper und Rickels 2014). Diese Technologien stellen damit eine Option dar, die sich deutlich weniger von

¹ Daher erscheint dieser Sammelbegriff präziser als der etwas weitere Sammelbegriff *Geoengineering*, da dieser grundsätzlich auch Eingriffe in die Umwelt wie die Modifikation von Küsten oder das Umleiten von Flüssen beschreiben könnte.

der Vermeidung von Emissionen unterscheidet als das bei den RM-Technologien der Fall ist. Entsprechend könnte man die CDR-Technologien sowie die Emissionskontrolle auch unter dem Obergriff *Concentration Management* (CM) subsumieren (Rickels et al. 2011: 41). Allerdings würden durch den Einsatz von CDR-Technologien nicht nur der Kohlenstoffkreislauf, sondern auch andere Energie- und Stoffkreisläufe beeinträchtigt, je nachdem ob physikalische, chemische oder biologische Prozesse zur Hilfe genommen werden um zusätzliches CO₂ einzulagern. CDR-Technologien erlauben allerdings die direkte Beeinflussung der CO₂-Emissionen anderer Akteure, denn durch CDR-Technologien wird bereits emittiertes CO₂ aus der Atmosphäre entfernt. Da durch CDR-Technologien im Gegensatz zur Emissionskontrolle nicht die Angebotsseite der fossilen Brennstoffe beeinflusst wird, lässt sich das Problem des internationalen *Carbon Leakage* umgehen, so dass diese Technologien einen strategischen Vorteil haben (Rickels et al. 2011: 70).

Die in diesem Diskussionsbeitrag stattfindende Konzentration auf RM-Technologien bezieht sich damit auf Interventionen, mit denen der Klimawandel schnell und kurzfristig beeinflusst werden kann. Aber es werden nicht die Ursachen und auch nicht alle Dimensionen des Klimawandels damit angesprochen, sondern es soll die durchschnittliche Erdtemperatur abgesenkt werden. Bei den SRM-Maßnahmen lässt sich die kurzweilige Sonneneinstrahlung zum einen durch Reflektoren im Weltall reduzieren; zum anderen kann durch das Einbringen von Aerosolen in der Stratosphäre, durch künstliche marine Schichtwolkenbildung oder durch Modifikationen an der Erdoberfläche deren Rückstrahlung (Albedo) erhöht werden. Beim TRM lässt sich die langwellige thermische Abstrahlung durch Beeinflussung von Zirruswolken erhöhen. Allerdings ist das Instrumentarium der RM-Technologien nicht als endgültig zu betrachten; es wird laufend durch neue Vorschläge oder Technologievariationen bereichert.

Auch wenn die Debatte um *Climate Engineering* im Kontext des Klimawandels als relativ neues Phänomen wahrgenommen wird, gehen die Diskussion über technologische Eingriffe in das Klimasystem und Versuche, solche Maßnahmen zu verwirklichen, bis in das 19. Jahrhundert zurück. Dabei war die Intention zuerst häufig eine Veränderung lokaler Wettervariablen, wie z.B. die Veränderung der Niederschlagsmenge (Fleming 2010). Allerdings wurde bereits im Jahr 1965 US-Präsident Johnson von seinen Beratern auf die Möglichkeit hingewiesen, durch RM-Maßnahmen dem anthropogenen Klimawandel zu begegnen. Als möglicher Eingriff wurde damals über eine Veränderung der globalen Albedo durch Ausbringung von reflektierendem Material auf dem Ozean nachgedacht. In den nachfolgenden Jahren fokussierte sich die Diskussion aber wieder stärker darauf, den durch Treibhausgase ausgelösten Strahlungsantrieb durch Eingriffe in den globalen Kohlenstoffkreislauf zu dämpfen bzw. die CO₂-Aufnahme der natürlichen Senken durch Aufforstung oder Eisendüngung im Ozean zu steigern.

Arbeiten zu möglichen RM-Technologien (z.B. CSEPP 1992; Teller et al. 1997; Teller et al. 2002) gerieten dagegen bis vor kurzem kaum in den Fokus der wissenschaftlichen Diskussion über die Reaktion auf den anthropogenen Klimawandel. Erst die Arbeit von Paul Crutzen (2006), in der er die Möglichkeit der technischen Injektion von Schwefelpartikeln in die Stratosphäre aufgriff (Budyko 1977), ändert dies. Crutzen argumentiert, dass das Einbringen kleiner Mengen Schwefels in die Stratosphäre möglicherweise im Vergleich zu einem ungebremsen Klimawandel das kleinere Übel sei, zumindest im Hinblick auf die zunehmend stärkere Kontrolle von industriellen Schwefelemissionen, die den durch die Treibhausgasemissionen verursachten Temperaturanstieg etwas dämpfen würden. Als Reaktion auf die nachfolgenden Publikationen und die zunehmende Bedeutung in der öffentlichen Diskussion veröffentlichte zum Beispiel die Royal Society im Jahr 2009 ihren Report *Geoengineering the Climate*, in dem sie den Wissenstand zu den verschiedenen technischen RM- und CDR-Technologien zusammenfasste und bewertete (Royal Society 2009). Der Bericht befasste sich darüber hinaus in Ansätzen auch mit den politischen, rechtlichen und ethischen Fragen zum Thema *Climate Engineering*.

1.2 Die öffentliche und politische CE-Debatte

Die Debatte über die mögliche Rolle von RM-Technologien für die Begrenzung des anthropogenen Klimawandels wird sehr kontrovers geführt.² Als Argumente für den Einsatz solcher Technologien wird vor allem angeführt, dass (i) bei hoher Klimasensitivität die Folgen des Klimawandels stärker sein können als noch vor einigen Jahren geschätzt, (ii) die internationalen Verhandlungen zum Klimaschutz zu langsam Fortschritte erzielen, (iii) die bereits eingeleitete Erwärmung bereits für lange Zeiträume nicht mehr umkehrbar ist, und (iv) das Überschreiten kritischer Schwellenwerte im Klimasystem zu katastrophalen Schäden führen könnte. Entsprechend wird argumentiert, dass insbesondere RM-Technologien vor diesem Hintergrund eine notwendige (Notfall-)Maßnahme bzw. Versicherungsoptionen darstellen.

Hiergegen wird aber eingewandt, dass (i) erhebliche Unsicherheiten über die Nebenfolgen der verschiedenen Technologien bestehen, (ii) sich bei einer Unterbrechung oder Abbruch des RM-Einsatzes ein viel schlimmerer Klimawandel einstellen kann, (iii) vorwiegend die mittlere Temperatur aber nicht alle anderen Aspekte des Klimawandels gezielt beeinflusst werden können, (iv) aufgrund der unterschiedlichen regionalen Auswirkungen erhebliche Verteilungseffekte und entsprechende gesellschaftliche und geopolitische Konflikte auftreten können, und (v) die Anstrengungen für die Emissionskontrolle reduziert werden. Darüber hinaus spielen in der Debatte auch grundsätzliche Einwände, die auf normativen Einstellungen basieren (z.B. religiöse oder zivilisationskritische Argumente) eine wichtige Rolle.

Mittlerweile beschäftigen sich zahlreiche Wissenschaftler mit RM-Technologien, und eine zunehmende Anzahl an Forschungsartikeln zu den verschiedenen Aspekten erscheint in anerkannten Zeitschriften. Dabei überwiegt die Meinung, dass ein großskaliger Eingriff in das Klimasystem mit zahlreichen Nebeneffekten und unkalkulierbaren Risiken verbunden ist, und dass die Option drastischer Emissionsreduktion auf jeden Fall zu bevorzugen ist. Im Hinblick auf die ausbleibende politische Realisierung einer hinreichend effektiven Emissionskontrolle nimmt aber die Zahl der Stimmen zu, die eine systematische und rechtzeitige Erforschung von *Climate Engineering* befürworten (für eine Übersicht siehe Kintisch 2010). Insgesamt beschränkt sich die Debatte aber immer weniger nur auf die wissenschaftliche Machbarkeit oder die Effizienz dieser Technologien, sondern wird auch um Regulierungs-, Wahrnehmungs- oder Rechtmäßigkeitsfragen bereichert. Dabei nehmen an der Debatte zunehmend auch Vertreter aus den Medien, Nichtregierungsorganisationen und Stakeholdern teil.

1.3 Gliederung und Ansatz des Diskussionsbeitrages

Vor dem Hintergrund der intensiver werdenden Debatte über Technologien zur Beeinflussung des globalen Strahlungshaushalts, die gleichzeitig auch immer komplexer und vielschichtiger wird, soll der vorliegende Beitrag einen Überblick über den derzeitigen Kenntnisstand zu verschiedenen RM-Technologien geben. Dabei soll der Diskussionsbeitrag als grundsätzlicher Überblick über die technologischen Möglichkeiten zur Beeinflussung der Strahlungsbilanz dienen, aber auch die verschiedenen einzelnen Verfahren und Konzepte beleuchten. Um einzuschätzen, ob diese Technologien tatsächlich eine schnelle und signifikante Beeinflussung der Temperatur erlauben, wird auf deren Effektivität und Effizienz eingegangen. Dabei erfordert die Bewertung der Effektivität die Berücksichtigung der zahlreichen Nebenwirkungen dieser Technologien, um die gesamte Wirkung auf das Klima einschätzen zu können. Aus den verschiedenen Wirkungen und Nebenwirkungen der RM-Technologien ergeben sich aber auch wirtschaftliche, politische und soziale Risiken, die ebenfalls bei der Diskussion über die verschiedenen Technologien zu berücksichtigen sind. Um die zukünftige

² Für eine detaillierte Analyse der Debattenstruktur vgl. Rickels et al. (2011: Kapitel 2) bzw. Betz und Cacean (2011).

Entwicklung bei diesen Technologien abzuschätzen, ist aber auch wichtig, laufende Forschungsprojekte und -akteure sowie die derzeit wichtigsten Wissens- und Forschungslücken zu identifizieren.

In Kapitel 2 wird ein grundsätzlicher Überblick über die Strahlungsbilanz der Erde gegeben. Dann wird darauf eingegangen, wie die anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen und Aerosolen, aber auch Landnutzungsänderungen, diese Bilanz beeinflussen und entsprechend das Klima verändern. Im Hinblick auf die Veränderung des Klimas wird auch auf die Schwierigkeit diskutiert, die Klimasensitivität abzuschätzen bzw. das Auftreten von Kipppunkten im Klimasystem zeitlich zu identifizieren oder sogar vorherzusagen. Anhand dieser grundlegenden Darstellung zum Kenntnisstand über die Funktionsweise des Erdsystems wird anschließend gezeigt, wie die Strahlungsbilanz gezielt durch RM-Technologien beeinflusst werden kann und inwieweit es diese Technologien erlauben, den Klimawandel zu begrenzen. Zusätzlich werden auch die grundsätzlichen Grenzen und Nebenwirkungen dieser RM-Technologien und ihre Wechselwirkungen mit CDR-Technologien diskutiert.

In Kapitel 3 werden die derzeit diskutierten Technologien in Bezug auf ihre naturwissenschaftlichen, technischen und betriebswirtschaftlichen Aspekte gegenübergestellt. Im Einzelnen wird die Ausbringung von Reflektoren im Weltall, die Injektion von Schwefel oder Nanopartikeln in die Stratosphäre, die Modifikation von Zirruswolken und von marinen Schichtwolken sowie die Veränderung der Erdoberflächenalbedo diskutiert. Diese RM-Technologien werden seit dem Erscheinen des Royal-Society-Reports am häufigsten diskutiert. Trotzdem handelt es sich dabei mehr oder weniger nur um eine Momentaufnahme, und entsprechend wird in dem Kapitel auch auf neue Überlegungen zu zukünftigen Technologieentwicklungen eingegangen.

In Kapitel 4 wird, ausgehend von den betriebswirtschaftlichen Details, eine umfassende Kostenschätzung präsentiert, die dann kritisch diskutiert wird. Es wird vor allem auf die Ungenauigkeit und Vorläufigkeit der derzeit existierenden Kostenschätzungen eingegangen, bei denen bislang weder Preis- und Skaleneffekte, noch die dynamische Effizienz oder die gesamtwirtschaftlichen Kosten hinreichend berücksichtigt werden. Darüber hinaus wird auf die Problematik der Bewertung von Ereignissen in der fernen Zukunft und entsprechende gesamtwirtschaftliche Kosten eingegangen.

In Kapitel 5 wird auf die möglichen wirtschaftlichen, politischen und sozialen Konfliktpotentiale der RM-Technologien eingegangen. Die Analyse geht von den verschiedenen Nebenfolgen auf das Erdsystem aus, die auf Basis der Modellstudien bisher ermittelt wurden. Dafür wird zuerst die grundlegende Bedeutung der Einbeziehung von RM-Technologien für den Klimaschutz diskutiert, um dann genauer darauf einzugehen, welche Verteilungskonflikte sich bei einem möglichen global wirkenden Einsatz von RM-Technologien ergeben, wie diese bei einem unkoordinierten unilateralen Einsatz politische Probleme nach sich ziehen, und wie diese Konflikte und Probleme in der Bevölkerung und Öffentlichkeit wahrgenommen werden. Dabei wird auch auf mögliche intergenerationale Konflikte eingegangen.

In Kapitel 6 werden die generellen Konturen der nationalen und internationalen CE-Forschung skizziert. Dabei wird sowohl auf öffentlich geförderte Forschungsprogramme als auch auf privatwirtschaftlich finanzierte CE-Aktivitäten eingegangen.

In Kapitel 7 werden die wichtigsten Aspekte des Diskussionsbeitrages abschließend zusammengefasst.

2 Die anthropogen verursachte Störung der Strahlungsbilanz der Erde und Radiation Management

Gernot Klepper, Andreas Oeschles, Ulrich Platt, Wilfried Rickels

Naturwissenschaftliche und technische Grenzen bilden die Grundlage für das Verständnis und die Bewertung von RM-Technologien. Daher wird im Folgenden zunächst die Strahlungsbilanz der Erde dargestellt und anhand dieser Darstellung die anthropogene Störung durch die Emission von Treibhausgasen und die Veränderung der Landoberfläche erklärt. Dann wird darauf eingegangen, wie die Strahlungsbilanz der Erde theoretisch zu beeinflussen ist, welche grundsätzlichen Nebenwirkungen und Grenzen mit einer solchen Intervention verbunden wären und welche Wechselwirkungen sich durch eine solche Intervention mit dem globalen Kohlenstoffkreislauf bzw. dessen gezielter Beeinflussung (durch CDR-Technologien) ergeben.

2.1 Die Strahlungsbilanz der Erde

Am oberen Rand der Atmosphäre beträgt die Flussdichte der einfallenden Sonnenstrahlung (Solarkonstante, S_0) etwa 1 368 Watt pro Quadratmeter (W/m^2). Im Mittel über die Gesamtoberfläche der Erde stehen $\frac{1}{4}$ dieses Wertes, also rund 342 W/m^2 zur Verfügung. Davon werden im Mittel von den Wolken und der Erdoberfläche ca. 30 % direkt ins Weltall zurückreflektiert (d.h., die planetare Albedo (A) beträgt ca. 30 %), so dass etwa 240 W/m^2 die Erde erwärmen.³ Im thermischen Gleichgewicht steht diesem einfallenden Energiefluss ein gleich großer Fluss von Wärmeabstrahlung entgegen. (Hier sei vernachlässigt, dass die Erde sich derzeit durch den anthropogenen Treibhauseffekt bereits nicht mehr im thermischen Gleichgewicht befindet, sondern im globalen Mittel ca. $0,85 \text{ W/m}^2$ mehr Strahlung empfängt als sie aussendet (Hansen et al. 2005). Diese Leistungsdifferenz erhöht die Erdtemperatur und somit die thermische Abstrahlung so lange bis wieder ein Gleichgewichtszustand vorliegt.

Einfallende und ausgehende Strahlung unterscheiden sich stark hinsichtlich ihrer spektralen Verteilung. Die einfallende Sonnenstrahlung erreicht ihr Maximum im Bereich des sichtbaren Lichtes und reicht bis zu infraroten Wellenlängen von einigen Mikrometern (μm), während die Wärmeabstrahlung der Erde um eine Wellenlänge von $15 \mu\text{m}$ konzentriert ist. Beide Verteilungen überlappen kaum. Es ist daher etabliert, zwischen kurzwelligem (*short wave*, SW, Wellenlänge kürzer als $3,5 \mu\text{m}$) und langwelligem (*long wave*, LW, Wellenlänge länger als $3,5 \mu\text{m}$) Strahlungsfluss zu unterscheiden.

Die Temperatur der Erdoberfläche wird durch das Gleichgewicht zwischen kurzwelligem und langwelligem Strahlungsfluss ($F_{\text{SW}} = \frac{1}{4} S_0$ und F_{LW}) bestimmt. Die Stärke der langwelligen Ausstrahlung ist stark temperaturabhängig und gegeben durch: $F_{\text{LW}} = \epsilon_B \sigma_{\text{SB}} T^4$. Dabei bezeichnen ϵ_B das Emissionsvermögen des Erdbodens im LW Strahlungsbereich, das knapp unter 1 liegt und im Folgenden gleich 1 gesetzt wird; $\sigma_{\text{SB}} = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ bezeichnet die Stephan-Boltzmann-Konstante, T die absolute Temperatur (also Celsiustemperatur + 273,15) des strahlenden Körpers (hier also der Erdoberfläche) in Kelvin.

Hierbei ist zu beachten, dass die Atmosphäre im SW-Bereich weitgehend durchlässig ist, im LW-Bereich atmosphärische Spurengase (Treibhausgase) jedoch in einem weiten Spektralbereich Wärmeabstrahlung absorbieren und emittieren. Ausgehend von räumlichen und zeitlichen Mittelwerten, lässt sich die Bodentemperatur in einem Zweischichtenmodell approximieren, wobei Atmosphäre und Boden jeweils die beiden Schichten darstellen. Die atmosphärische Schicht, zwischen der Bodenschicht

³ Der Wärmefluss aus dem Erdinneren und die Wärmeproduktion durch Gezeitenbewegung sind mit zusammen weniger als $0,1 \text{ W/m}^2$ in diesem Zusammenhang vernachlässigbar.

und der Sonne mit der Atmosphärentemperatur T_a hat im kurzwelligen Strahlungsbereich eine Albedo (A) und im langwelligen Strahlungsbereich eine gewisse Absorption $\alpha < 1$, die auch wieder einer gewissen Abstrahlung (Kirchhoffsches Gesetz) entspricht. Wird nun der kurzwellige und langwellige Strahlungsfluss nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz an der Unterseite und der Oberseite der Atmosphäre ins Gleichgewicht gesetzt, so lässt sich die Bodentemperatur T_b der unteren Schicht bestimmen durch ($\sigma_{SB} = \sigma$):

$$T_b = \sqrt[4]{\frac{S_0(1-A)}{2\sigma(2-\alpha)}} \quad (1)$$

Obwohl dieses einfache Modell viele wichtige Prozesse des Erdsystems unberücksichtigt lässt, ergibt sich für ein realistisches α im Bereich von 0,8 ein erstaunlich guter Wert für die mittlere Erdtemperatur von $T_b = 15^\circ \text{C}$. Gleichung (1) lässt sich auch entnehmen, dass sich die Bodentemperatur erhöht, wenn entweder die Absorption der Atmosphäre (α), beispielsweise durch Erhöhung der Treibhausgaskonzentration, steigt, oder die Albedo (A) sinkt. Führt man die oben stehende Rechnung ohne Berücksichtigung der Atmosphäre durch ($\alpha = 0$), so ergibt sich eine Bodentemperatur von nur ca. -18°C . Die Differenz von 33°C zur beobachteten Durchschnittstemperatur zeigt eindrücklich die Bedeutung der natürlichen Spurengase (insbesondere Wasserdampf, Methan und CO_2) für das Klima und die Biosphäre.

2.2 Die anthropogene Störung der Strahlungsbilanz

Naturwissenschaftliche Analysen deuten immer stärker auf eine sich beschleunigende Veränderung des Weltklimas hin. So hat der Weltklimarat (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC) in seinem vierten und fünften Sachstandsbericht erneut deutlich gemacht, dass die Erwärmung des globalen Klimas eindeutig durch die Beobachtung einer Erhöhung der globalen durchschnittlichen Luft- und Ozeantemperatur sowie der Verringerung der Schnee- und Eisbedeckung und einer Erhöhung des mittleren Meeresspiegels belegt wird (IPCC 2007; IPCC 2014). Die Experten sind sich einig, dass diese Erwärmung fast ausschließlich auf den anthropogenen Einfluss innerhalb der Strahlungsbilanz zurückzuführen ist. Der anthropogene Einfluss beruht im Wesentlichen auf der Emission von Treibhausgasen und Aerosolen in die Atmosphäre.⁴ Diese Einflüsse werden als sogenannte Strahlungsantriebe, d.h. Änderung des Netto-Strahlungsflusses an der Tropopause in W/m^2 , quantifiziert (Forster et al. 2007).

Die Emissionen von Treibhausgasen – wie beispielsweise CO_2 , CH_4 oder N_2O – erhöhen deren Konzentration in der Atmosphäre, verringern damit die atmosphärische Durchlässigkeit für langwellige Wärmeabstrahlung und vergrößern somit α in der Gleichung (1). Entsprechend haben sie einen wärmenden Effekt. Zudem bewirkt eine erhöhte Konzentration von Treibhausgasen, dass die Emission der Atmosphäre aus größerer Höhe erfolgt, in der die Temperatur in der Regel niedriger ist, dementsprechend ist die Abstrahlung in den Weltraum weniger effizient. Dieser Effekt und noch weitere, subtilere Wirkungen erhöhter Treibhausgaskonzentrationen werden in Klimamodellen behandelt. Der Strahlungsantrieb durch Zunahme der Konzentration von atmosphärischem CO_2 sowie weiterer Treibhausgase seit Beginn der Industrialisierung wird auf $2,6 \text{ W/m}^2$ geschätzt. Der anthropogen verursachte Treibhauseffekt wird vor allem durch die Erhöhung der CO_2 -Emissionen bestimmt. Die CO_2 -Emissionen bzw. die damit ansteigende CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre verursachen

⁴ Zusätzliche Veränderungen in der globalen Strahlungsbilanz ergeben sich durch (anthropogene) Veränderungen der Erdoberfläche und aus einer (nichtanthropogen) geringfügigen Veränderung der solaren Einstrahlung (IPCC 2007).

den Klimawandel. Besonders bedeutsam bei CO_2 ist seine lange Verweildauer in der Atmosphäre. Zwar wird derzeit jährlich ungefähr die Hälfte der anthropogenen CO_2 -Emissionen durch die terrestrischen und ozeanischen Senken aufgenommen (Raupach und Canadell 2010), allerdings zieht sich der vollständige Abbauprozess über sehr lange Zeitskalen hin. Bei Emissionen von insgesamt 1 000 Gigatonnen (Gt) Kohlenstoff (5 000 Gt Kohlenstoff) bleibe mehr als 20 % (40 %) des anthropogenen CO_2 länger als 1 000 Jahre in der Luft (Archer und Brovkin 2008) und werden erst auf Zeitskalen von hunderttausenden von Jahren durch geologische Verwitterungsprozesse aus der Atmosphäre entfernt.

Die Emissionen von Aerosolen – wie beispielsweise Schwefel und Nitratpartikel oder Stäube – erhöhen überwiegend die Rückstrahlung kurzwelliger Sonneneinstrahlung. Aerosole erhöhen zusätzlich die Streuung der kurzwelligen Strahlung in der Atmosphäre und beeinflussen Wolkeigenschaften. Des Weiteren hat sich die Albedo der Erdoberfläche durch Landnutzungsänderungen erhöht (vermehrte Reflektion von kurzwelliger Strahlung: ca. $-0,2 \text{ W/m}^2$). Beide Effekte zusammen werden im vierten Sachstandsbericht des IPCC als abkühlender Strahlungsantrieb von $-1,2 \text{ W/m}^2$ abgeschätzt, da sie den Parameter A in der Gleichung (1) erhöhen. Eine Sonderstellung unter den anthropogenen luftgetragenen Staubpartikeln nehmen Ruß-Aerosole ein, die – ähnlich wie Treibhausgase – Strahlung absorbieren und somit erwärmend wirken können (Jacobson 2001; Hansen 2002). Durch Rückkopplungen auf die Temperaturschichtung der Atmosphäre sowie Wechselwirkungen mit Wolken könnte diese erwärmende Wirkung allerdings abgeschwächt oder aufgehoben werden (Koch und DelGenio 2010; Koch et al. 2011). Dieses Ergebnis ist jedoch mit großer Unsicherheit verbunden (Forster et al. 2007).

Insgesamt dominiert aber sehr deutlich der Treibhauseffekt, so dass der Nettostrahlungsantrieb von Modellrechnungen auf aktuell $1,6 \text{ W/m}^2$ (mit einem Unsicherheitsbereich von $0,6$ bis $2,4 \text{ W/m}^2$) im Vergleich zum vorindustriellen Niveau geschätzt wird (Forster et al. 2007). Die ebenfalls mit Unsicherheiten verbundene Bestimmung des Strahlungsungleichgewichts aus Satellitenmessungen aus den Jahren 2000 bis 2004 ergibt eine Rate von etwa $0,9 \text{ W/m}^2$ für die Zunahme des Wärmeinhaltes des Erdsystems (inklusive Rückkopplungen) (Trenberth et al. 2009). Die Differenz zwischen diesen beiden Werten zeigt, dass ein Teil des Nettostrahlungsantriebs bereits zu einer Zunahme des Energiegehalts und dementsprechenden Erhöhung der thermischen Abstrahlung geführt hat.

2.3 Klimasensitivität und Kippunkte

Die Erhöhung der mittleren globalen Oberflächentemperatur für einen gegebenen Strahlungsantrieb wird als Klimasensitivität des Systems bezeichnet. Die mit dem anthropogenen Nettostrahlungsantrieb verursachte Erderwärmung kann durch Modellrechnungen abgeschätzt werden. Durch Ableitung der Gleichung (1) nach S_0 erhält man einen Schätzwert für die Temperaturveränderung als Folge von Änderungen in der Einstrahlung S_0 (bzw. des Strahlungsantriebes). Für die oben angegebenen Größen ergibt sich eine Klimasensitivität von lediglich $0,2^\circ \text{ C pro W/m}^2$. Das heißt, eine Änderung des Strahlungsantriebs von 1 W/m^2 würde nur zu einer Erhöhung der Bodentemperatur um etwa $0,2^\circ \text{ C}$ führen. Tatsächlich zeigen aber Modellrechnungen und rezente sowie paläoklimatische Beobachtungen eine viel höhere Klimasensitivität, die im Bereich von $0,8^\circ \text{ C}$ bis $1,4^\circ \text{ C}$ liegt (Forster et al. 2007). Dies illustriert, wie wichtig verschiedene Rückkopplungseffekte für die Bestimmung der Temperaturreaktion auf Änderungen des Strahlungsantriebes sind.

Diese Rückkopplungen (insbesondere die Zunahme des natürlichen Treibhausgases Wasserdampf und die Abnahme des Meereises) bestimmen mehr als die Hälfte des berechneten Temperaturanstiegs. Allerdings ist ihr Verständnis und entsprechend ihre Modellierung mit Unsicherheiten behaftet, so dass sich die Konsequenzen des anthropogenen Strahlungsantriebs nur als Bandbreite angeben lassen. Basierend auf verschiedenen Beobachtungen und Modellen lässt sich eine Schätzung für diese

Klimasensitivität ableiten: Bei einer Verdopplung der vorindustriellen CO₂-Konzentrationen liegt der dadurch ausgelöste Temperaturanstieg wahrscheinlich zwischen 2° und 4,5° C (Knutti und Hegerl 2008). Es ist außerdem nicht möglich, noch höhere Werte prinzipiell auszuschließen.

In dem vierten Sachstandsbericht des IPCC wird eine gegenwärtige Erwärmung durch die bis zum Jahr 2005 emittierten Treibhausgase von etwa 0,2° C pro Jahrzehnt angegeben (Forster et al. 2007). Die bis zum Ende des 21. Jahrhunderts projizierte Erwärmung hängt stark von der zukünftigen Entwicklung der anthropogenen Emissionen ab und wird nach heutigem Kenntnisstand wahrscheinlich im Bereich von 1,1° bis 6,4° C liegen. Die geographische Verteilung der erwarteten Erwärmung ist dabei nicht gleichmäßig, sondern besonders stark über den Landmassen und in der Arktis (Forster et al. 2007). Dabei ist das Klimasystem der Erde durch eine Hierarchie verschiedener Zeitskalen gekennzeichnet, mit der es auf eine Veränderung des Strahlungsantriebs reagiert. Während die Tiefenwasser der Ozeane und die Biosphäre aufgrund der langsamen Wärmetransports durch die Ozeanzirkulation und der langen Anpassungszeiten von Landökosystemen und Böden erst im Laufe von Jahrhunderten auf die Erwärmung reagieren (Knutti und Hegerl 2008), erreicht die Erdoberflächentemperatur ihren neuen Gleichgewichtszustand bereits nach wenigen Jahren (Schwartz 2007, 2008).

Die Abschätzung der Auswirkungen der anthropogenen Störung der Strahlungsbilanz wird neben der Unsicherheit über die Klimasensitivität zusätzlich durch sogenannte Kippunkte im Klimasystem (*Tipping Points*) erschwert. Ein Kippunkt ist eine kritische Schwelle, an welcher der zukünftige Zustand des Klimasystems bereits durch eine kleine Änderung des Strahlungsantriebs durch sich selbst verstärkende Prozesse unumkehrbar verändert wird (Rickels et al. 2011). Ein Kippelement ist dabei ein ausreichend großer Teil des Erdsystems, dessen qualitativer Zustand sich durch Überschreiten des ihm zugehörigen Kippunktes verändert (Lenton et al. 2008; Allison et al. 2009). Häufig diskutierte Kippelemente sind das Schmelzen des grönländischen Eisschildes, eine Instabilität des westantarktischen Eisschelfs, ein Zusammenbruch der atlantischen Ozean-Zirkulation, die Emission von Treibhausgasen aus auftauenden Permafrost-Böden, großflächiges Waldsterben im Amazonas oder Veränderungen des westafrikanischen oder indischen Monsuns bzw. von El Niño und der Südlichen Oszillation (ENSO). Die Überschreitung eines solchen Kippunktes bzw. die damit verbundene Veränderung eines Kippelements wird häufig als Ereignis mit großen Auswirkungen aber kleiner Eintrittswahrscheinlichkeit (*high-impact-low-probability event*) beschrieben. So hätte das Schmelzen oder die Instabilität der Eisschilde in Grönland oder der Antarktis enorme Auswirkungen auf den Anstieg des Meeresspiegels und Veränderungen im westafrikanischen Monsun würden die Trockenheit in der Sahel-Zone beeinflussen. In den meisten derzeitigen Klimamodellen gibt es keine klaren Hinweise auf bevorstehende Überschreitungen bestimmter kritischer Schwellen des Erdsystems. Einige Autoren kritisieren die mangelnde Fähigkeit heutiger Klimamodelle, solche Kippunkte überhaupt vorherzusagen (Hoffmann und Rahmsdorf 2009). Entsprechend werden Frühwarnsysteme und -analysen diskutiert, die es erlauben, Wahrscheinlichkeiten für das Auslösen von Kippunkten in der Klimapolitik zu berücksichtigen (Lenton 2011).

2.4 Beeinflussung der Strahlungsbilanz durch Radiation Management

Die von Menschen verursachten positiven Strahlungsantriebe lassen sich theoretisch durch technische Maßnahmen, also RM, ausgleichen, die zu einem entsprechenden negativen Strahlungsantrieb führen. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass diese Technologien nur symptomatisch wirken, also nur den anthropogenen Strahlungsantrieb kompensieren, aber nicht dessen Auslöser, die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre, zurückführen. Zum einen kann der kurzwellige solare Strahlungsfluss (F_{sw}) reduziert werden. Derartige Technologien werden in der Literatur in der Regel als *Solar Radiation Management* (SRM) bezeichnet. Zum anderen kann der langwellige (thermische) Strahlungsfluss

(F_{LW}) erhöht werden. Diese Maßnahmen werden auch als *Thermal Radiation Management* (TRM) bezeichnet. Im Folgenden werden nur solche Technologien, die direkt die thermische Ausstrahlung erhöhen, als TRM-Technologien bezeichnet.⁵ Tabelle 1 gibt einen Überblick über die betrachteten RM-Technologien.

Tabelle 1:

Überblick über verschiedene CE-Maßnahmen

	Reduktion der kurzwelligen Einstrahlung (S_0), (SRM)	Modifikation im Weltall
RM	Erhöhung der Reflektion kurzwelliger Einstrahlung (A), (SRM)	Modifikation der Erdoberfläche
		Modifikation der marinen Schichtwolken
	Modifikation der Stratosphäre	
	Erhöhung der langwelligen Ausstrahlung von Atmosphärenbestandteilen (α), (TRM)	Modifikation von Zirruswolken

Quelle: Stephens und Keith (2008); Feichter und Leisner (2009); Rickels et al. (2011).

2.5 Nebenwirkungen von Radiation Management

Allen in den solaren Strahlungsfluss eingreifenden RM-Maßnahmen ist gemein, dass selbst bei einer erfolgreichen Zurückführung der globalen Mitteltemperatur – zum Beispiel auf das vorindustrielle Niveau – unvermeidlich Inhomogenitäten auftreten, die auf die unterschiedliche geographische und zeitliche Verteilung des LW- und SW-Strahlungsflusses zurückgehen. Während der LW-Strahlungsantrieb mit einem Maximum in den Subtropen über das Jahr weitgehend konstant und in allen Breiten vorhanden ist, variiert der SW-Strahlungsantrieb räumlich und zeitlich mit den Jahreszeiten wesentlich stärker. Trotz dieses räumlichen und zeitlichen Ungleichgewichtes der Strahlungsantriebe zeigen Modellrechnungen überraschenderweise, dass eine weitgehend homogene Kontrolle der Erdtemperatur mit den unterschiedlichen RM-Technologien möglich sein könnte. Dies wird durch den schnellen und effektiven Energietransport in der Atmosphäre ermöglicht, der sich dem durch RM geänderten Strahlungsantrieb anpasst. Hierdurch ändern sich aber auch die Muster der atmosphärischen Zirkulation und damit der atmosphärische Teil des Wasserkreislaufs (Feichter und Leisner 2009).

Während die gestiegene Treibhausgaskonzentration den hydrologischen Kreislauf im Wesentlichen über die Troposphäre beeinflusst, erfolgt dessen Beeinflussung durch SRM-Maßnahmen hauptsächlich über das Strahlungsbudget an der Erdoberflächen (Feichter und Leisner 2009). Als Folge der geringeren Oberflächeneinstrahlung verdunstet weniger Wasser und die durchschnittliche Niederschlagsmenge kann sinken. Basierend auf den Auswirkungen des Ausbruchs des Pinatubo zeigen Trenberth und Dai (2007), dass es zu einer Abnahme der Niederschläge über Land kam mit entsprechend reduziertem Abfluss über die Flüsse. Ricke et al. (2010) behaupten, dass es bei einer globalen Beeinflussung der Strahlungsbilanz durch SRM per Saldo zu einer Abnahme der globalen Niederschlagsmenge käme, während die globale Niederschlagsmenge ohne RM-Intervention als Folge der zunehmenden Treibhausgasemissionen zunähme. Allerdings verschieben sich die Niederschlagsmuster regional unterschiedlich. Robock et al. (2008) behaupten, dass es bei einem Einsatz von Schwefelaerosolen in der Stratosphäre vor allem zur Reduktion des Niederschlags im asiatischen und

⁵Dabei umfassen TRM-Technologien grundsätzlich auch Technologien zur Reduktion der atmosphärischen Treibhausgaskonzentration, insbesondere des CO_2 . Allerdings wirken diese Technologien ursächlich, da sie nachhaltig den anthropogenen Strahlungsantrieb zurückführen und sind daher von den symptomatischen RM-Technologien abzugrenzen. Entsprechend könnte man die ursächlichen TRM-Maßnahmen auch als *Concentration Management* bezeichnen.

afrikanischen Sommermonsun käme. Hingegen würde sich der Niederschlag in der süd pazifischen Konvergenzzone erhöhen (Rasch et al. 2009).

Insgesamt besteht hier jedoch noch eine sehr große Unsicherheit darüber, wie sich die beiden gegenläufigen Eingriffe in das Klimasystem (erhöhte Treibhausgasemissionen versus erhöhte Rückstrahlung kurzweiliger solarer Einstrahlung) auswirken. Unterschiedliche Modellierungsansätze kommen teilweise zu unterschiedlichen Ergebnissen. Zwar variieren z.B. die Ausgangsparameter in den Arbeiten von Jones et al. (2009) und Rasch et al. (2009) im Hinblick auf die Modifikation mariner Schichtwolken, so dass unterschiedliche starke Ausprägungen der klimatischen Reaktion verständlich sind, allerdings verwundert es, dass die beiden Arbeiten im Hinblick auf die Veränderung des Niederschlags im nordöstlichen Südamerika entgegengesetzte Effekte voraussagen. So zeigt sich in der Arbeit von Jones et al. (2009) ein Rückgang des Niederschlags, während die Arbeit von Rasch et al. (2009) einen leichten Anstieg voraussagt. An dieser Stelle sollen nicht diese beiden Arbeiten kritisiert werden, allerdings zeigen die unterschiedlichen Ergebnisse dennoch, dass derzeit das Erdsystemverständnis noch relativ beschränkt ist und die entsprechende Modellierung Vereinfachungen voraussetzen, die oftmals dazu führen, dass wichtige Rückkopplungsmechanismen oder Effekte nicht hinreichend berücksichtigt werden.

Die unterschiedlichen Auswirkungen von RM-Maßnahmen auf die verschiedenen Klimavariablen werden unter anderem durch die Veränderung der Eisbedeckung bestätigt. Bei einer Verdopplung der vorindustriellen CO₂-Konzentration verringert sich die minimale Eisfläche im Winter auf der Nordhalbkugel um schätzungsweise 20 % und auf der Südhalbkugel um schätzungsweise 36 % (Rasch et al. 2009). Wird die Verdopplung der vorindustriellen CO₂-Konzentration durch Wolkenmodifikation kompensiert, bedeutet eine Anwendung dieser Maßnahme auf 40 % der Ozeanoberfläche, dass sich die minimale Eisfläche nur noch um 9 % (Nordhalbkugel) bzw. 8 % (Südhalbkugel) reduziert. Wird hingegen die Maßnahme auf 70 % der Ozeanoberfläche ausgedehnt, reduziert sich die minimale Eisfläche auf der Nordhalbkugel nur noch um 2 %, während sie auf der Südhalbkugel um 20 % steigt (Rasch et al. 2009). Entsprechend müsste die Maßnahme weiter ausgedehnt werden, um auch den Rückgang der minimalen Eisfläche auf der Nordhalbkugel zu kompensieren, während auf der Südhalbkugel bereits eine Überkompensation vorliegt. Würde diese Maßnahme aber tatsächlich auf 70 % der Ozeanoberfläche angewandt, so würde der Temperaturanstieg überkompensiert werden und die globale Durchschnittstemperatur würde 0,4° C unter der vorindustriellen Durchschnittstemperatur liegen (Rasch et al. 2009).

Auch wenn diese Modellergebnisse noch mit großen Unsicherheiten behaftet sind, verdeutlichen sie, dass RM den durch Treibhausgase induzierten Anstieg der durchschnittlichen Temperatur rückgängig machen kann. RM kann aber nicht gleichzeitig die Veränderung aller anderen Klimavariablen gleichmäßig zurückführen. Dies gilt insbesondere für die Niederschlagsmuster. Als Folge tritt bei dem Einsatz von RM eine Situation ein, in der nicht das „alte“ Klima wiederhergestellt wird, sondern ein neues „künstliches“ Klima erzeugt wird. RM macht den Klimawandel also nicht einfach rückgängig sondern erzeugt ein neues Klima auf der Erde. Dabei wird aber aufgrund der hohen internen Variabilität des Klimasystems bei vielen Aspekten schwer zu identifizieren sein, was bei diesem neuen Klima ursächlich RM zugeschrieben werden kann und was natürliche Variabilität in dem neu erzeugten Klima ist. Das trifft natürlich insbesondere auf extreme Wetterphänomene zu, die als Folge von RM-Eingriffen auftreten könnten. Allerdings liegen zu einer Veränderung der Häufigkeit und des Ausmaßes von extremen Wetterereignissen derzeit noch keine Ergebnisse oder Modellierungsansätze vor.

Die Modifikation von Zirruswolken zielt zwar auf die Beeinflussung der langwelligen Wärmeabstrahlung ab, beeinflusst aber auch die kurzweilige Einstrahlung. Insofern ist hier die Einschätzung von Mitchell und Finnegan (2009), dass bei dieser Technologie diese klimatischen externen Effekte geringer sind, wohl zu optimistisch. Durch den gleichzeitigen Einfluss auf die kurzweilige Einstrahlung hat auch diese Technologie das Potential für große Veränderungen des regionalen Klimas und des

Wasserkreislaufs. Entsprechend sind Änderungen in diesen wichtigen atmosphärischen Variablen damit bei allen RM-Technologie in ähnlich großem Umfang zu erwarten.

Unabhängig von der unterschiedlichen Beeinflussung der verschiedenen Klimavariablen bleibt bei einem Einsatz von RM-Technologien der treibhausgasbedingte Strahlungsantrieb weiterhin erhalten. Brovkin et al. (2009) zeigen mit Klimamodellrechnungen, dass je nach angenommenem Emissionspfad und in Abhängigkeit von der Verweildauer von Treibhausgasen in der Atmosphäre RM-Technologien für mehrere 1 000 Jahre durchgeführt werden müssten, gesetzt die Treibhausgase in der Atmosphäre werden nur auf natürlichem Wege abgebaut und in die terrestrischen oder ozeanischen Senken überführt. Kommt es innerhalb dieses langen Zeitraums zu einem Abbruch oder einer längeren Unterbrechung des Einsatzes von RM-Technologien, dann führt der weiterhin bestehende positive Strahlungsantrieb zu einem sehr schnellen Temperaturanstieg (Brovkin et al. 2009; Ross und Matthews 2009; Llanillo et al. 2010). In einer solchen Situation zeigen sowohl Modellierungsergebnisse von Ross und Matthews (2009) als auch von Llanillo et al. (2010), dass der Temperaturanstieg womöglich viel schneller eintreten würde als es bei Klimawandel ohne RM-Intervention der Fall wäre, da die Temperaturreaktion nicht auf einen kontinuierlichen Erhöhung des Strahlungsantriebs sondern auf einer schlagartigen Erhöhung des Strahlungsantriebs erfolgen würde. Gerade durch diesen sehr schnellen Klimawandel könnte aber die natürliche Anpassungsfähigkeit von Arten oder ganzen Ökosystemen noch stärker gefährdet sein als sie es schon bei dem erwarteten Tempo des Klimawandels ist. Entsprechend könnte ein abrupter Temperaturanstieg die Anpassungsfähigkeit der Arten und Ökosysteme zum Aussterben von Arten oder dem Zusammenbruch ganzer Ökosysteme führen (Ross und Matthews 2009).

2.6 Radiation Management und der globale Kohlenstoffkreislauf

Die RM-Technologien zielen auf die Beeinflussung der globalen Strahlungsbilanz ab, ohne direkt den Kohlenstoffkreislauf zu beeinflussen. Trotzdem ergeben sich Wechselwirkungen mit dem globalen Kohlenstoffkreislauf durch die niedrigen Temperaturen als ohne den Einsatz von RM-Technologien oder die Veränderung des Verhältnisses von direkter zu diffuser Einstrahlung. Umgekehrt haben Änderungen in der Aktivität der natürlichen Kohlenstoffquellen und Senken haben wiederum Auswirkungen auf die Strahlungsbilanz, die über die Beeinflussung der atmosphärischen Kohlenstoffkonzentration hinausgehen.

Im globalen Kohlenstoffkreislauf findet ein permanenter Gasaustausch zwischen der Atmosphäre, der terrestrischen Biosphäre und dem Ozean statt. Entsprechend ergeben sich aus einer Erhöhung der atmosphärischen CO₂-Konzentration ebenfalls Veränderungen in den beiden anderen Reservoiren. Eine Erhöhung der atmosphärischen CO₂-Konzentration führt über einen Düngeeffekt im Allgemeinen zu einer Erhöhung der Primärproduktion. Weiterhin führen höhere Temperaturen generell zu einer höheren metabolischen Aktivität, wobei allerdings sowohl Produktions- als auch Respirationprozesse betroffen sind. Da es bisher keine umfassende quantitative Erfassung der Temperatursensitivitäten aller relevanten Prozesse gibt, sind Vorhersagen über den Nettoeffekt einer Temperaturänderung auf terrestrische oder marine Ökosysteme noch sehr unsicher (Taucher und Oschlies 2011). Terrestrische Ökosystemmodelle gehen davon aus, dass der positive Düngeeffekt durch erhöhte atmosphärische CO₂-Konzentrationen bei fortschreitendem Klimawandel durch den Temperatureffekt zunichte gemacht wird, da die Beschleunigung der Respirationprozesse vor allem in den Böden dominiert (Friedlingstein et al. 2006). Bei einem Abbremsen des Temperaturanstiegs durch RM-Maßnahmen bei gleichzeitigem Anstieg atmosphärischer CO₂-Konzentrationen würde der positive Düngeeffekt aber weiterhin bestehen, sodass die beschleunigte Aufnahme von Kohlenstoff durch terrestrische Ökosysteme nicht mehr durch einen temperaturbedingten Anstieg der Respiration kompensiert werden würde. Der Düngeeffekt ist natürlich nicht nur auf die terrestrische Biosphäre beschränkt. Auch der

steigende CO₂-Gehalt im Meerwasser begünstigt die Kohlenstoffaufnahme vieler Algen (Bollmann et al. 2010).⁶ Es ist also möglich, dass die biologische Aufnahme von Treibhausgasen aus der Atmosphäre unter RM-Maßnahmen schneller ablaufen kann als es ohne die RM-Intervention der Fall wäre.

Kommt es bei RM-Technologien zusätzlich zu einer Verschiebung von direkter zu diffuser solarer Einstrahlung, wie es bei der Injektion von Schwefel in die Stratosphäre der Fall ist, so ergibt sich zusätzlich ein positiver Effekt auf die Photosynthese bzw. das Wachstum von Pflanzen. Dies wurde beispielsweise bei dem Ausbruch des Pinatubo beobachtet. Durch die Erhöhung der diffusen Einstrahlung und der globalen Abkühlung bei gleichzeitig unveränderter atmosphärischer CO₂-Konzentration wurde eine zusätzliche terrestrische Aufnahme von ca. 4 Gigatonnen (Gt) CO₂ pro Jahr festgestellt (Mercado et al. 2009).

Über direkte biologische Wechselwirkungen durch CO₂-Düngung und Temperatureffekte hinaus wirkt das emittierte CO₂ bei einer zunehmenden Lösung im Meerwasser auch als schwache Säure. Inzwischen konnte nachgewiesen werden, dass der pH-Wert des Meerwassers im Zuge des atmosphärischen CO₂-Anstiegs in der Atmosphäre im Mittel bereits um 0,1 Einheiten zurückgegangen ist (Bollmann et al. 2010). Dieser Wert könnte, je nach Entwicklung der CO₂-Emissionen, bis zum Ende unseres Jahrhunderts um weitere 0,3 bis 0,4 Einheiten sinken.

Auch wenn diese Veränderung im Vergleich zu regionalen und saisonalen Änderungen in vielen Meeresgebieten (insbesondere Auftriebsgebiete, Randmeere) klein erscheint, ist bereits der aktuell beobachtete Anstieg des CO₂-Gehalts der Ozeane, was Ausmaß und Geschwindigkeit betrifft, in der Evolutionsgeschichte der letzten rund 20 Millionen Jahre einmalig. Daher ist derzeit noch völlig unklar, inwieweit sich die marine Fauna auf Dauer daran anpassen kann (Bollmann et al. 2010). Immerhin beeinträchtigen die niedrigen pH-Werte im Seewasser den Kalkbildungsprozess, der für viele, vor allem wirbellose Meeresbewohner mit Kalkpanzer wie etwa Muscheln, Korallen oder Seeigel lebenswichtig ist. Wie empfindlich eine Spezies auf die Versauerung der Meere reagiert, lässt sich allerdings nicht ohne weiteres abschätzen und hängt z.B. auch vom Nahrungs- bzw. Energieangebot ab. Dabei sind möglicherweise nicht nur Muscheln, Korallen oder Seeigel betroffen, sondern selbst Fische können beeinträchtigt werden. Zwar sind die erwachsenen Tiere relativ CO₂-tolerant. In frühen Entwicklungsstadien können sie aber empfindlich auf den Stressor CO₂ reagieren. Derzeit gibt es nur erste Untersuchungen für einige wenige Arten, allerdings lassen Untersuchungen an Embryonal- und Jugendstadien verschiedener Arten schließen, dass die frühen Phasen im Entwicklungszyklus eines Organismus generell empfindlicher auf CO₂-Stress reagieren als ausgewachsene Tiere.

Neben den mit einer erhöhten atmosphärischen CO₂-Konzentration einhergehenden chemischen Veränderungen im Ozean, ergibt sich auch an Land eine Beschleunigung der chemischen Verwitterung unter höheren CO₂-Konzentrationen und höheren Temperaturen. Zwar ist hier die Beschleunigung so gering, dass keine signifikanten Veränderungen der atmosphärischen CO₂-Konzentration erwartet werden, es gibt aber messbare Veränderungen in der Verwitterung an historischen Bauwerken.

Mit dem Einsatz von RM-Technologien können anthropogen verursachte Veränderungen im Kohlenstoffkreislauf nur indirekt beeinflusst werden. Dies macht deutlich, dass die Fokussierung der CE-Maßnahmen auf eine Reduktion der Erderwärmung alleine den vielfältigen Aspekten der durch CO₂-Emissionen verursachten Veränderungen im Erdsystem nicht gerecht wird. RM-Maßnahmen können also höchstens einen Teil der anthropogenen Störungen kompensieren. Eine umfassende und nachhaltige Minderung der CO₂-induzierten Effekte kann prinzipiell nur durch eine Absenkung der Treibhausgaskonzentration, z.B. durch CDR-Technologien, erreicht werden.

⁶ So wurde bei Cyanobakterien teilweise ein starker Anstieg der Photosyntheseraten bei erhöhtem CO₂-Gehalt festgestellt. Gleiches trifft auf bestimmte Coccolithophoriden wie *Emiliana huxleyi* zu (Bollmann et al. 2010).

Allerdings ist bei CDR-Technologien zu berücksichtigen, dass es über direkte Effekte auf die atmosphärische CO₂-Konzentration hinaus auch Auswirkungen auf den Strahlungshaushalt gibt. So beeinflusst eine veränderte Landnutzung (z.B. durch Aufforstung) auch die Albedo der umgewandelten Flächen. Neben der Albedo kann das Klima auch über die Evapotranspiration und die Oberflächenstruktur beeinflusst werden. Insbesondere kann der bei Aufforstung wärmende Albedo-Effekt den kühlenden Effekt der Kohlenstoffeinlagerung dämpfen oder sogar überkompensieren. So zeigen Modellrechnungen, dass eine komplette Waldrodung in den nördlichen Breiten (45° N bis 90° N) auf einer Zeitskala von 100 Jahren sogar zu einer globalen Abkühlung von 0,25° C führen könnte (Bathiany et al. 2010), da die Erhöhung der Albedo die Freisetzung von biologischem Kohlenstoff und damit die Erhöhung der atmosphärischen Kohlenstoffkonzentration möglicherweise überkompensiert. Für die Tropen (18,75° S – 15° N) stellt sich die Situation allerdings anders dar. Hier könnte eine vollständige Rodung der Waldflächen zu einer globalen Erwärmung von 0,4° C führen, da hier die durch die Freisetzung von biologischem Kohlenstoff gestiegene atmosphärische Kohlenstoffkonzentration zu einem größeren Temperaturanstieg führt, als die Veränderung der Albedo die Temperatur absenken würde (Pongratz et al. 2010).

Ornstein et al. (2009) schlagen zur Erhöhung der Kohlenstoffbindung in der terrestrischen Biomasse 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 regionale Atmosphärenzirkulation zu Gunsten höherer Niederschläge verändern, was den späteren Bewässerungsaufwand erheblich senken sollte. Das Klimamodell von Ornstein et al. (2005) zeigt wegen der Wolkenbildung über den neu angelegten Wäldern keine signifikante Albedo-Verringerung, die den gewünschten Effekt auf die globale Strahlungsbilanz mindern würde. Als Nebeneffekte diskutieren die Verfasser eine Verringerung der kalten Auftriebsströmung vor Westafrika durch ein aufgrund der Aufforstung verändertes Windfeld, das die regionale Fischerei beeinträchtigen würde.

Entsprechend müssen bei jeder Vegetationsänderung mögliche Einflüsse sowohl auf den Kohlenstoffkreislauf als auch auf die Strahlungsbilanz beachtet werden. Beispielsweise kann bei einer Umwandlung von Wald in stärker reflektierende Grasflächen die terrestrische CO₂-Senke verringert werden, insgesamt aber ein kühlender Einfluss auf das Klima erreicht werden. Generell kann die Aufforstung tropischer Wälder als eher kühlend und die Aufforstung borealer Wälder als tendenziell wärmend angesehen werden (Bathiany et al. 2010).

2.7 Die Messbarkeit von RM-Eingriffen

Funktion und Wirksamkeit einzelner Komponenten von RM-Maßnahmen können prinzipiell in Modellsimulationen, Laborexperimenten oder kleinskaligen Feldexperimenten erbracht werden. Beispiele sind etwa die Erprobung von Transportsystemen für Schwefel in die Stratosphäre (siehe Abschnitt 3.2) oder die Erprobung eines Aerosol-Sprühschiffes (siehe Abschnitt 3.4). Die Wirksamkeit eines Gesamtsystems zur Klimabeeinflussung kann in Modellsimulationen untersucht werden, eine experimentelle Verifikation seiner Wirksamkeit kann aber vermutlich nur durch großskalige oder globale Experimente nachgewiesen werden (Robock et al. 2010). Eine wesentliche Herausforderung besteht darin, die beobachtete Veränderung der Temperatur (oder anderer Parameter wie etwa Niederschlagsmengen) der Anwendung einer RM-Technologie tatsächlich kausal zuzurechnen. Die bisherige Klimaforschung zeigt aber deutlich, dass Veränderungen der Temperatur (oder anderer Klimaparameter) nur durch Beobachtung über lange Zeiträume aus den natürlichen Schwankungen der Messgrößen des Erdsystems herauszufiltern sind. Um davon eine RM-Wirkung in der Größenordnung von wenigen W/m² zu unterscheiden, müsste mit den gegenwärtigen Systemen ca. 10–15 Jahre gemessen werden (Loeb et al. 2007); und selbst dann könnten Effekte (etwa auf die globale Temperatur) nur mit statistischen Methoden identifiziert werden.

Während modellgestützten Abschätzungen der anthropogenen Aerosoleffekte auf die Strahlungsbilanz von 1750 bis heute einen sehr hohen Unsicherheitsbereich aufweisen, wären für RM-Technologien dagegen die Menge und die Eigenschaften der ausgebrachten Partikel bzw. Reflektoren relativ genau bekannt (dies gilt aber vermutlich nicht für die Albedo-Änderung durch Wolkenimpfen, siehe Abschnitt 3.4). Die erwartete Genauigkeit von Modellrechnungen zur Wirkung genau spezifizierter RM-Technologien ist daher besser als dieser Vergleichswert aus den anthropogenen Aerosoleffekten. Dennoch können auch numerische Simulationen keine exakten Berechnungen der Wirkung von RM-Technologien bieten, da Modelle nicht alle relevanten (Aerosol-, Wolken- und Strahlungs-)Prozesse auflösen können und die parametrische Darstellung dieser Zusammenhänge mit Unsicherheiten verbunden ist.

Selbst bei globalen Feldtests ist eine genaue und zeitnahe Erkennung, Quantifizierung und Interpretation eines Klimasignals schwierig und zeitraubend (Robock et al. 2010). Zudem müssten auch die Nebeneffekten untersucht und von natürlichen Schwankungen unterschieden werden, denn das Ausmaß von Nebenwirkungen einer RM-Maßnahme wäre – nach dem Nachweis der Wirksamkeit – ein wichtiges Kriterium für den Einsatz (oder Nichteinsatz) einer bestimmten RM-Maßnahme. Ein umfassender Feldtest wäre daher kaum von einem langsam anlaufenden Einsatz von RM, kombiniert mit einem umfassenden Überwachungsprogramm und einer Ausstiegsoption, zu unterscheiden. Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Ergebnisse von Feldtests bestünde darin, ein RM-Signal regelmäßig zu wiederholen umso in verschiedenen Variablen eine Variabilität zu erzeugen, die sich auch bei einem insgesamt geringem absolutem Signal besser aus der Zeitreihe natürlicher Variabilität herauslesen lassen würde. Die Erforschung zu Messbarkeit von RM-Tests bzw. dem optimalen Testdesign ist aber eine der wesentlichen Herausforderungen, die aber bislang von der Forschung noch nicht aufgegriffen wurde.

3 Technische und betriebswirtschaftliche Bewertungen von RM-Technologien

Gernot Klepper, Ulrich Platt, Wilfried Rickels

Wie bereits im vorherigen Abschnitt dargestellt, lassen sich die derzeit diskutierten Technologien danach unterscheiden, an welcher Stelle sie die Strahlungsbilanz beeinflussen. Die Beeinflussung der Strahlungsbilanz kann, wie in Tabelle 1 im vorherigen Abschnitt dargestellt, durch eine Reihe von Technologien erzielt werden. Diese lassen sich einteilen nach (i) der Höhe der Reflektor-Schicht über der Erdoberfläche, wobei gilt, dass die prinzipielle Wirksamkeit bei größeren Höhen steigt, und (ii) der Art des Reflektors, wobei der Materialaufwand, die Lebensdauer (Abklingzeit der Maßnahme) und die Hebelwirkung wesentliche Kriterien darstellen. Der Begriff Hebelwirkung bezieht sich dabei auf das Verhältnis zwischen eingesetzter Materialmenge und Reduzierung des Strahlungsantriebes. Die Reduktion des Strahlungsantriebes kann dabei z.B. auch (näherungsweise) als äquivalente CO₂-Reduktion ausgedrückt werden, also die Reduktion in der Masse des atmosphärischen CO₂, die dieselbe Reduktion des Strahlungsantriebes bewirken würde wie die betrachtete RM-Technologien. CDR-Technologien wie Alkalinitätszufuhr in den Ozean oder Air Capture haben eine Hebelwirkung von etwa 1 oder weniger. Ozeandüngung und die hier diskutierten RM-Maßnahme kämen auf Hebelwirkungen im Bereich von einigen Tausend bis Millionen.

In Tabelle 2 wird einen Überblick über die verschiedenen Technologien im Hinblick auf Hebelwirkung und Abklingzeit gegeben. In der Spalte Abklingzeit wird der Zeitraum angegeben, innerhalb des-

sen die Wirkung einer RM-Technologie nach ihrer Beendigung abklingt (im Sinne einer Halbwertszeit). Im Folgenden werden die einzelnen Technologien vorgestellt und ihre Eigenschaften diskutiert.

Tabelle 2:

Überblick über die verschiedenen symptomatischen RM-Technologien

Art der Maßnahme	Realisierung	Hebelwirkung	Erhofftes Potential	Abklingzeit
Reduktion der kurzwelligen Einstrahlung (SRM)	Reflektoren im Weltall	Gering-Mittel	Unbegrenzt	Jahrzehnte bis Jahrtausende
	Aerosole in der Stratosphäre	Groß	Unbegrenzt	ca. 1 Jahr
Erhöhung der langwelligen Ausstrahlung (TRM)	Modifikation von Zirruswolken	Groß	-1 bis -4 W/m ²	Tage bis Wochen
Reduktion der kurzwelligen Einstrahlung (SRM)	Modifikation mariner Schichtwolken	Groß	-4 W/m ²	Tage
	Modifikation der Erdoberflächenalbedo	Gering	-0,2 bis -3 W/m ²	Jahre

Quelle: Rickels et al. (2011: 42).

3.1 Reflektoren im Weltall

Grundidee der Reflektoren im Weltall ist die Ausbringung von reflektierendem Material auf geeigneten, stabilen Inertialbahnen zwischen Sonne und Erde. Dadurch wird ein kleiner Bruchteil der kurzwelligen Sonneneinstrahlung in den Weltraum reflektiert und somit von der Erde fernhalten. Das prinzipielle Potential der Methode ist nicht beschränkt, allerdings ist der Materialeinsatz erheblich, da ein gewisser Prozentsatz der Erd-Querschnittsfläche $A_q = \pi R^2$ ($R = \text{Erdradius}$) abgedeckt werden muss (z.B. 1 % oder etwa 1,28 Mill. km² für 3,4 W/m² Reduktion der Einstrahlung). Würde man z.B. eine nur 1/100 Millimeter dicke Folie im Weltraum ausbreiten so wäre ihre Masse für die Überdeckung von 1 % von A_q bereits etwa 13 Mill. Tonnen. Die erforderliche Materialmenge wird noch wesentlich erhöht, da das Material nach heutigem (und absehbarem) Stand der Technik mit Raketen in den Weltraum gebracht werden muss, deren Startmasse ca. 2–3 Größenordnungen über der Nutzlast liegt. Allerdings wäre prinzipiell auch die Nutzung von bereits im Weltall befindlichem Material, etwa von Asteroiden, möglich (Mautner 1991; Pearson et al. 2006).

Aufgrund der Himmelsmechanik kann das reflektierende Material in erdnahe Umlaufbahnen (Mautner 1991; Pearson et al. 2006) oder am inneren Lagrangeunkt L1 (Punkt zwischen Erde und Sonne an dem sich die Anziehungskräfte beider Himmelskörper aufheben) angeordnet werden (Early 1989; Angel 2006). Bei Reflektoren in den erdnahen Umlaufbahnen ist die relativ geringe Ausnutzung nachteilig, da der Teil des Schirmes, der sich auf der Nachtseite der Erde befindet, nicht zur Reflexion beiträgt. Insgesamt würde im Vergleich zur obigen Abschätzung etwa die dreifache Materialmenge benötigt. Zudem ist eine optimale Abschattung der Erde schwierig zu erreichen. Grundsätzlich kann eine ungleichmäßige Abschattung (z.B. nur bei niedrigen Breiten) zu Änderungen des globalen Wärmetransports und damit von Atmosphären- und Meeresströmungen führen. Die ideale Abschattung wäre vermutlich in der Tat nicht gleichmäßig sondern entspräche etwa der räumlichen

Verteilung des zusätzlichen Strahlungsantriebes durch den anthropogenen Treibhauseffekt. Seriöse Abschätzungen über eine optimale Abschattung würden Modellrechnungen erfordern, die nach Kenntnis der Autoren noch nicht vorliegen.

Des Weiteren tragen die Reflektoren zur Population des erdnahen Weltraumes bei (Pearson et al. 2006). Erdnahe Reflektoren können (im Gegensatz zu weit entfernten Reflektoren, etwa bei L1) auch die thermische Ausstrahlung der Erde behindern (vgl. Abschnitt 2.1). Dies müsste dann durch geeignete Maßnahmen vermieden werden, etwa dadurch, dass die Reflektoren für langwellige Strahlung durchsichtig sind. Ein Vorteil dieses Ansatzes wäre hingegen die relativ leichte Erreichbarkeit der Erdumlaufbahn. Hinsichtlich der regionalen Auswirkungen auf das Klima finden Modelluntersuchungen mit einem gekoppelten allgemeinen Zirkulationsmodell (GCM) zwar eine signifikante Abkühlung in den Tropen jedoch eine Erwärmung mit Meereisabnahme in hohen Breiten. Zudem wird eine Abschwächung des Wasserkreislaufes, der durch El-Niño-Ereignisse geprägten Variabilität im tropischen Pazifik und der atlantischen Tiefenwasserbildung (Lunt et al. 2008) prognostiziert.

Bei der Ausbringung von Reflektoren am inneren Lagrangeunkt (Early 1989), in einer Entfernung von 1,6 Mill. Kilometer von der Erde, wäre eine gezielte Abschattung der Erde prinzipiell erzielbar (Angel 2006). Ein europäisches Patent hierzu wurde 2008 angemeldet (Wakefield 2008).

Allerdings muss dafür die gesamte reflektierende Fläche des Spiegels oder der Wolke etwa doppelt so groß sein wie die Erd-Querschnittsfläche, da die Erde von L1 aus gesehen um den Schwerpunkt des Erde-Mond Systems rotiert, der etwa auf der Erdoberfläche liegt. Nachteilig ist außerdem, dass der L1-Punkt als Sattelpunkt prinzipiell instabil ist, so dass die Position der Reflektoren kontinuierlich korrigiert werden müsste. Trotzdem werden für die Lebensdauer einer solchen Wolke von Reflektoren von Angel (2006) 50 Jahre für möglich gehalten. Allerdings ist der L1-Punkt von der Erde aus schwieriger zu erreichen (etwa doppelter Energieaufwand gegenüber erdnahe Umlaufbahn). Simulationen mit einem einfachen Klimamodell ergaben, dass die räumlichen und zeitlichen Klimaänderungen durch den anthropogene CO₂-Ausstoß tatsächlich deutlich verringert werden könnten (Govindasamy und Caldeira 2000; Govindasamy et al. 2002).

Im Bericht der Royal Society (2009) wird geschätzt, dass eine Reduktion der Strahlungsbilanz um 1 W/m² zu jährlichen Kosten von 5 Mrd. US-Dollar (US\$) realisierbar wäre, bzw. 17 Mrd. US\$ für die Veränderung um 3,7 W/m². Dieser Berechnung unterliegt der Annahme, dass für 3,7 W/m² eine Materialmenge von 100 000 Tonnen notwendig ist, die Ausbringungskosten bei 5 000 US\$/kg liegen und dass das Material alle 30 Jahre ersetzt werden muss. Diese Schätzungen erscheinen aber nach obigen Überlegungen und Einschränkungen als sehr optimistisch. Mautner (1991) schätzt, dass eine Ausbringungsmenge zwischen 1 und 100 Mill. Tonnen notwendig wäre; Angel (2006) schätzt eine notwendige Ausbringungsmenge von 20 Mill. Tonnen. Die derzeitigen Ausbringungskosten mit Raketen liegen in etwa zwischen 16 000 und 20 000 US\$/kg und könnten mittelfristig auf 8 000 bis 10 000 US\$/kg sinken. Aber bei einer Ausbringungsmenge von 20 Mill. Tonnen und einem Ausbringungspreis von 10 000 US\$/kg würden die reinen Transportkosten insgesamt 200 Billionen US\$ betragen. Nimmt man erneut eine Lebensdauer von 30 Jahren an, würden die Transportkosten 1,7 Billionen US\$ pro 1 W/m² betragen. In diesen Kostenschätzungen sind aber weder Material noch Personal und Managementkosten enthalten. Zusätzlich sind enorme Kosten für Forschung und Entwicklung sowie Kapitalkosten zu berücksichtigen.

Die Überlegungen zu den Reflektoren im Weltall erscheinen bisher weitgehend auf abstrakten Überlegungen zu basieren. Sowohl die Frage der technischen Umsetzbarkeit als auch die nach den Kosten solcher Maßnahmen sind weitgehend unbeantwortet. Alle Anzeichen deuten darauf hin, dass diese Idee realistischer Weise nicht umsetzbar ist. Die öffentliche Aufmerksamkeit für diese Ideen lassen sich mehr in ihrer Attraktivität als *Science Fiction* als in ihrer wissenschaftlichen Belastbarkeit finden.

3.2 Ausbringen von Aerosolen in der Stratosphäre

Reflektierende sub-Mikrometer Aerosole sind prinzipiell eine attraktive Methode zur Reduktion der kurzwelligen solaren Einstrahlung, da ein geringer Materialeinsatz eine große Reduktion der SW-Einstrahlung bewirken kann (Budyko 1982). Hinzu kommt die (hauptsächlich wegen fehlender Niederschläge) lange Lebensdauer (1–2 Jahre) des stratosphärischen Aerosols gegenüber < 1 Woche in der Troposphäre.⁷ Beobachtungen großer Vulkanausbrüche zeigen, dass durch Schwefeleintrag in die Stratosphäre in der Größenordnung von 1 Megatonne (Mt) Schwefel (als SO₂) eine globale Abkühlung in der Größenordnung von 1° C auftritt (Lacis und Mishchenko 1995). SO₂ wird in der Stratosphäre in Sulfataerosole umgewandelt. Somit legen diese „natürlichen Experimente“ die Wirksamkeit dieser CE-Technologie nahe.

Diese bereits relativ lange diskutierte CE-Technologie (Budyko 1982; Dickinson 1996; Teller et al. 1997; Keith 2000) wurde insbesondere durch die Arbeit von Paul Crutzen (2006) populär (Wigley 2006; Rasch et al. 2008a). Das Potential der Methode ist beträchtlich (viele W/m²) und somit prinzipiell ausreichend, um eine Vervielfachung der vorindustriellen CO₂-Konzentration auszugleichen. Allerdings zeigen Heckendorn et al. (2009) und Pierce et al. (2010), dass die Wirksamkeit nicht proportional mit der ausgebrachten Schwefelmenge zunimmt. Erste Angaben zur erforderlichen Schwefelmenge wurden bereits nach oben (Katz 2010) und die erwartete stratosphärische Aufenthaltsdauer der Aerosole nach unten korrigiert (Tuck et al. 2008). Pierce et al. (2010) schlagen vor, diese Schwierigkeiten sowie eine unerwünschte Erwärmung der unteren Stratosphäre⁸ durch eine direkte Ausbringung von Schwefelsäureaerosol anstelle von Schwefelwasserstoff (H₂S) bzw. Schwefeldioxid (SO₂) und einer Ausweitung des Ausbringungsgebiets zu vermeiden. Trotz der großen Hebelwirkung dieser Maßnahmen sind die technischen Herausforderungen, derartige Materialmengen in 20–25 km Höhe zu bringen, erheblich. Eine Reihe weiterer Modellrechnungen belegten die Effektivität des Verfahrens und diskutierten die möglichen Nebeneffekte (Govindasamy et al. 2003; Rasch et al. 2008b; Murphy 2009; Lenton und Vaughan 2009; Heckendorn et al. 2009; Jones et al. 2010).

Es existieren viele Vorschläge zur technologischen Umsetzung des stratosphärischen Aerosol-Schildes. In der Studie des Committee on Science Engineering and Public Policy (CSEPP) (1992) wurden zur Ausbringung des Schwefels der Einsatz von Flugzeugen/Luftschiffen, Raketen, Kanonen und langen Schläuchen/Rohrleitungen diskutiert. Allerdings konzentrieren sich derzeitige Überlegungen vor allem auf die Ausbringung mit Flugzeugen, da dies mit bereits existierenden Flugzeugen realisierbar wäre. Ein neueres Patent behandelt ein Verfahren, in dem Treibstoffzusätze in Verkehrsflugzeugen zum Ausbringen reflektierender Substanzen genutzt werden sollen (Hucko 2009). Die Firma *Intellectual Ventures* fördert die Entwicklung eines *Stratoshield* genannten Verfahrens, bei dem die Aerosolerzeugung in der Stratosphäre über einen von einem Ballon getragenen Schlauch vom Erdboden aus bewirkt werden soll. Mittels photophoretischer⁹ Kräfte will Keith (2010) spezielle Partikel bis über die Stratosphäre hinaus anheben um deren Lebensdauer zu erhöhen und Auswirkungen auf die Ozonchemie zu verringern.

⁷ Die Schwefelpartikel werden durch die Brewer-Dobson Zirkulation der Stratosphäre polwärts transportiert und durch Absinken in die Troposphäre verbracht und dort überwiegend durch Niederschläge entfernt.

⁸ Partikel in der unteren Stratosphäre absorbieren einen kleinen Teil der langwelligen Ausstrahlung der Erde und können damit die untere Stratosphäre erwärmen. Der Effekt wächst mit der Größe der Partikel.

⁹ Als photophoretische Kräfte werden Kräfte bezeichnet, die von Licht auf Partikel ausgeübt werden, die von einem Gas umgeben sind. Hierzu ist es nötig, dass die Partikel asymmetrisch bezüglich der lichtzugewandten und der lichtabgewandten Seite aufgebaut sind. Die beiden Seiten müssen entweder das Licht unterschiedlich stark absorbieren um einen Temperaturunterschied zwischen beiden Seiten zu erzeugen, oder, bei gleichmäßiger Erwärmung des Partikels, muss der Wärmeübergang zwischen Partikel und Gas auf beiden Seiten unterschiedlich effizient verlaufen. Auf der warmen Seite, bzw. der Seite mit dem effizienteren Wärmeübergang erhöht sich dann der Luftdruck, der durch den Stoß der Gasmoleküle mit der Oberfläche bewirkt wird und es tritt eine Nettokraft in Richtung der kalten Seite bzw. des schlechteren Wärmeübergangs auf (Leisner 2012).

Neben den Studien von CSEPP (1992) und Robock et al. (2009), ist insbesondere die aktuelle Studie von McClellan et al. (2010) hervorzuheben. Die Studie untersucht die Ausbringungskosten von 1,3 und 5 Mt in die Stratosphäre mit einem Schwerpunkt auf dem Einsatz bestehender und neu zu entwickelnder Flugzeuge, berücksichtigt aber auch Luftschiffe und zeigt zum Vergleich die Kosten für die Ausbringung mit Raketen, Kanonen und langen Schläuchen/Rohrleitungen. Für die Ausbringung mit Flugsystemen wird angenommen, dass das Material mit einer Rate von 0,036 kg pro Meter geflogene Flugdistanz freigesetzt wird. Es werden Ausbringungshöhen von 13 bis 30 km untersucht. Wie in der Studie von Pierce et al. (2010) wird eine Ausbringung in Nord-Süd Richtung zwischen 30° N und 30° S angenommen. Die Ost-West Ausbringung wird durch die globalen Windsysteme unterstützt, so dass lokal begrenzte Ausbringung an verschiedenen Basisstationen in dem entsprechenden Nord-Süd Gürtel ausreichend ist. Durch die Begrenzung der Flugsystemflotte auf einzelne Basisstationen sind die Treibstoffkosten geringer als bei einer Transitausbringung, bei der unterschiedliche Basisstationen nacheinander angefliegen werden. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die Ausbringungshöhe, die Investitionsaufwendungen und jährlichen Betriebskosten für die Ausbringung von 1 Megatonne in der Stratosphäre mit bestehenden Flugzeugen, neu entwickelten Flugzeugen und neu entwickelten Luftschiffen.¹⁰ Bei einem Einsatz von Luftschiffen ist zu berücksichtigen, dass noch erhebliche technische Fortschritte nötig sind, da die maximale Ausbringungshöhe von derzeit verfügbaren Luftschiffen bei rund 6 km liegt (McClellan et al. 2010).

Tabelle 3:

Kostenschätzungen unterschiedlicher Methoden der Aerosolausbringung

Ausbringung	Ausbringungshöhe in km	Investitionsaufwendungen in Mrd. US\$	Jährliche Betriebskosten in Mrd. US\$
Existierende Flugzeuge	18–26	3,2–7,2	2,9–8,8
Neue Flugzeugtypen	18–31	2,0–13,8	0,6–3,2
Neue Luftschiffe	18–31	3,3–8,6	0,8–2,3

Quelle: McClellan et al. (2010); Klepper und Rickels (2011).

Im Hinblick auf die technische Machbarkeit erfordert der Einsatz von Flugzeugen oder Luftschiffen entsprechende Basisstationen, die eine effiziente Aufladung und effizientes Handling erlauben. McClellan et al. (2010) argumentieren, dass die täglich notwendigen Flugzeugstarts von 60 bis zu 600 (abhängig von der Nutzlast der Flugzeuge) aber keine Schwierigkeit darstellen, da moderne Flughäfen zwischen 180 und 240 Starts pro Stunde realisieren. Trotzdem steigen die Kosten bei Einsatz dieser Maßnahme für eine Modifikation der Strahlungsbilanz um 4 W/m^2 deutlich, da dann die jährliche Ausbringungsmenge zwischen 22,5 und 30,6 Mt betragen würde. Die Kostenschätzung umfasst aber derzeit noch keine Kosten für die Basisstationen und die Materialanlieferung, sondern nimmt an, dass die entsprechende Nutzlast fertig aufbereitet an der Basisstation verfügbar ist. McClellan et al. (2010) nennen als Größenordnung pro Basisstationen ein Investitionsvolumen von ca. 1 Mrd. US\$. Diese Einschätzung leitet sich von dem zentralen Verlade Flughafen der DHL in Hongkong ab.

Die Kosten beim Einsatz von Raketen oder Kanonen übersteigen deutlich die Kosten eines Einsatzes von Flugsystemen. Bei Einsatz von Raketen ergeben sich erhebliche Kosten durch die notwendige Anzahl von Raketenstarts. McClellan et al. (2010) schätzen, dass auch bei der Ausbringung mit Kanonen die jährlichen Kosten deutlich über den Kosten von Flugsystem liegen würden. Der Einsatz von Kanonen erlaubt aber eine Ausbringung in relativ große Höhen und ist damit vielleicht eine Option für die experimentelle Erprobung. Allerdings würde die erforderliche Erhebung

¹⁰ Für die Berechnung der Finanzierungs- und Abschreibungskosten werden ein Zinssatz von 10 % und eine Nutzungsdauer von 20 Jahren unterstellt.

von Messdaten ohnehin den Einsatz von Flugzeugen erfordern. Der Einsatz von Schläuchen bzw. Rohrleitungen, die durch Auftriebssysteme getragen werden, würde theoretisch zwar vergleichsweise geringe jährliche Betriebskosten verursachen, allerdings besteht hier noch erheblicher Forschungsbedarf bezüglich der technischen Umsetzung. Das britische *Engineering and Physical Sciences Research Council* (EPSRC) plant die Untersuchung dieser Ausbringungsmöglichkeit anhand eines Feldtests, bei dem in einer Höhe von 1 km Wassertropfen über einen Schlauch ausgebracht werden sollen. Bei diesem Test geht es allerdings um die ingenieurstechnische Untersuchung der auftretenden Lasten und nicht um eine Untersuchung von Aerosolausbringungen. Allerdings wird bei der Verwendung der Feldtestergebnisse für die Kostenabschätzungen zu berücksichtigen sein, dass zusätzlich Reservetürme/-schläuche notwendig sind, wenn eine kontinuierliche Einbringung gewährleistet sein soll, und darüber hinaus die auftretenden Druck- und Zuglasten bei einer Höhe von 1 km nicht ohne weiteres auf eine Ausbringungshöhe von ca. 18 km übertragen werden können, so dass bei einem Einsatz in solchen Höhen wohl mit deutlich höheren Materialkosten zu rechnen ist.

In der Literatur werden vielfältige Nebenwirkungen der stratosphärischen Aerosolinjektion diskutiert. So wurden mögliche negative Effekte auf den globalen Wasserkreislauf aus dem Vergleich der vorgeschlagenen Stratosphärenmanipulation mit dem größten Vulkanausbruch des 20. Jahrhunderts, jenem des Pinatubos, abgeleitet (Hegerl und Solomon 2009). In Modellrechnungen von Ricke et al. (2010) war es darüber hinaus nicht möglich, eine Abkühlung bei stabilen Niederschlagsverhältnissen zu erreichen. Allerdings argumentieren Irvine et al. (2010) auf Basis ihrer GCM-Simulationen etwas optimistischer, was die Möglichkeiten betrifft, bei einer Verringerung der solaren Einstrahlung verschiedene gegenläufige regionale Nebeneffekte zu beherrschen.

Neben den grundsätzlichen Nebenwirkungen von RM-Maßnahmen auf den globalen Wasserkreislauf drohen bei der Aerosolausbringung Nebenwirkungen durch die potentielle katalytische Beschleunigung des Ozonabbaus durch stratosphärische Partikel (Heckendorn et al. 2009). Die durch die Schwefelausbringung in der Stratosphäre hervorgerufene erhöhte Azidität des Niederschlags wäre allerdings nach Modelstudien von Kravitz et al. (2009, 2010) als vernachlässigbar einzustufen.¹¹ 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 diffusen Sonnenstrahlung genannt, die sich positiv auf die Pflanzenproduktivität auswirkt (Roderick et al. 2001; Mercado et al. 2009).

Insgesamt sind die derzeit diskutierten Ideen im Hinblick auf die möglichen Nebeneffekte noch spekulativ. Besonders die Unsicherheit über die Auswirkungen auf den Wasserkreislauf würde diese Technologie zu einer riskanten Alternative machen, wenn die Befürchtungen sich bestätigten, dass der Niederschlag insgesamt abnimmt. Insbesondere in den Gebieten, die schon jetzt unter Wassermangel leiden, würde dies eine weitere Gefährdung der Nahrungsmittelsicherheit darstellen. Nichtsdestotrotz kann diese Technologie als eine der am weitesten entwickelten Technologien des RM angesehen werden. Der grundsätzliche Wirkungsmechanismus ist durch die Beobachtung von Vulkaneruptionen bestätigt. Außerdem sind für diese RM-Technologie die meisten Publikationen seit dem Royal Society

¹¹ Die jetzigen Schwefelemissionen in die Troposphäre liegen in der Größenordnung von 100–200 Mt Schwefel in der Form von SO₂/Jahr, überwiegend aus anthropogenen Quellen (Vulkane tragen nur in der Größenordnung von 10 Mt/Jahr bei) und 50–100 Mt Schwefel in der Form von Dimethylsulfid (DMS, CH₃SCH₃) aus biologischen Quellen im Ozean. Die relativ wenigen Mt SO₂ für RM würden in der Gesamtmenge kaum ins Gewicht fallen. Allerdings würden sie überwiegend in der Form von H₂SO₄-Aerosol in hohen Breiten in die Troposphäre eintreten während SO₂ im globalen Mittel nur zu ca. 1/3 in Sulfataerosol umgewandelt wird. Die Auswirkung anderer Partikelmaterialien müssen je nach Material unabhängig davon abgeschätzt werden. Bei Aluminiumoxid wäre der Einfluss auf die Umwelt vermutlich gering, da Aluminiumoxid ein häufiger Bestandteil der Erdkruste ist und durch natürliche Prozesse jährlich Milliarden Tonnen aluminiumoxidhaltiges Aerosol erzeugt wird. Wiederum wäre zu sagen, dass dieses natürliche Aerosol hauptsächlich über den Kontinenten und in der unteren Troposphäre vorkommt, während CE-Aerosol in die obere Troposphäre hoher Breiten eingetragen würde. Bei anderen Aerosolmaterialien, insbesondere solchen, die nicht natürlich vorkommen, wären sicher umfangreiche Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit nötig.

Report erschienen, was für sich genommen als Indikator gewertet werden kann, dass es sich bei dieser Technologie möglicherweise um die RM-Technologie mit den größten Erfolgsaussichten handelt. Wie oben dargestellt, haben diese Publikationen aber auch gezeigt, dass die notwendige Ausbringungsmenge nach oben korrigiert werden müsste. Entsprechend kann man festhalten, dass bei der Bewertung dieser Technologie bereits nicht mehr nur auf Arbeiten zurückgegriffen werden muss, die möglicherweise von den Proponenten stammen, sondern auch bereits von Kritikern dieser Technologie.

3.3 Modifikation von Zirruswolken

Hochliegende Eiswolken (Zirruswolken) behindern breitbandig den langwelligen wie kurzwelligen Strahlungsfluss. Welcher Effekt dominiert hängt von der geographischen Breite der Wolke ebenso ab wie von ihrer Höhe, von der Teilchengröße und sogar der Kristallform. Einen Überblick über diese Effekte geben Zhang et al. (1999). In der Regel überwiegt der Effekt auf den langwelligen Strahlungsfluss; Zirruswolken wirken also überwiegend erwärmend (Lee et al. 2009). Werden diese Wolken künstlich aufgelöst oder verändert, so wird sich in der Regel ein kühlender Effekt ergeben. Nach einem Vorschlag von Mitchell et al. (2009) könnte diese durch ein Einsäen von effizienten Eiskeimen bei der Wolkenbildung geschehen. Dies hätte den Effekt, dass in den Zirruswolken weniger, dafür aber größere Eispartikel entstehen, die schneller herabfallen. Damit wird die Lebensdauer der Wolke und der Gesamtbedeckungsgrad reduziert. Darüber hinaus ändern sich die optischen Eigenschaften der Zirruswolken. Mitchell und Finnegan (2009) schätzen, dass durch diese Maßnahme ein treibhausgasbedingter Strahlungsantrieb in der Größenordnung, wie er durch eine Verdopplung der atmosphärischen CO_2 -Konzentration ausgelöst wird ($3,7 \text{ W/m}^2$) kompensiert werden kann. Im Gegensatz dazu hält Leisner (2011) selbst bei globaler Anwendung nur eine Veränderung der Strahlungsbilanz um $1\text{--}2 \text{ W/m}^2$ für möglich.

Ein Vorzug dieses Vorschlags ist der äußerst geringe Materialaufwand, der bei Einsatz dieser Maßnahme zu erbringen wäre. Eiskeime werden nur in sehr geringer Menge benötigt und könnten beispielsweise durch Verkehrsflugzeuge an geeigneten Orten ausgebracht werden. Die benötigten Materialmengen liegen dabei bloß im Bereich von einigen Kilogramm pro Flug. Für die Umsetzung der Maßnahme schlagen Mitchell und Finnegan (2009) die Ausbringung von Bismut(III)-iodid (BiI_3) vor, da es bei Temperaturen unter -20°C besonders effektiv als Eiskern wirkt, aber bei höheren Temperaturen relativ ineffektiv ist, so dass die Bildung tieferer Wolken kaum beeinflusst würde. Das Material soll mit kommerziellen Flugzeugen ausgebracht werden, indem es dem Treibstoff beigemischt oder in den Abgasstrom injiziert wird. Dabei sollen nicht gezielt bestimmte Wolkengebiete modifiziert werden, sondern die allgemeine Konzentration dieses Aerosolmaterials erhöht werden, so dass bei der Zirruswolkenbildung genügend Eiskerne vorhanden sind, die die Bildung größerer Eiskristalle erlauben (Mitchell und Finnegan 2009). Die regelmäßige Ausbringung ist auch wegen der relativ kurzen Verweildauer der Partikel in der Troposphäre erforderlich. Die Autoren schlagen vor, dass die Maßnahme auf die Polargebiete begrenzt wird, da dort die treibhausgasbedingte Absorption langwelliger thermischer Abstrahlung am stärksten wirkt. Das vorgeschlagene Ausbringungsmaterial Bismut(III)-iodid ist nicht toxisch. Außerdem ist die Konzentration des Ausbringungsmaterials in Niederschlägen relativ gering. Bei vergleichbaren Maßnahmen zur Wolkenmodifikation, bei dem Silberiodid ausgebracht wurde, waren die gemessenen Konzentrationen im Niederschlag so gering, dass kein Risiko einer möglichen Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit bestand (Warburton et al. 1995; Mitchell und Finnegan 2009).

Informationen über die optimale Konzentration der Partikel und die damit verbundenen Ausbringungsmengen sind noch sehr unsicher (Mitchell und Finnegan 2009). Im Hinblick auf Ausbringungsmodalitäten und damit verbundene Kosten existieren derzeit keine Publikationen oder

Arbeitspapiere. In einer persönlichen Kommunikation schätzt David Mitchell, dass eine hinreichende Konzentration eine jährliche Ausbringungsmenge von weniger als 500 Tonnen BiI3 ausreichend ist, um eine Veränderung der Strahlungsbilanz um -3 W/m^2 zu erlauben. Wie bereits oben erwähnt wird dieses Potential aber von Leisner (2011) angezweifelt. Die Kosten für das Ausbringungsmaterial werden dabei auf ca. 19,3 Mill. US\$ pro Jahr geschätzt (Mitchell 2011). Kosteninformationen bezüglich notwendiger Modifikationen an den herkömmlichen Flugzeugen liegen nicht vor. Für eine optimale Wirkung wäre aber eine homogene Verteilung der Eiskerne notwendig, die sich wahrscheinlich nicht durch die Ausbringung durch kommerzielle Flüge gewährleisten lässt (Leisner 2011). Betrachtet man aber im Vergleich dazu die notwendigen Ausbringungsmengen bei der Schwefeleinbringung in die Stratosphäre, erscheint ein relativ kostengünstiger Einsatz mit speziellen Ausbringungsflugzeugen möglich.

Wie bereits in Abschnitt 2.5 diskutiert, ist bei dieser Technologie eine starke Modifikation sowohl der SW- als auch der LW- Strahlungsbilanz zu erwarten. Die Differenz dieser beiden großen Einflüsse bildet die globale Klimawirksamkeit der Maßnahme. Aufgrund der unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Verteilung der SW- und LW- Strahlung, haben diese starken Strahlungseinflüsse jeweils für sich genommen jedoch das Potential, große Veränderungen des regionalen Klimas und des Wasserkreislaufs hervorzurufen. Damit erscheint die vorgeschlagene Methode die Gefahr von besonders großen meteorologischen Nebenwirkungen zu bergen.

Interessant ist, dass diese RM-Technologie bislang relativ wenig diskutiert wurde. So wird sie weder im Bericht der Royal Society (2009) noch im aktuellen Report des Bipartisan Policy Zentrums (Long et al. 2011) diskutiert. Diese Technologie wurde bislang nur in der Sondierungsstudie des Bundesministeriums für Bildung und Forschung bzw. der zugrundeliegenden naturwissenschaftlichen Einzelstudie aufgegriffen (Rickels et al. 2011; Heintzenberg 2011). Dieser Methode wird zwar ein geringeres Potential zugerechnet als es der Fall für die Modifikation mariner Schichtwolken der Fall ist (Leisner 2011). Trotzdem erscheint es verwunderlich, dass diese Technologie kaum diskutiert wird. Vor allem wenn man berücksichtigt, dass in den oben genannten Berichten sowohl die Möglichkeit von Reflektoren im Weltall oder die Ausbringung reflektierender Materialien in Wüsten diskutiert wird, obwohl beide Maßnahmen entweder aus ökonomischer oder technischer Sichtweise ebenfalls keine attraktiven RM-Technologien darstellen.

Jedenfalls schwanken sowohl die Einschätzungen zum Potential als auch den meteorologischen Nebenwirkungen (Mitchell und Finnegan 2009; Leisner 2011). Die aber auf jeden Fall regional unterschiedlich ausfallenden Nebenwirkungen mit potentiell negativen Umwelt- und Einkommenseffekten müssten wie bei den anderen RM-Technologien gegenüber dem Erfolg einer Absenkung der durchschnittlichen Temperatur abgewogen werden. Bei starken regionalen Abweichungen können die politischen Probleme bezüglich einer international abgestimmten Umsetzung dieser Technologie somit dazu führen, dass sie obwohl technisch machbar, kaum politisch umsetzbar wäre. Derzeit existiert für diese Technologie aber eine noch nicht ausreichende Anzahl an Publikationen als dass eine tatsächliche Einschätzung der Technologie vorgenommen werden könnte.

3.4 Modifikation mariner Schichtwolken

Innerhalb dieses Technologievorschlags sollen modifizierte Wolken die einfallende kurzwellige Sonneneinstrahlung stärker reflektieren als dass sie langwellige thermische Abstrahlung zurückhalten, aufgehellt und ihre Lebensdauer verlängert werden. Bei dieser Maßnahme ist also die Auswirkung auf die Albedo (A) größer als auf die Absorption langwelliger Wärmeabstrahlung (α); entsprechend ist ein Netto-Abkühlungseffekt möglich. Technisch soll dies durch die Erhöhung der Konzentration von Aerosolteilchen geschehen. Erhöhte Aerosolkonzentrationen haben prinzipiell einen Einfluss auf Wolken, da sich durch mehr Kondensationskeime mehr Wolkentropfen bilden können, deren

durchschnittliche Größe dadurch reduziert wird. Dies führt zu einer Erhöhung der Rückstreuung kurzwelliger Strahlung, d.h. der Albedo (Twomey 1974). Dieser Effekt ist besonders stark, wenn die vorliegende natürliche Konzentration solcher Kondensationskeime sehr gering ist, wie es in einigen Ozeanregionen der Fall ist. Entsprechend ist z.B. unter bestimmten meteorologischen Bedingungen die Erhöhung der Wolkenalbedo durch Rauchemissionen von Schiffen in Satellitenbildern eindeutig zu erkennen (Coakley Jr. et al. 1987).

Zusätzlich wird diskutiert, ob erhöhte Aerosolkonzentrationen die Niederschlagsbildung in Flüssigwasser-Wolken unterdrücken, dadurch deren Lebenszeit verlängern und somit die planetare Albedo zusätzlich erhöhen (Albrecht 1989). Dieser zweite Effekt wird allerdings in neueren Studien in Frage gestellt (Small et al. 2009; Stevens 2009).

In jüngster Zeit wurden die Auswirkungen von Wolkenmodifikationen in zahlreiche Modellstudien untersucht (z.B. Latham et al. 2008; Rasch et al. 2009; Jones et al. 2009; Jones et al. 2010; Korhonen et al. 2010; Bala et al. 2010; Wang et al. 2010; Wang et al. 2011). Ein umfassender Übersichtsartikel (Latham et al. 2011) kommt bezüglich der Wirkung von Aerosolteilchen auf Wolken folgenden Schlussfolgerungen: (i) Die größte Albedo-Erhöhung ist für saubere Hintergrundbedingungen zu erwarten; (ii) unter optimalen (sauberen) Bedingungen könnte die Albedo in Gebieten in denen Seesalzpartikel eingebracht werden um einen Faktor 3 erhöht werden. Unter mäßig bzw. stark verschmutzten Bedingungen reduziert sich der Erhöhungsfaktor auf 1,6 bzw. 1,3; (iii) für mäßig bis stark verschmutzte Bedingungen kann das Einbringen einer relativ geringen zusätzlichen Teilchenkonzentration die Albedo sogar verringern; (iv) das Einbringen von großen Seesalzteilchen kann zur Niederschlagsbildung führen und damit die Wolkenalbedo ebenfalls reduzieren.

Grundsätzlich wären aufgrund der sauberen Hintergrundbedingungen für die Modifikation mariner Schichtwolken die am besten geeigneten Regionen persistente Stratokumuluschichten in den südlichen Gebieten der Ozeane, vor allem vor den Küsten von Peru und Namibia. Nach einem Vorschlag von Latham (1990, 2008) soll der oben diskutierte Aerosoleffekt in marinen Grenzschichtwolken (Stratokumuluswolken) durch die künstliche Einbringung von Seesalzpartikeln hervorgerufen werden. Nach den Abschätzungen von Latham et al. (2008) wäre der negative Strahlungsantrieb in den so beeinflussten Regionen mit bis zu -4 W/m^2 groß genug, um den durch eine Verdopplung der CO_2 -Konzentrationen entstehenden positiven Strahlungsantrieb aufzuheben. Jones et al. (2009) schätzen, dass durch das Impfen in geeigneten Stratokumulus-Regionen, die in seiner Abschätzung 3,3 % der Erdoberfläche ausmachen, ein negativer Strahlungsantrieb von -1 W/m^2 zu erreichen wäre und damit bis zu 35 % des heutigen positiven Strahlungsantriebes durch Treibhausgase kompensiert werden könnte. Rasch et al. (2009) errechnen, dass mit Ausführung dieser Maßnahme ein negativer Strahlungsantrieb von $-2,5 \text{ W/m}^2$ bzw. $-3,9 \text{ W/m}^2$ erreicht werden könnte. Dabei wurde allerdings von sehr hohen erreichten Tropfenkonzentrationen ausgegangen. Außerdem rechnen Rasch et al. (2009) mit Wolkenbeeinflussung auf 20–70 % der Ozeanoberfläche (also ca. 14–50 % der Erdoberfläche). Latham et al. (2008) nehmen hingegen an dass 25 % der Ozeanoberfläche mit geeigneter Bewölkung bedeckt sind. Alle Autoren präsentieren letztlich Beispielrechnungen, keine Abschätzung des maximalen Potentials zulassen. Die Unterschiede erklären sich durch die zugrunde gelegten Flächen mit geeigneter Bewölkung und vermutlich auch durch kleinere Unterschiede in der Modellierung.

Im Bericht der Royal Society (2009) werden als Maßnahmen zur Wolkenimpfung die Ausbringung von Aerosolen durch Flugzeuge oder das Einsprühen von Salzwasser durch Schiffe in die 500 bis 1 000 Meter über dem Meeresspiegel liegenden Wolken genannt. Für die Realisierung der ersten Maßnahme existieren aber keine Studien. Für die zweite Maßnahme stellt nach wie vor die auch im Bericht der Royal Society verwandte Studie von Salter et al. (2008) die einzige den Autoren bekannte Referenz dar. Die Studie schätzt die Kosten für eine Flotte von Schiffen mit Flettner-Antrieb, die ferngesteuert auf dem Meer fahren. Die Flettner Schiffe werden durch Wind angetrieben. Zusätzlich sind die Schiffe mit Unterwasserschrauben ausgestattet, die elektrische Energie erzeugen. Diese Energie wird für das Pumpen, Reinigen und Aussprühen des Seewassers verwendet. Salter et al.

(2008) schätzt die gesamten Investitionsaufwendungen auf unter 2 Mrd. US\$ und jährliche Betriebskosten für die 1 W/m² auf etwa 135 Mill. US\$. Berücksichtigt man, dass kaum Schiffe mit Flettner-Antrieb im Betrieb sind, erscheinen insbesondere die geschätzten F&E Kosten sowie die Rüstkosten als sehr gering. Außerdem sind in der Kostenschätzung keine Posten für die Überwachung der Schiffe bzw. die Logistik der Schiffsrouten enthalten. Ferner fehlen Angaben über Ersatz von ausgefallenen oder vermissten Schiffen. Nimmt man die Schätzungen Salter et al. (2008), so würden die Investitionsaufwendungen für eine Flotte selbst bei einer durchschnittlichen Einsatzquote von 1/3 der Flotte bei nur 5,8 Mrd. US\$ liegen. Aufgrund dieser Argumente erscheint die vorliegende Kostenschätzung als sehr niedrig und die Abschätzung der Kapitalkosten unvollständig. Dabei bleibt zu diskutieren, dass es keinen Grund gibt warum nicht auch konventionelle Schiffe (etwa Fischtrawler) als Plattform für Wolkenimpfung in Frage kämen um die zusätzlichen technologischen Schwierigkeiten und Unabwägbarkeiten des Flettner-Antriebs zu vermeiden.

Ein wesentliches in der Literatur bislang kaum diskutiertes Problem ist auch die Herstellung der erforderlichen sub-Mikrometer Partikeln, dies kann nach Einschätzung der Autoren mit bekannten Technologien nur unter großen Schwierigkeiten und keinesfalls durch einfaches Versprühen von Seewasser (wie von Salter et al. 2008 angenommen) bewerkstelligt werden. Die von Salter et al. (2008) angenommene Tröpfchengröße des versprühten Seewassers von 0,8 µm entspricht einer Größe des trockenen Partikels nach Verdunsten des Wassers von ca. 0,2 µm. Mit bekannten Technologien können nur Tröpfchen mit mehreren Mikrometern Durchmesser erzeugt werden,¹² die dann (i) bedingen dass 100- bis 1 000mal mehr Seewasser versprüht werden müsste, als von Salter et al. (2008) angenommen, andererseits (ii) ist die Lebensdauer dieser Partikel in der Atmosphäre wesentlich kürzer, schließlich (iii) führt die große versprühte Wassermasse dazu, dass sich die Luft um das Sprühschiff stark abkühlt und damit den von Leisner et al. (2010) beschriebenen Effekt des Absinkens der Luft verstärkt. Entsprechend dauert es länger, bis die Kondensationshöhe erreicht wird und entsprechend geht ein Teil der Teilchen durch Koagulation verloren.

Wie schon in Abschnitt 2.5 diskutiert, werden bei diesem Vorschlag als Nebenwirkungen insbesondere Einflüsse auf den hydrologischen Kreislauf erwartet. Diese werden zunächst lokal begrenzt auftreten, durch die mögliche Beeinflussung der globalen atmosphärischen Zirkulation sind jedoch auch Auswirkungen auf entfernte Regionen nicht auszuschließen (Rasch et al. 2009). Die meisten Modelluntersuchungen zur Wirksamkeit dieser Technologie gehen von einer konstanten Erhöhung der Tropfenkonzentration in den Zielregionen aus. Durch aerosol- und wolkendynamische Wechselwirkungen ist die Annahme jedoch nicht realistisch, wie Korhonen et al. (2010) mit einem globalen Aerosolmodell zeigen konnten. Selbst mit fünfmal höheren Partikelkonzentrationen als bisher angenommen, zeigen diese Modellrechnungen einen geringeren Albedo-Effekt als frühere Abschätzungen. Die Verfasser weisen auch auf mögliche luftchemische Umsetzungen an der Oberfläche der zusätzlichen Seesalzaerosole hin, deren Wirkungen noch zu untersuchen wären. In der praktischen Umsetzung der Methode muss sichergestellt werden, dass ein nennenswerter Anteil der Seesalzkeime bis in die zu beeinflussende Wolkenschicht transportiert wird. Dies wird durch die bei der Aerosolerzeugung entstehende Verdunstungskälte erschwert (Leisner und Müller-Kliesner 2010).

Die Modifikation von Schichtwolken hat zwar theoretisch ein großes Potential zur Reduktion des Energieflusses. Zwar kommt es bei dieser Maßnahme zu einer Verringerung der SW-Einstrahlung über den Ozeanoberflächen und damit zu einer unmittelbaren Abkühlung des Oberflächenwassers. Der Verzögerungseffekt im Hinblick auf die mittelbare Abkühlung der Erdoberfläche ist aber nicht so groß, da (1) die Ozean-Oberflächenschicht doch innerhalb weniger Jahre erwärmt wird und (2)

¹² Theoretisch könnte durch die Partikel eine Rückhaltung der LW-Strahlung stattfinden. Praktisch ist das aber keine Problem, denn (1) der Radius der Tröpfchen reduziert sich um etwa einen Faktor 4, da das Wasser verdunstet und nur Salz (mit wenig Wasser) zurück bleibt, zudem (2) würde eine LW-Absorption bei Aerosol in niedriger Höhe wenig bewirken, da die Teilchen (im Gegensatz zu Teilchen in höheren Atmosphärenschichten) ja fast so warm sind wie die Oberfläche und damit die Energie effizient abstrahlen.

zumindest in niedrigen Breiten ein Großteil der Einstrahlung zur Wasserverdunstung führt und damit in Form latenter Wärme abtransportiert wird. Die Forschung zu der technischen Umsetzbarkeit zeigt allerdings, dass noch überhaupt nicht klar ist, ob solche Maßnahmen jemals wirksam eingesetzt werden können. Darüber hinaus müsste noch intensiv erforscht werden, welche nicht intendierten Nebeneffekte bei der Veränderung der Bewölkung über große Flächen der Erde auftreten können.

3.5 Modifikation der Erdoberflächenalbedo

Bei dieser Technologie geht es darum die Landoberflächen durch technische Maßnahmen heller zu machen, damit sich die Albedo der Erdoberfläche insgesamt erhöht und eine größere Menge der eingestrahlten Energie wieder reflektiert wird. Dafür kommt die Veränderung von städtischen Flächen sowie von Grün-, Getreide- und Waldflächen, oder von Wüsten und Ozeanoberflächen in Frage. Technisch könnte das dadurch geschehen, dass helle Materialien in Wüstengebieten ausgebracht werden, dass in Siedlungsgebieten beispielsweise die Dächer weiß gestrichen werden, oder dass die Albedo der natürlichen Vegetation oder der Landwirtschaft durch speziell eingesetzte Pflanzen erhöht wird.

Die Erhöhung der Rückstrahlung von Stadtflächen umfasst vor allem das Aufhellen von Häuserdächern und Straßen. Akbari et al. (2009) schätzen, dass eine Modifikation der Stadtflächen zu einer Veränderung der Strahlungsbilanz führen würde, die ungefähr dem Strahlungsantrieb von 44 Gt Kohlendioxid in der Atmosphäre entspricht (Das entspräche bei einer Hintergrundkonzentration von 450 ppm etwa 0,06 bis 0,07 W/m²). Wollte man mit dieser Maßnahme eine Veränderung der Strahlungsbilanz um 1 W/m² erreichen, würden die Kosten dafür etwa 2 Billionen US\$ pro Jahr betragen (Royal Society 2009); die Kosten für einen großskaligen Einsatz sind also prohibitiv hoch. Damit verbunden wäre wahrscheinlich ein Materialaufwand, der nicht nur beträchtlich groß wäre, sondern auch mit einem entsprechenden Ressourcenverbrauch und mögliche Umweltproblemen bei der Erzeugung der Farbe verbunden wäre. Allerdings kann die Veränderung von Dächern dazu beitragen, das Phänomen lokaler Hitzeinseln in Städten im Sommer zu lindern und die Energiekosten für Klimaanlage zu verringern. Diese Möglichkeit wird beispielsweise bereits im *Cool Roofs*-Projekt der EU untersucht (Cool Roofs 2011). Die Maßnahme erscheint als eine sinnvolle Möglichkeit, lokale Temperaturmodifikationen zu erreichen bzw. die Energiekosten zu senken, ist aber keine wirkliche Option für eine großskalige Modifikation der Albedo.

Die Erhöhung der Rückstrahlung von Grünland-, Getreide- und Waldflächen kann auch als Albedo-Biogeoeengineering bezeichnet werden: Variationen von Nutzpflanzen mit spezifischem Blattglanz und/oder mit spezifischer Gestalt werden angebaut und erhöhen die Albedo (Singarayer et al. 2009; Ridgwell et al. 2009). Allerdings ist auch diese Maßnahme im Hinblick auf ihre globalen Effekte begrenzt. Jedoch argumentiert Ridgwell et al. (2009), dass die Kosten für Forschung und Entwicklung verhältnismäßig niedrig seien und Feldversuche relativ unproblematisch durchführbar wären. Die Technologie erscheint eine Möglichkeit darzustellen um lokale Temperaturmodifikationen zu erreichen. Ridgwell et al. (2009) schätzen, dass mit dieser Maßnahme regionale Temperaturabsenkungen um bis zu 1° C möglich sind. Allerdings erscheint diese Maßnahme keine wirkliche Option für eine großskalige und globale Modifikation der Albedo zu sein. Grundsätzlich könnte sie aber die Effektivität von Aufforstungsprojekten verbessern, da diese bei herkömmlichen Pflanzen eine negative Auswirkung auf die Albedo haben die neben der Kohlenstoffeinlagerung im Hinblick auf die Gesamtwirkungen auf die Strahlungsbilanz zu berücksichtigen sind. Kostenschätzungen für einen Einsatz dieser Technologie liegen noch nicht vor. Sie müssten auch berücksichtigen, dass in der Landwirtschaft das Ziel nicht eine möglichst große Albedo ist, sondern die Produktion von Nahrungsmitteln oder anderer kommerziell nutzbarer Biomasse. Bei der bisher natürlichen Vegetation würde diese zerstört werden müssen um die Albedo zu erhöhen. Natürlich könnten auch genetisch

modifizierte Kulturpflanzen eingesetzt werden, die relativ einfach in den regelmäßigen Fruchtfolgezyklus einzubringen wären. Allerdings wären damit die bekannten Konflikte aus dem Einsatz genmodifizierten Pflanzen bei der Nahrungsmittelproduktion verbunden. In jedem Fall bestünden ernsthafte Zielkonflikte zwischen dem Ziel einer möglichst produktiven Nutzung von Biomasse bzw. dem Schutz der natürlichen Umwelt und der Biodiversität.

Rein theoretisch könnte die Erhöhung der Rückstrahlung von Wüstenflächen signifikant zur Veränderung der globalen Strahlungsbilanz beitragen. Dafür müssten Teile der Wüstenflächen mit reflektierendem Material aus Kunststoff bedeckt werden. Die Studie von Gaskill (2004) schätzt eine maximale Veränderung der Strahlungsbilanz von 3 W/m^2 . Allerdings würden die Kosten für eine Veränderung der Strahlungsbilanz um 1 W/m^2 durch Wüstenflächenmodifikation bei ca. 1 Billion US\$ pro Jahr liegen (Royal Society 2009).

Die Erhöhung der Rückstrahlung der Ozeanoberfläche hat aufgrund der großen dafür zur Verfügung stehenden Fläche ein großes Potential die Albedo zu beeinflussen. Erste Ideen diese Möglichkeit zu nutzen werden im Abschnitt über den technologischen Ausblick diskutiert.

Insgesamt erscheint das Potential einer Veränderung der terrestrischen Albedo aufgrund von Landnutzungskonflikten oder der nur sehr begrenzt frei verfügbaren Fläche gering. Ebenso dürften die Kosten solcher Maßnahmen im Vergleich zu den Alternativen der Emissionskontrolle oder anderer CE-Technologien zu hoch sein. Dies gilt besonders, wenn berücksichtigt wird, dass die Kosten für die Sicherung der Nahrungsmittelproduktion und der Wert des Schutzes der Biodiversität zu den Betriebskosten hinzu gerechnet werden müssten. Schließlich dürfte der Albedo-Effekt in der Praxis deutlich unter 1 W/m^2 liegen, auch wenn in Modellrechnungen theoretisch durch großskalige Modifikation von Wüstenflächen höhere Werte möglich sind. Die Veränderung der Albedo der Erdoberfläche ist also weniger als RM-Technologie für den globalen Effekt geeignet als vielmehr als sinnvolle Maßnahme zur Kontrolle lokaler Wärmeinseln. Helle Oberflächen in urbaner Umgebung können dabei helfen, lokale Wärmeinseln zu verringern und somit indirekt dabei helfen die CO_2 -Emissionen zu reduzieren, wenn Klimaanlage in geringerem Umfang eingesetzt werden müssen. Allerdings ließen sich bei dieser Technologiegruppe Feldtests durchführen, bei denen es nicht zu einer direkten Beeinträchtigung von Anrainern durch Stoffeintrag käme. Entsprechend werden im Hinblick auf Fragen der Messbarkeit von Eingriffen in den Strahlungshaushalt Veränderungen der Wüstenalbedo eine interessante Fragestellung. Allerdings ließen sich, wie oben dargestellt, diese Feldtests nicht kostengünstig durchführen.

3.6 Neue Technologie-Entwicklungen

Der gegenwärtige Katalog der diskutierten RM-Technologien kann keinesfalls abgeschlossen betrachtet werden, da es ständig neue Vorschläge, Studien und Ideen gibt. Als Folge müssen bereits getroffene Einschätzungen revidiert werden bzw. auch bereits ausgeschlossene Verfahren wieder neu diskutiert werden. Bei der Eintragung von Schwefelpartikeln in die Stratosphäre wird zum Beispiel der Transport von Schwefelverbindungen durch gewaltige Helmholtzsche Wirbelringe (Rauchringe) diskutiert.

Ein völlig anderer Vorschlag zielt auf die Erzeugung von Partikeln durch Hochleistungslaser in-situ in der Stratosphäre. Spezielle Laser (siehe Wille et al. 2002) könnten Lichtblitze mit Leistungen im Terawattbereich von einer Dauer im Femtosekundenbereich, die Stickoxide erzeugen, die wiederum in der Stratosphäre Salpetersäure-Trihydratpartikel bilden würden. Damit wäre das Transportproblem gelöst, allerdings steht dem ein entsprechender Energiebedarf der Lasersysteme (im Gigawatt-Bereich) entgegen, zudem ist bekannt, dass Salpetersäure-Trihydrat Aerosol unter stratosphärischen Bedingungen wesentlich stärker zum Ozonabbau beitragen kann als Schwefelsäurepartikel.

Ein neuartiger Vorschlag von Russell Seitz zielt auf die Erhöhung der sehr geringen Ozeanalbedo ($A \approx 0,05$), indem mikroskopischen Luftblasen im Wasser erzeugt werden (Seitz 2011; Robock 2011). Luftbläschen mit einem Durchmesser von einem Mikrometer hätten eine Lebensdauer im Wasser von Monate bis Jahre und ließen sich relativ leicht schiffsbasiert erzeugen. In der Tat werden Mikrobläschen (in vergleichsweise sehr geringer Konzentration) im Ozean durch brechende Wellen auch natürlich erzeugt. Nach Berechnungen von Seitz könnte bereits ein Anteil von 5 ml Luft pro Kubikmeter Wasser in Form von Mikrobläschen (mit einem Radius von 3 μm) einen negativen Klimaantrieb von 18 W/m^2 erzeugen. Es muss betont werden, dass diese Idee höchst spekulativ ist, so sind z.B. Fragen der tatsächlichen Lebensdauer von Mikrobläschen oder die Wirkung von organischen Oberflächenfilmen völlig ungeklärt. Dazu ist zu sagen, dass Luftbläschen aus zwei Gründen verschwinden können: (1) Das umgebende Wasser ist (leicht) mit Luft untersättigt, dann löst sich die Luft im Wasser und das Bläschen verschwindet. (2) Das umgebende Wasser ist (leicht) mit Luft übersättigt, dann wächst das Bläschen und steigt rascher an die Oberfläche, verschwindet also letztlich auch. Wasser-Oberflächenfilme (also an der Innenseite des Bläschens) können den Luftaustausch zwischen Bläschen und Wasser verlangsamen, verlängern daher in jedem Falle die Lebensdauer des Bläschens.

Wie bereits angesprochen, kann man davon ausgehen, dass bei einem möglichen RM-Einsatz in der Zukunft, dann wahrscheinlich ganz andere Technologien als die heute diskutierten zur Debatte stehen. Die grundsätzlichen Nebenwirkungen von Radiation Management, wie in Abschnitt 2.5 dargestellt, werden aber auch diesen Technologien innewohnen.

4 Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Kosten und Effektivität

Gernot Klepper, Wilfried Rickels

Neben dem vermeintlichen Effektivitätsvorteil der RM-Technologien in der schnellen Beeinflussung der Strahlungsbilanz und damit der globalen Temperatur, werden vor allem die niedrigen Betriebskosten als Argument für deren Vorteilhaftigkeit angeführt. Diese angeblich hohe Effizienz von RM-Technologien würde es erlauben, dass sich das globale Problem des Klimawandels durch eine kleine Gruppe von Staaten bzw. womöglich sogar von einem großen Staat alleine lösen ließe, argumentieren einige Autoren (z.B. Schelling 1996; Barrett 2008; Barrett 2009; Zürn und Schäfer 2011). Allerdings beruht die Schätzung niedriger Betriebskosten auf sehr vorläufigen und einfachen Überlegungen, die zahlreiche Aspekte außer Acht lassen, die bei einer Vorhersage über die Betriebskosten von global getätigten Maßnahmen berücksichtigt werden müssen. Hier werden bisher die Auswirkungen einer drastisch gestiegenen Nachfrage nach Gütern und Dienstleistungen für die RM-Technologien und die damit verbundenen Preiseffekte noch weitgehend ignoriert. Darüber hinaus stellen die Betriebskosten möglicherweise nur einen sehr kleinen Teil der gesamtwirtschaftlichen Kosten solcher Maßnahmen dar. So können einzelne RM-Technologien, auch wenn sie im Hinblick auf die Betriebskosten von einer kleinen Gruppe einzelner Staaten realisierbar wären, erhebliche gesamtwirtschaftliche Kosten für andere Regionen nach sich ziehen. Sie würden damit auch erhebliches politisches Konfliktpotential bergen.

Derzeit lassen sich weder die betriebswirtschaftlichen geschweige denn die gesamtwirtschaftlichen Kosten verlässlich abschätzen. Die Informationen zu den Betriebskosten aus dem vorherigen Kapitel stellen nur eine grobe und vorläufige Einschätzung dar, die mit großer Wahrscheinlichkeit nur die Untergrenze für die tatsächlichen Kosten bilden. Aber selbst diese Kosten müssen mit den Kosten von alternativen Maßnahmen zur Beeinflussung des Klimawandels verglichen werden. Im Bericht der Royal Society (2009) werden die vorliegenden Kostenschätzungen mit den Kosten der Emissionskon-

trolle verglichen, die auftreten, wenn der Temperaturanstieg auf 2° C bis zum Jahr 2100 begrenzt werden soll. Diese werden dann auf jährliche Kosten in 1 W/m² umgerechnet.

Tabelle 4:

Potential, Betriebskosten und Investitionsaufwendungen für RM-Technologien

Technologie	Erhofftes Potential in W/m ²	Betriebskosten in Mrd. US\$ pro W/m ²	F&E-, Anlage-, Infrastruktur- und Logistikaufwendungen	Wesentliche Unsicherheiten
SRM-Technologien für Reflektoren im Weltall				
Einbringung von Staub oder Reflektoren im erdnahen Orbit oder am Lagrange Punkt L1	unbegrenzt	1 700	kaum quantitative Studien vorhanden, Ausbringungskosten geschätzt ca. 200 Bill. US\$	Ausbringung und Kapitalkosten
SRM-Technologien zur Ausbringung von Aerosolen in der Stratosphäre				
Ausbringung von Schwefel in die Stratosphäre (>18km) mit bestehenden Flugzeugen	unbegrenzt	16–67	Investitionen für Flotte zwischen 18 und 56 Mrd. US\$, zusätzliche Investitionen pro Basisstation ca. 1 Mrd. US\$	Koagulation zwischen neuen und bereits bestehenden Partikeln (Entwicklungsstand: Modellierung)
Ausbringung von Schwefel in die Stratosphäre (>18km) mit neu entwickelten Flugzeugen	unbegrenzt	2–12	Investitionen für Flotte zwischen 6 und 36 Mrd. US\$, zusätzliche Investitionen pro Basisstation ca. 1 Mrd. US\$	Koagulation zwischen neuen und bereits bestehenden Partikeln (Entwicklungsstand: Modellierung)
Ausbringung von Schwefel in die Stratosphäre (>18km) mit neu entwickelten Luftschiffen	unbegrenzt	5–18	Investitionen für Flotte zwischen 19 und 66 Mrd. US\$, zusätzliche Investitionen pro Basisstation ca. 1 Mrd. US\$	Koagulation zwischen neuen und bereits bestehenden Partikeln, Erreichung der notwendigen Ausbringungshöhe (Entwicklungsstand: Modellierung)
Ausbringung von Nanopartikeln in die Stratosphäre	unbegrenzt	Derartige Nanopartikel existieren noch nicht. Innerhalb der Studie Keith (2010) wird angenommen, dass die Partikel durch Ausnutzung von photophoretischen Kräften nach ihrer Ausbringung oberhalb der Stratosphäre schweben würden. Entsprechend sinkt die auszubringende Menge erheblich und theoretische Kostenersparnisse bezüglich der Ausbringung um den Faktor 200 wären möglich.		
TRM-Technologien zur Modifikation von Zirruswolken				
Einsähen von Bismut(III)-iodid (BiI ₃) in Zirruswolken	-1 bis -4	0,007	Keine quantitativen Studien vorhanden (Aufwendungen niedrig)	Notwendige Aerosolkonzentration und Ausbringungsfrequenz (Entwicklungsstand: Modellierung)
SRM-Technologien zur Modifikation mariner Schichtwolkenmodifikation				
Injektion von Seesalzpartikeln durch Schiffe mit Flettner-Antrieb	-4	0,135	F&E Kosten: 27 Mill. US\$, Rüstkosten: 30 Mill. US\$, Investitionen für Flotte 1,667 Mrd. US\$, Logistikaufwendungen, Wartungs- und Instandhaltung noch nicht berücksichtigt	Automatischer Betrieb der Schiffe, Einsatz von Flettner-Antrieb (Entwicklungsstand: Modellierung und Feldversuche geplant)
SRM-Technologien zur Modifikation der Erdoberflächenalbedo				
Erhöhung der Albedo von Städten	-0,2	2 000	Keine quantitativen Studien vorhanden (Aufwendungen: hoch)	Erneuerung von Anstrichen bzw. Material (Entwicklungsstand: Anwendungsphase zur Absenkung von Energiekosten)
Erhöhung der Albedo von Wald- und Grünflächen	-1	k.A.	Keine quantitativen Studien vorhanden (Aufwendungen niedrig bis mittel)	Ersetzung bestehender Wald- und Grünflächen (Entwicklungsstand: Modellierung)
Erhöhung der Albedo von Wüsten	-3	1 000	Keine quantitativen Studien vorhanden (Aufwendungen hoch)	Wartung- und Instandhaltung des Materials (Entwicklungsstand: Modellierung)
Erhöhung der Albedo der Ozeane	keine Studien vorhanden			

Quelle: Klepper und Rickels (2011); Rickels et al. (2011).

Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Einschätzungen zu dem erhofften Potential, den Betriebskosten, den Investitionsaufwendungen sowie den wesentlichen Unsicherheiten bzw. dem Entwicklungsstadium der verschiedenen derzeit diskutierten RM-Technologien. Für die Investitions- und Logistikaufwendungen liegen kaum quantitative Daten vor. Daher wird dafür eine qualitative Bewertung vorgenommen (vgl. auch Klepper und Rickels 2011: 60–62). Die Bewertungskategorien sind: niedrig, mittel und hoch. Dabei bezieht sich diese Einschätzung immer darauf, dass das Potential vollständig realisiert wird.

Die Angaben zeigen, dass die Jahreskosten für Maßnahmen zur Modifikation der Erdoberfläche und zu Modifikationen im Weltall die Jahreskosten von 200 Mrd. US\$ für herkömmliche Emissionskontrolle deutlich übersteigen würden. Die Kosten für Maßnahmen zur Modifikation der Zirkuswolken, der marinen Schichtwolken und der Stratosphäre lägen dagegen deutlich unter diesen Vergleichskosten. Dabei erscheinen insbesondere die Kosten für die Modifikation der Zirkus- und marinen Schichtwolken extrem niedrig. Betrachtet man die Entwicklung der geschätzten Kosten zur Modifikation der Stratosphäre, zeigt sich in den vergangenen Jahren ein deutlicher steigender Trend. Entsprechende Entwicklungen sind auch bei den Kostenschätzungen für die Modifikation von Zirkuswolken und mariner Schichtwolken zu erwarten. Bei der Stratosphärenmodifikation ergäben sich aber deutliche Kosteneinsparungen, sobald neue Flugsysteme, die für die nötige Ausbringungshöhe konstruiert sind, eingesetzt werden könnten. Allerdings lassen schon bestehende Flugsysteme eine kostengünstige Ausbringung zu und erlauben daher insbesondere auch eine experimentelle Erprobung dieser Maßnahme.

Wie bereits angedeutet, ist der Kostenvergleich bis hierhin unvollständig und vernachlässigt verschiedene Aspekte. Zum einen sind in der Abschätzung der Betriebskosten Preis- und Skaleneffekte nicht berücksichtigt; zum anderen sind dynamische und strahlungsbilanzbedingte Aspekte nicht berücksichtigt. Darüber hinaus beschränkt sich die Kostenabschätzung bislang nur die Betriebskosten und lässt gesamtwirtschaftliche Kosten außer Acht.

4.1 Die Bedeutung von Preis- und Skaleneffekten

Die derzeit verfügbaren Kostenschätzungen basieren auf der Annahme, dass bei einem Einsatz der Technologien die Materialien und die Investitionsgüter zu heutigen Preisen bezogen werden können. Entsprechend werden alle Preiseffekte auf vor- und nachgelagerten Märkten, die bei einer weltweiten Umsetzung dieser Technologien aufträten, vernachlässigt. Auf einigen Rohstoff- und Gütermärkten würde die Nachfrage bei einem großskaligen Einsatz jedoch drastisch steigen, so dass entsprechende Preissteigerungen die Folge wären. Preiseffekte ergäben sich auch auf der Finanzierungsseite, insbesondere wenn man berücksichtigt, dass mit zahlreichen Maßnahmen erhebliche Investitionsaufwendungen verbunden sind, die auch bei staatlicher Absicherung des Kreditrisikos die Kapitalkosten signifikant erhöhen können. Diese Marktmechanismen haben also zur Folge, dass die Betriebskosten der Technologien bisher unterschätzt werden. So würde es zum Beispiel bei einer großskaligen Modifikation mariner Schichtwolken durch Flettner-Schiffe zu erheblichen Preiseffekten auf dem Schiffmarkt kommen. Analoge Preiseffekte sind auf dem Flugzeugmarkt bzw. dem Treibstoffmarkt für die Ausbringung von Partikeln in die Stratosphäre zu berücksichtigen. Würde für die Ausbringung von Aerosolen Luftschiffe eingesetzt, schätzen McClellan et al. (2010), dass nach jedem Flug rund 1 % des Heliums in den Luftschiffen ersetzt werden muss. Damit ergibt sich beim Einsatz einer Luftschiffflotte ab einer Ausbringungshöhe von 20 km beispielsweise bereits ein jährlicher Heliumbedarf, der rund 70 % der jährlichen US-Produktion entspricht.

Diese Preiseffekte führen aber – wie bereits angesprochen – nicht nur zu einer Korrektur der Betriebskosten, sondern implizieren auch entsprechende Effekte in anderen Industrien. Höhere Preise

für Schiffe würden beispielsweise die Betriebskosten von Reedern erhöhen, gleichzeitig zu höherer Nachfrage für Schiffswerften führen.

Neben den nachfrageinduzierten Preissteigerungen können bei verschiedenen Technologien aber auch positive Skaleneffekte auftreten. Während bei bewährten technischen Komponenten wie Schiffen oder Flugzeugen erwartet wird, dass die Preiseffekte dominieren, können bei neueren Technologiekomponenten auch die Skaleneffekte dominieren, so dass diese im Zeitablauf zu geringeren Kosten eingesetzt werden könnten als zu Beginn der Entwicklungsphase. Bei der Ausbringung von Aerosolen mit Rohrsystemen sind zum Beispiel noch erhebliche technische Fortschritte denkbar. Insgesamt muss man feststellen, dass die bisher vorliegenden Schätzungen der direkten Kosten von RM-Technologien noch ausgesprochen rudimentär sind und die wirklichen Kosten vermutlich weit unterschätzen. Weitere Forschung ist nötig, um insbesondere die Auswirkungen eines weltweiten Einsatzes der Technologien auf die Märkte für Vorprodukte zu analysieren. Darüber hinaus ist es notwendig die volkswirtschaftlichen Rückkopplungseffekte dieser verstärkten Nachfrage zu quantifizieren und ihre Auswirkung auf Einkommen und Wohlfahrt abzuschätzen.

4.2 Symptomatische versus ursächliche Beeinflussung der Strahlungsbilanz und dynamische Effizienz

Wie bereits diskutiert, erfordert eine Bewertung der Kosten der RM-Technologien den Vergleich mit bestehenden Maßnahmen zur Emissionskontrolle. Dieser Vergleich setzt voraus, dass entweder die Veränderung in der Strahlungsbilanz auf eine äquivalente Menge von CO₂ umgerechnet wird oder dass die Auswirkung einer Reduktion von CO₂-Emissionen auf die Strahlungsbilanz bestimmt wird. Die Beziehung zwischen atmosphärischer CO₂-Konzentration und zurückgehaltener langwelliger Wärmeabstrahlung ist aber nicht linear: Je höher die bestehende atmosphärische CO₂-Konzentrationen, desto größere Mengen CO₂ müssen der Atmosphäre entzogen werden, um eine entsprechende Veränderung in der Strahlungsbilanz zu erzielen (z.B. Lenton und Vaughan 2009). Die Vergleichskosten für die Veränderung der Strahlungsbilanz mit herkömmlicher Emissionskontrolle steigen also mit der vorherrschenden atmosphärischen CO₂-Konzentration. Oder vereinfacht gesagt: Je höher die bestehende CO₂-Konzentration ist, umso günstiger werden RM-Technologien im Vergleich zu herkömmlichen Technologien zur Emissionskontrolle.

Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass eine durch eingesparte Menge CO₂ nachhaltig zu einem geringeren Strahlungsantrieb kommt.¹³ Genauso kommt es bei der Reduktion der atmosphärischen CO₂-Konzentration durch CDR-Technologien zu einer nachhaltigen Veränderung der Strahlungsbilanz, d.h., diese Maßnahmen müssen einmalig durchgeführt werden, um den Strahlungsantrieb um den Effekt einer bestimmten Menge CO₂ zu verringern. Im Gegensatz dazu müssten die RM-Technologien über den Zeitraum der natürlichen Verweildauer einer Einheit CO₂ in der Atmosphäre durchgeführt werden, wenn sie den Treibhauseffekt komplett kompensieren wollten. Um die Kosten von RM-Maßnahmen mit denen der Emissionskontrolle zu vergleichen werden im Bericht der Royal Society die gesamtwirtschaftlichen Kosten einer Begrenzung des Temperaturanstiegs auf 2° C im Jahr 2100 herangezogen (Royal Society 2009). Daraus ergibt sich eine Kostenschätzung von ca. 200 Mrd. US\$ pro W/m² pro Jahr. Würde man von einem Emissionsszenario ohne klimapolitische Maßnahmen ausgehen, so müssten die RM-Maßnahmen für mehrere tausend Jahre durchgeführt werden. Die Länge hinge davon ab, wie vollständig der treibhausgasinduzierte Strahlungsantrieb kompensiert werden soll (Brovkin et al. 2009). Entsprechend werden in der Schätzung der Royal Society bei einer Beschrän-

¹³ Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass dieses Argument nur für weltweit eingesparte Mengen gilt. Wenn ein Land unilateral eine Einheit Kohlenstoff eingespart, so kann es aufgrund von Preiseffekten in anderen Regionen zu höheren Emissionen kommen. Dieser Effekt wird auch als *international carbon leakage* bezeichnet (z.B. Sinn 2008; Edenhofer und Kalkuhl 2009).

kung des Vergleichshorizonts auf 100 Jahre die Vergleichskosten um etwa einen Faktor von 10 überschätzt, wenn die RM-Technologien eben nicht nur 100 Jahre, sondern 1 000 Jahre durchgeführt werden müssten. Umgekehrt kann diese Umrechnung aber auch eine grobe Unterschätzung der Vergleichskosten darstellen, wenn die Effizienz der Maßnahmen daran gemessen werden soll, die Strahlungsbilanz innerhalb eines kurzen Zeitraums (z.B. fünf Jahre) zu beeinflussen. Berücksichtigt man die geschätzten langen Zeiträume für den Einsatz der kompensierenden Maßnahme aus der Arbeit von Brovkin et al. (2009), könnte sich beispielsweise die statische Effizienz (Kostenvergleich auf Jahresbasis ohne Berücksichtigung der gesamten Einsatzzeit) der Stratosphärenmodifikation im Vergleich zur herkömmlichen Emissionskontrolle auf dynamischer Ebene relativieren bzw. sogar umdrehen.

Für einen Kostenvergleich der RM-Technologien mit herkömmlicher Emissionskontrolle bzw. CDR ist deswegen eine dynamische Szenarienanalyse notwendig, die unterschiedliche Zeithorizonte, Emissionsszenarien und Kompensationsniveaus berücksichtigt. Innerhalb der Analyse müssen positive Rückkopplungseffekte von RM-Maßnahmen auf die natürliche CO₂-Aufnahme modelliert werden. Dynamische Kostenvergleiche über diese Zeiträume mit Berücksichtigung der verschiedenen Rückkopplungseffekte von RM-Maßnahmen auf die natürliche CO₂-Aufnahme existieren aber selbst für die Betriebskosten noch nicht. Solche Kostenvergleiche würden die modellgestützte Analyse verschiedener Szenarien im Hinblick auf Emissionspfade und RM-Eingriffe erfordern, wie sie bereits in Ansätzen, allerdings ohne Berücksichtigung der Kostenkomponente, in der Arbeit von Brovkin et al. (2009) stattfindet. Es ist allerdings offensichtlich, dass der Vergleich auf der Basis eines Horizonts von nur 100 Jahren eine grobe Unterschätzung der langfristigen Kosten des RM darstellt. Entsprechend ist es nicht möglich, allgemeingültige Vergleichskosten für RM-Technologien zu definieren, da diese je nach bereits erreichter atmosphärischer CO₂-Konzentration und Vergleichszeitraum stark schwanken. Ein Vergleich kann daher immer nur unter expliziter Berücksichtigung einer atmosphärischen CO₂-Referenzkonzentration und eines Referenzzeitraums vorgenommen werden.

4.3 Berücksichtigung sozialer Kosten und Erträge

Neben den Auswirkungen auf andere Märkte durch Preiseffekte und neben der Berücksichtigung der dynamischen Effizienz sind vor allem auch mit externen Effekten verbundenen Kosten und Erträge bei einer Bewertung der RM-Technologien zu berücksichtigen. Diese Effekte können sowohl positiver Art sein (also soziale Erträge verursachen) als auch negativer Art, also soziale Kosten für die Weltgemeinschaft oder für einzelne Staaten oder Regionen darstellen. Entsprechend kann sich die Einschätzung der Wohlfahrt eines RM-Einsatzes verändern, wenn diese externen Kosten dem RM tatsächlich zugeordnet werden. Die gesamten volkswirtschaftlichen Kosten einer RM-Technologie ergeben sich dann aus der Summe aus Betriebskosten und externen Kosten/Erträgen unter Berücksichtigung der Preis- und Skaleneffekte.

Bei den externen Effekten für RM-Technologien kann zwischen direkten und indirekten externen Effekten unterschieden werden. Die direkten externen Effekte beziehen sich zum Beispiel auf die Schäden, die sich durch die Ausbringung eines Materials auf die Umwelt ergeben. Unter den indirekten externen Effekten werden in dieser Studie Wirkungen verstanden, die sich durch Rückkopplungseffekte des Klimasystems ergeben und regional unterschiedlich ausfallen können. Diese Rückkopplungseffekte ergeben sich durch die Kompensation des langwelligen treibhausgasbedingten Strahlungsantriebs mit einer Veränderung der kurzwelligen Sonneneinstrahlung. Allerdings bestehen noch

große Unsicherheiten über ihr Ausmaß, und es gibt derzeit kaum quantitativen Studien mit Abschätzungen über die möglichen gesamtwirtschaftlichen Kosten dieser Effekte.¹⁴

Bei der Einschätzung der direkten und indirekten externen Effekte spielen die Skalen eine besondere Rolle. Werden Technologien zur Modifikation mariner Schichtwolken, zur Modifikation von Zirruswolken oder zur Ausbringung von Aerosolen in die Stratosphäre in einem Umfang ausgeführt, der es erlaubt, das globale Klima zu beeinflussen, ist mit Nebeneffekten zu rechnen. Bei der Modifikation der Zirruswolken beschränken sich die möglichen direkten externen Effekte vor allem auf die Eigenschaft der als Eiskerne eingebrachten Partikel. Das von Mitchell und Finnegan (2009) vorgeschlagene Ausbringungsmaterial BiI3 ist aber nicht toxisch. Außerdem ist die Konzentration des Ausbringungsmaterials in Niederschlägen zu gering, um ein Risiko für die Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit darzustellen (Warburton et al. 1995; Mitchell und Finnegan 2009). Wird die Maßnahme abgebrochen, regnen die Aerosole innerhalb von ein bis zwei Wochen ab (Mitchell und Finnegan 2009). Auch bei der Einbringung von Seesalzpartikeln zu Modifikation mariner Schichtwolken erscheinen die direkten externen Effekte gering. Es wird kein kreislauffremder Stoff in den marinen Stoffkreislauf eingebracht und, wenn die Maßnahme abgebrochen wird, werden die Salzaerosole innerhalb weniger Tage abgeregnet.¹⁵ Bei der Ausbringung von Schwefel sind direkte Effekte durch die Auswirkungen auf die Ozonschicht, durch den zusätzlichen Eintrag von Schwefel und durch die Veränderung des Verhältnisses von direkter zu diffuser Lichteinstrahlung zu erwarten. Insgesamt lässt der derzeitige Kenntnisstand aber die Einschätzung zu, dass die direkt mit einer Schwefelausbringung verbundenen externen Effekte durch die Stoffeinträge ökonomisch vernachlässigbar sind bzw. die positiven externen Effekte die negativen externen Effekte möglicherweise kompensieren (Klepper und Rickels 2011). Trotzdem zeigt der hohe Grad der Unsicherheit über diese möglichen externen Effekte, dass eine weitere Erforschung notwendig ist, um die gesamtwirtschaftlichen Kosten besser abzuschätzen.

Bei RM-Technologien werden die gesamtwirtschaftlichen Kosten aber vor allem durch die indirekten externen Effekte im Klimasystem bestimmt (Klepper und Rickels 2011). Obwohl noch wenig über die unterschiedlichen Auswirkungen von RM-Maßnahmen auf das regionale Klima bekannt ist, muss man davon ausgehen, dass auch die wirtschaftlichen Effekte regional sehr unterschiedlich ausfallen können. Die Quantifizierung dieser Effekte setzt den Einsatz von Klimamodellen mit regionaler Auflösung voraus, deren Ergebnisse dann in entsprechenden Studien zur Folgeabschätzung im Hinblick auf ihre gesamtwirtschaftlichen Folgen quantifiziert werden können. Die Erforschung dieser Fragestellungen befindet sich aber noch in ihren Anfängen. Vorläufige Ergebnisse zeigen, dass selbst nah beieinander liegende Regionen sehr unterschiedlich betroffen sein können und dass sich landwirtschaftliche Erträge verändern und Anbauggebiete verschieben (Xia und Robock 2011).

4.4 Bewertung zukünftiger Ereignisse

Die Frage nach der dynamischen Kosteneffizienz bzw. auch die Bewertung der sozialen Kosten wirft die Frage auf, wie solche Ereignisse – bzw. Kosten oder Erträge – bewertet werden, die in ferner Zukunft auftreten können. Dabei geht es z.B. um die Diskontierung zukünftig anfallender Schäden aus dem Abbruch von RM-Maßnahmen. Grundsätzlich wird in der ökonomischen Analyse die Bewertung zukünftiger Ereignisse und damit auch die Bewertung von Irreversibilität und zukünftigen Schäden stark durch die Wahl der Diskontrate beeinflusst. Die Bestimmung einer angemessenen Diskontrate ist daher ein zentrales Thema in der Debatte über die Kontrolle des Klimawandels und geht über den

¹⁴ Vgl. dazu auch Abschnitt 2.5.

¹⁵ Vgl. Abschnitt 3 zu Details über die Abklingzeiten.

Fokus der CE-Debatte hinaus. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die Diskontrate durch die reine Zeitpräferenzrate, d.h., wie man Ereignisse in der Zukunft bewertet sowie die Veränderung des Nutzens durch eine Zunahme des Konsums als auch der Wachstumsrate des Konsums bestimmt. Mit Hilfe der reinen Zeitpräferenzrate wird gemessen, wie die Zukunft im Vergleich zur Gegenwart gemessen wird. Es wird argumentiert, dass Nutzen oder Konsum in der Zukunft generell mit Unsicherheit behaftet ist, d.h., es ist unsicher ob die Gesellschaft noch in den Genuss dieses Nutzens kommt. Entsprechend kann man argumentieren, dass ein unsicherer Konsum in der Zukunft einen geringen Wert hat als ein sicherer Konsum in der Gegenwart. Dieser Argumentation wird aber entgegengehalten, dass tatsächlich eine positive Zeitpräferenzrate einfach eine Diskriminierung des Nutzens zukünftiger Generationen darstellt, so als würde man den Nutzen von Menschen in anderen Regionen niedriger bewerten. Die Bedeutung des Wachstumsrate des Konsums bzw. die Elastizität des Grenznutzens für die Diskontrate basiert auf dem Argument, dass die zukünftigen Generationen reicher sind und daher eine marginale Zunahme ihres Konsums für sie einen geringeren Wert hat als eine marginale Zunahme des Konsums für die heutige Generation. Entsprechend reicht bereits ein über die Zeit wachsender Konsumpfad aus, um eine positive soziale Zeitpräferenzrate zu erhalten, auch wenn aus ethischen Gesichtspunkten die reine Zeitpräferenzrate auf null gesetzt wurde. Umgekehrt bedeutet das aber auch, dass ein sinkender Konsumpfad selbst bei positiver Zeitpräferenz zu einer negativen sozialen Diskontrate führen kann. Gerade im Fall von Klimawandel mit seinen möglicherweise weitreichenden Auswirkungen auf natürliche und produzierte Kapitalbestände könnte das zukünftige Konsumniveau auch niedriger ist. Entsprechend müssten zukünftige Schäden höher bewertet werden als heutige.¹⁶ Die Frage, wie sich die optimale soziale Diskontrate bestimmt, wenn zukünftig einige Güter reichlicher vorhanden sind (z.B. Verbrauchsgüter), andere Güter aber in geringerem Maße (z.B. Umweltgüter) ist zwar theoretisch lösbar, aber empirisch gerade im Kontext des Klimawandels und damit auch im Kontext von CE-Maßnahmen noch weitgehend unerforscht. Sollte sich tatsächlich eine negative Zeitpräferenzrate ableiten lassen, würden Maßnahmen in der Gegenwart (z.B. rechtzeitige Emissionskontrolle) im Vergleich zu Maßnahmen in der Zukunft (z.B. RM-Eingriff) relativ gesehen günstiger werden.

5 Wirtschaftliche, politische und soziale Interdependenzen und Konflikte

Jonas Dovern, Sebastian Harnisch, Gernot Klepper, Wilfried Rickels

Für die Bewertung der RM-Technologien ist nicht nur deren Effektivität in Bezug auf eine Kontrolle des Klimawandels und ihre Effizienz im Vergleich zu anderen klimapolitischen Entscheidungen von Bedeutung, sondern auch die Frage, wie sich die Wirkungen, Nebenwirkungen und Kosten zwischen Gesellschaftsgruppen, Staaten und auch zwischen Generationen verteilen. Gerade diese Verteilungseffekte sind noch weitgehend unbekannt. Entsprechend ist noch unklar, wie und in welchem Umfang RM-Technologien in ein internationales Regime für den Klimaschutz integriert werden können (Barrett 2008; Barrett 2014; Kousky et al. 2009; MacCracken 2009; Klepper und Rickels 2014). Je nachdem, wie diese unterschiedlichen Auswirkungen und Risiken von den verschiedenen Akteuren bewertet werden und Eingang in eine zentralisierte oder dezentralisierte Entscheidungsfindung finden, können sich unterschiedliche internationale Konflikte ergeben.

¹⁶ Für eine Übersicht zu der aktuellen Diskussion über Diskontraten siehe Dasgupta (2008) und Heal (2009).

5.1 Gesamtwirtschaftliche Interdependenzen

Grundsätzlich ist mit dem Einsatz der RM-Technologien immer eine gewisse Verdrängung der Emissionskontrolle verbunden. Dieser Substitutionseffekt ergibt sich beispielsweise durch einen möglichen Kostenvorteil von RM-Technologien und ihren Reaktionsvorteil (Gramstad und Tjøtta 2010; Moreno-Cruz und Smulders 2010; Goes et al. 2011, Moreno-Cruz und Keith 2012). Wie im vorherigen Abschnitt diskutiert, kann die Kostenvorteilhaftigkeit aber noch nicht empirisch bestätigt werden, da dynamische und gesamtwirtschaftliche Aspekte bislang nicht hinreichend berücksichtigt sind. Käme es zu einer Substitution von Emissionskontrolle durch den Einsatz von RM-Technologien, würde dies, anders als beim Einsatz von CDR-Technologien, nicht zwangsläufig zu einer niedrigeren atmosphärischen CO₂-Konzentration führen. Zwar ergeben sich bei der Substitution mit RM-Technologien durch temperatur- und strahlungsspezifische Rückkopplungen senkende Einflüsse auf die atmosphärische CO₂-Konzentration, aber abgesehen von eher theoretischen Spezialfällen geht die Substitution mit einer höheren atmosphärischen CO₂-Konzentration einher, weil der Effekt nachlassender Emissionskontrolle überwiegt.

Der Substitutionseffekt zwischen Emissionskontrolle und RM-Technologien ergibt sich aber eben nicht nur durch die – empirisch bislang nicht hinreichend belegte – Kostenvorteilhaftigkeit, sondern auch durch den Reaktionsvorteil von RM-Technologien. RM-Technologien erlauben eine relativ schnelle Absenkung der Temperatur und können damit kurzfristig eingesetzt werden, um eine unerwartet starke Temperaturreaktion zu kompensieren oder das Überschreiten von Schwellenwerten zu verhindern, was durch eine stärkere Vermeidung von Emissionen nicht erreichbar wäre. In dieser Hinsicht sind RM-Technologien als kurzfristig einsetzbare Maßnahmen zur Kontrolle der Erdtemperatur praktisch alternativlos, da die Emissionskontrolle und CDR-Technologien nicht über ein hinreichend großes kurzfristiges Potential verfügen, um schnell eine Absenkung der Temperatur herbeizuführen. Moreno-Cruz und Keith (2012) zeigen diesen Effekt sehr anschaulich in einem theoretischen dynamischen Optimierungsmodell. Wenn zu einem späten Zeitpunkt Informationen über eine höher als erwartete Klimasensitivität bekannt werden, dann kann mit einem Einsatz von RM-Technologien reagiert werden. Ohne diese Möglichkeit sind aus Vorsorgegründen frühzeitig deutlich größere Emissionsreduktionen notwendig als bei der Verfügbarkeit der RM-Technologien.

Entsprechend stellt die Verfügbarkeit von RM-Technologien eine Form der Versicherung gegen unsicheren, beziehungsweise abrupten, also unerwarteten Klimawandel dar. Dabei ist der optimale Umfang der RM-Technologien umso höher (und entsprechend das Ausmaß der Vermeidung umso niedriger), je geringer der Schaden der RM-Maßnahmen und je höher ihre Effektivität ist. Aber auch wenn die Effektivität der gewählten RM-Technologie gering ist und die direkt damit verbundenen Schäden durch Nebeneffekte hoch sind, bleibt es optimal, RM-Technologien als zusätzliche Absicherung zu nutzen, wenn sich abrupter Klimawandel mit hohen Schäden einstellt. Gleichzeitig verringert sich der Versicherungscharakter von RM-Technologien, wenn die Unsicherheit über dessen Effektivität und Nebenfolgen zunimmt. Dementsprechend werden die Emissionen wieder stärker reduziert. Es entsteht also ein Trade-off zwischen dem Risiko eines möglicherweise katastrophalen Klimawandels und dem Risiko möglicherweise weitreichender Nebeneffekte durch den RM-Einsatz. Entsprechend stellt diese beiden Maßnahmen gewissermaßen Risikokomplexe dar (Moreno-Cruz und Keith 2012).

Dabei beschränkt sich das Risiko von RM-Technologien aber nicht nur auf deren mögliche Nebenwirkungen, sondern auch auf einen Abbruch dieser Maßnahmen. Wird der anthropogene Strahlungsantrieb durch einen massiven Einsatz von RM-Technologien kontrolliert und diese Maßnahmen abrupt unterbrochen, ergibt sich ein sehr sprunghafter Klimawandel (Brovkin et al. 2009; Ross und Matthews 2009). Goes et al. (2011) zeigen für ein Szenario, in dem nur RM-Technologien eingesetzt werden und keine flankierende Emissionskontrolle durchgeführt wird, dass eine Unterbrechung von RM-Maßnahmen zu Wohlfahrtsverlusten führen kann, die sogar die Wohlfahrtsverluste aus einem Szenario

ohne jegliche Intervention übersteigen würden. Dieses Ergebnis hängt allerdings davon ab, wie stark man die Schnelligkeit der Temperaturveränderungen in Relation zur allgemeinen Temperaturveränderung gewichtet. In der Arbeit von Bickel und Agrawal (2013) werden diese Ergebnisse allerdings kritisch diskutiert. Sie zeigen unter anderem, dass das Ergebnis von Goes et al. (2011) darauf basiert, dass in Fall eines RM-Einsatzes keinerlei weitere Anstrengungen unternommen werden, die Emissionen zu kontrollieren. Darüber hinaus ist in deren Arbeit die Möglichkeit von sogenannten Klimakatastrophen, d.h. eine schnelle und nicht vorhergesehene Veränderung des Klimas durch zum Beispiel Kippelemente, nicht berücksichtigt ist. Zudem wird kritisiert, dass die Ergebnisse darauf basieren, dass bei einem Abbruch der RM-Maßnahmen, keine Reaktionen wie eine Anpassung der Emissionskontrolle vorgenommen werden. Insgesamt lassen sich somit die Ergebnisse aus der Arbeit von Goes et al. (2011) nicht verallgemeinern. Allerdings zeigen ihre Arbeit und die anschließende Diskussion in der Arbeit von Bickel und Agrawal (2013) sehr deutlich die möglichen gesamtwirtschaftlichen Konfliktpotentiale eines RM-Einsatzes. Grundsätzlich bestätigen diese beiden Arbeiten die Aussage von Moreno-Cruz und Keith (2012), dass es sich bei Emissionskontrolle und RM-Einsatz um Risikokomplemente handelt.

Beschränkte sich die Entscheidung für den Klimaschutz auf die Emissionskontrolle, würde im Hinblick auf mögliche Klimakatastrophen wahrscheinlich ein zu geringes Vorsorgenniveau gewählt. Dies liegt darin begründet, dass die Emissionskontrolle bestimmte Zielgrößen wie die Begrenzung der Erwärmung auf 2°C nicht mit Sicherheit, sondern nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit erreichen kann. Es kann also – wenn auch mit einer geringen Wahrscheinlichkeit – zu drastischem Klimawandel kommen. Berücksichtigte man zusätzlich die Möglichkeit eines Einsatzes von RM-Technologien, erlaubte dies, stärker auf dieses spezielle Risiko zu reagieren. Allerdings würde schon die Verfügbarkeit von RM zu einer geringeren Emissionskontrolle und einer entsprechend höheren Wahrscheinlichkeit für ein Verfehlen des Klimaziels führen. Dazu kommt, dass durch den Einsatz von RM-Technologien zusätzliche Risiken durch nicht vorhersehbare Nebenwirkungen auftreten.

Ausgehend von der Arbeit von Goes et al. (2011) und Brovkin et al. (2009) argumentieren Klepper und Rickels (2014), dass durch den Einsatz von RM ein Lock-in-Effekt entstehen kann. Die RM-Maßnahmen müssen, wenn sie einmal begonnen wurden, über lange Zeit aufrechterhalten werden, wenn sie nicht durch eine gleichzeitige Reduktion der atmosphärischen CO_2 -Konzentration flankiert werden. Kommt es nicht zu diesen flankierenden Maßnahmen, kann die Situation eintreten, dass aufgrund unerwarteter Nebeneffekte ein Einsatz von RM gesamtwirtschaftlich ex post nicht mehr optimal wäre, gleichzeitig die gesamtwirtschaftlichen Kosten aus den Nebeneffekten aber noch von den gesamtwirtschaftlichen Kosten eines Abbruchs des RM-Einsatzes übertroffen werden. Entsprechend wäre die Gesellschaft gewissermaßen gezwungen, den Einsatz von RM fortzusetzen. Klepper und Rickels (2014) argumentieren, dass entsprechend die Einsatzbereitschaft von CDR-Technologien eine mögliche Voraussetzung für den Einsatz von RM-Technologien sei, da es diese erlauben würden, die Dauer des Lock-in-Effekts zu verkürzen. Grundsätzlich zeigt aber diese Argumentation und auch die Arbeit von Bickel und Agrawal (2013), dass noch erheblicher Forschungsbedarf hinsichtlich einer optimalen Gewichtung von RM und Emissionskontrolle besteht; vor allem müssten in zukünftigen Studien explizit die verschiedenen Risiken wie Klimakatastrophen, unerwartete Nebeneffekte und Ausstiegsmodalitäten berücksichtigt werden.

Neben diesen noch offenen Fragen im Hinblick auf ein intertemporales Risikomanagement hat der Einsatz von RM-Technologien sehr unterschiedliche Auswirkungen auf die verschiedenen Klimavariablen in verschiedenen Regionen. Wie bereits in Abschnitt 2.5 diskutiert, folgt aus einer Kompensation des langwelligen Strahlungsantriebs durch eine Veränderung des kurzwelligen Teils der Strahlungsbilanz, dass zwar eine relativ homogene Kontrolle der Temperatur erfolgt, dies aber nicht für den hydrologischen Kreislauf zu erwarten ist. Entsprechend ist noch unsicher, wie sich die Wohlfahrt in verschiedenen Regionen verändert. Dabei ist bislang noch nicht klar, ob die globale Wohlfahrt als Folge eines RM-Einsatzes wirklich steigt. Für die Betrachtung der weltweiten

Vorteilhaftigkeit von RM-Technologien ist aber gerade die Voraussetzung, dass bei einem Einsatz von RM-Technologien der globale Wohlfahrtsgewinn durch eine Kontrolle der Temperatur die globalen Wohlfahrtsverluste der Nebenwirkungen von RM-Maßnahmen übersteigt.

Berücksichtigt man alle Klimavariablen, kann es durch den Einsatz von RM zu einer Situation kommen, in welcher der Wohlfahrtsverlust in einzelnen Regionen größer ist als in der Situation, in welcher der Klimawandel nicht durch RM kompensiert wird. Diese regional unterschiedlichen Wohlfahrtseffekte müssen explizit in die Bewertung der globalen Wohlfahrtseffekte eingehen. Die Optimierung eines Einsatzes von RM-Maßnahmen sollte deshalb nicht nur anhand der globalen Durchschnittstemperatur geschehen, sondern muss weitere Klimavariablen (Niederschläge, Eisbedeckung, usw.) in ihrer lokalen Ausprägung berücksichtigen. Diese Frage ist aber bislang noch kaum untersucht, und in den meisten theoretischen Arbeiten wird die insgesamt wohlfahrtssteigernde Wirkung eines RM-Einsatzes als Annahme vorausgesetzt.

Die Frage der globalen Wohlfahrtswirkung bei Berücksichtigung auch anderer Klimavariablen und der damit verbundenen Frage nach dem optimalen RM-Niveau wird in der Arbeit von Moreno-Cruz et al. (2012) untersucht. In dieser Arbeit werden die Auswirkungen eines RM-Einsatzes anhand der Veränderung der Temperatur und des Niederschlages bewertet. Dabei kommen sie zum dem Ergebnis, dass es zwar in einzelnen Regionen zu Wohlfahrtsverlusten kommt, diese aber durch Wohlfahrtsgewinne in anderen Regionen überkompensiert werden. Entsprechend könnte man ihre Ergebnisse dahingehend interpretieren, dass es möglich wäre, dieses global optimale RM-Niveau zu realisieren und gleichzeitig einen entsprechenden Ausgleichsmechanismus zu installieren, mit dem die Verluste in einzelnen Regionen ausgeglichen werden können. Die Schaffung eines solchen allgemein akzeptierten Ausgleichsmechanismus erscheint aber schwierig, insbesondere wenn man berücksichtigt, dass es in einem künstlichen Klima kaum möglich ist, potentielle negative Auswirkungen, wie Ernteauffälle oder wetterbezogene Naturkatastrophen kausal auf spezifische RM-Maßnahmen zurückzuführen bzw. einen solchen Zusammenhang wirksam zu bestreiten (Leisner und Müller-Kliesner 2010). Als Alternative zu einem global optimalen RM-Niveau schlagen die Autoren deshalb einen RM-Einsatz vor, der nur so weit geht, dass jede Region/jeder Staat von dem Einsatz profitiert. In diesem Fall wird das optimale RM-Niveau durch jene Region bestimmt, in der am schnellsten die negativen Nebenwirkungen überwiegen. Diese pareto-optimale Lösung würde eine geringere Senkung der globalen Mitteltemperatur implizieren, hätte aber den Vorteil, dass jede Region im Prinzip dem RM-Einsatz in diesem Umfang zustimmen würde. Nach den Modellrechnungen in Moreno-Cruz et al. (2012) würde die pareto-optimale RM-Aktivität durch Westafrika bestimmt, das sich als die für den RM-Einsatz sensibelste und damit begrenzende Region im Vergleich zur globalen Optimierung herausstellt.

Allerdings handelt es sich bei der Arbeit nur um einen ersten Versuch die regional unterschiedliche Kompensation verschiedener Klimavariablen zu berücksichtigen. Die Bewertungskriterien und die Gewichtung von Temperaturänderungen gegenüber den Niederschlagseffekten wären sicher im Detail zu diskutieren. Für manche Regionen wiegt die Abweichung bei der Temperatur stärker als beim Niederschlag und für manche Regionen verhält es sich genau umgekehrt. Bedenkt man zusätzlich, dass einzelne Regionen durchaus Gewinner von Klimawandel sein können, so erscheint es unwahrscheinlich, ein RM-Niveau zu finden, das alle Staaten ohne die Einrichtung eines Ausgleichsmechanismus akzeptieren würden. Abgesehen von den methodischen Schwächen bzw. Grenzen der Arbeit von Moreno-Cruz et al. (2012), zeigt sie aber deutlich, dass für unterschiedliche Regionen ein unterschiedlich intensiver Einsatz von RM-Maßnahmen optimal wäre. Entsprechend ergibt sich ein beträchtliches politisches Konfliktpotential, da bei einer Entscheidung über einen unilateralen oder minilateralen RM-Einsatz sehr wahrscheinlich nicht die globale Wohlfahrt die Richtschnur wäre sondern regionale Interessen. Unabhängig von den Unsicherheiten über die Nebenwirkungen eines RM-Einsatzes kann aber davon ausgegangen werden, dass es Regionen gibt, in denen als Folge eines

RM-Einsatzes die globale Wohlfahrt steigt und damit die Gefahr einer unilateralen Umsetzung von RM-Maßnahmen nicht ausgeschlossen ist (Barrett 2009; Barrett 2010).

5.2 Politisches Konfliktpotential

Vor dem Hintergrund der im vorherigen Abschnitt dargestellten gesamtwirtschaftlichen Konfliktpotentiale ergeben sich vor allem aufgrund der unterschiedlichen regionalen Auswirkungen eines potentiellen RM-Einsatzes politische Konfliktpotentiale, wenn die Entscheidungsfindung auf dezentraler Ebene stattfindet. Erschwerend kommt hinzu, dass die Effekte von RM-Forschung und Einsatz derzeit nur eingeschränkt absehbar sind, sobald diese aber deutlicher erkennbar werden, nur noch sehr schwer steuerbar sind.¹⁷ Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass selbst bei den bestehenden Unsicherheiten über die Kosten der verschiedenen Technologien, dass einige der RM-Technologien gemessen an den reinen Betriebskosten von einem großen Staat bzw. einer Gruppe von Staaten uni- bzw. multilateral eingesetzt werden können (Schelling 1996; Barrett 2008; Zürn und Schäfer 2011).

Kommt es zu einem uni- bzw. multilateralen Einsatz von RM-Technologien, so könnten die damit verbundenen Kosten möglicherweise die Kosten der Emissionskontrolle dieses Landes bzw. der Ländergruppe übersteigen. Entsprechend können sich aus haushaltspolitischen Erwägungen innenpolitische Konflikte ergeben. Denn liegt der private Nutzen durch den RM-Einsatz des einzelnen Landes bzw. der Ländergruppe nur marginal über dem globalen Nutzen, so wird die Bevölkerung des jeweiligen einzelnen Landes bzw. der Ländergruppe die RM anwendet sich möglicherweise sperren, alle Einsatzkosten allein zu tragen. Entsprechend könnte der Substitutionseffekt verstärkt werden, da es bei einer Entscheidung für einen möglichen RM-Einsatz gleichzeitig innenpolitisch schwieriger wäre, die Kosten für hinreichende Emissionskontrolle zu vertreten (Zürn und Schäfer 2011). Dass setzt aber voraus, dass innerhalb der Bevölkerung bzw. der Entscheidungsfindung mögliche Kosten aus dem Terminationsproblem nicht entsprechend berücksichtigt werden. Bei Internalisierung dieser Kosten, ist zu erwarten, dass der Verdrängungseffekt für Emissionskontrolle geringer ist. Allerdings kann man davon ausgehen, dass mögliche Kosten in der Zukunft nicht entsprechend in der Kostenabschätzung berücksichtigt werden.

Die Verdrängung der Emissionskontrolle wird durch das Trittbrettfahrerproblem verstärkt. Grundsätzlich besteht dieses Problem darin, dass einzelne Akteure einen Anreiz haben, einen geringeren Beitrag zum Klimaschutz zu leisten, als es aus einer globalen Sicht optimal wäre. Dieses Problem erhält aber durch die Möglichkeit, CE-Maßnahmen uni- oder multilateral einzusetzen, eine neue Dimension (Moreno-Cruz und Smulders 2010). Signalisieren einzelne Staaten ihre Bereitschaft, durch den Einsatz von *Climate Engineering* den Klimawandel zu begrenzen, so könnte dies eine Verringerung der Bereitschaft anderer Staaten zur Emissionskontrolle mit sich bringen. Vereinfacht gesagt würde sich dann die restliche Welt darauf verlassen, dass im Falle eines katastrophalen Klimawandels der Temperaturanstieg durch die Staaten begrenzt würde, die über einsatzbereite RM-Technologien verfügen. Entsprechend würde die restliche Welt dann geringere Emissionsanstrengungen wählen, als im Hinblick auf das mögliche Eintreten von schwerwiegenden Folgen des Klimawandels optimal wäre.

Das Trittbrettfahrerproblem verschärft sich aber nur dann, wenn alle Parteien gewinnen und keine Verluste bei einzelnen Staaten durch den RM-Einsatz eintreten. Bei Verlusten einzelner Staaten kann es theoretisch auch zu einer Abschwächung des Trittbrettfahrerproblems kommen (Moreno-Cruz und Smulders 2010). Dieses Reaktionsszenario wird aber aller Voraussicht nach innerhalb der Analyse politischer Konflikte aus einem möglichen CE-Einsatz nur geringe Relevanz haben. Es erscheint nicht

¹⁷ Das sogenannte Collingridge-Dilemma in der Technologie-Entwicklung (Collingridge 1980).

plausibel, dass ein Staat, der durch RM-Anwendung geschädigt wird, darauf mit erhöhter Emissionskontrolle reagiert. Zum einen wirkt Emissionskontrolle auf anderen Zeitskalen als RM-Technologien. Zum anderen könnte nur ein sehr großer Staat durch Emissionskontrolle die Konzentration in der Atmosphäre hinreichend begrenzen, so dass der Anreiz für einen RM-Einsatz sinkt. Bei den relevanten Szenarien für das politische Konfliktpotential ergeben sich ganz andere Auswirkungen auf die Emissionskontrolle. So ist davon auszugehen, dass je höher der private Nutzen eines unilateralen Anwenders und je größer und ungleicher die negativen Konsequenzen für betroffene Staaten, desto wahrscheinlicher ist eine direkte Unterbindung oder Abschwächung der RM-Technologien durch RM-Gegenmaßnahmen der betroffenen Staaten (Horton 2011). Auch mehrt der unilaterale Einsatz von RM-Technologien die Möglichkeit einer nicht intendierten Konkurrenz verschiedener unilateraler RM-Maßnahmen, die auf ein jeweils für die einzelnen Anwender „perfektes“ Klima abzielt, im Zusammenwirken aber Wirksamkeitsverluste bis hin zur Aufhebung des Temperatureffekts zeigen könnten. Schließlich setzt sich der unilaterale Anwender, der nur wenige negative Effekte für Drittstaaten kreiert, sehr viel stärker dem Terminationsproblem aus, als derjenige, der seine Anwendung mit anderen Staaten koordiniert. Denn wenn ein Staat ein für alle konsumierbares öffentliches Gut „Wunschklimate“ bereitstellt, muss er damit rechnen, dass die anderen Staaten zu dessen Erstellung wenig beitragen werden. Je stärker die Bereitstellung, desto geringer die Bereitschaft der Profiteure durch eine Emissionsreduktion das Terminationsproblem zu verringern. Selbst wenn bei Aufnahme der RM-Maßnahmen unklar bleibt, wie stark das Trittbrettfahrerproblem tatsächlich sein wird: für den unilateralen RM-Anwender ist von Beginn an deutlich erkennbar, dass ein Aussetzen oder auch nur eine Rücknahme der RM-Maßnahmen nur mit Hilfe anderer Staaten zu erreichen ist, weil die Emissionsreduktionskapazität eines Einzelstaates niemals das Terminationsproblem lösen können. Entsprechend wird die Möglichkeit eines unilateralen RM-Einsatzes, wie z.B. in Barrett (2010) dargestellt, überschätzt. Nichtsdestotrotz sollen diese Überlegungen von Barrett ebenfalls dargestellt werden.

Barrett (2010) beschreibt ein Szenario, in dem der Klimawandel langsam stattfindet, d.h., einige Regionen erleiden Wohlfahrtsverluste, andere Regionen sind kaum beeinträchtigt oder haben sogar Wohlfahrtsgewinne. Basierend auf den Schätzungen von Cline (2007) über die Auswirkungen des Klimawandels auf Indien, argumentiert er, dass Indien einen unilateralen Anreiz hat, RM-Technologien einzusetzen. Cline schätzt, dass Indiens Agrarproduktion um etwa 30 % bis 2080 fallen könnte, wenn sich die mittlere Temperatur um 3° C erhöht. Barrett (2010) kalkuliert, dass sich allein aus diesem Effekt ein gesamtwirtschaftlicher Schaden von etwa 70 Mrd. US\$ pro Jahr ergeben würde. Berücksichtigt man die Bevölkerungsverteilung in Indien und deren teilweise hohe Abhängigkeit von der Landwirtschaft, erscheint es plausibel, dass es hier zu einem demokratisch legitimierten Einsatz von RM-Technologien kommen könnte. Barrett argumentiert weiter, dass Indien sowohl technisch als auch politisch in der Lage wäre, einen solchen Einsatz durchzuführen, wenn landesspezifische Interessen auf dem Spiel stehen. Außerdem könnte Indien argumentieren, dass die Entwicklungsländer es unterlassen haben, durch rechtzeitige Emissionsvermeidung diesen nun notwendigen Einsatz abzuwenden und sich dabei sogar auf UNFCCC-Statuten stützen.¹⁸ Dieses Szenario zeigt, wie sich entsprechend Druck auf andere Länder aufbauen ließe, ihre Emissionskontrolle zu verstärken, wenn sie keinen Einsatz von RM-Technologien wünschen.

Kritisch ist dabei aber, dass gerade jene RM-Technologien, die es womöglich einzelnen Ländern erlauben würden unilateral oder in einer kleinen Koalition auf den Klimawandel zu reagieren, genau die Technologien sind, die eine besonders vehemente Politisierung und weitreichenden sozialen und politischen Widerstand mit möglicherweise weitreichenden Folgen für den UNFCCC-Prozess

¹⁸ Barrett (2010: 8) argumentiert: „India would also have a moral and quasi-legal case for using geoengineering. The Framework Convention on Climate Change says that ‚developed countries [need] to take immediate action . . . as a first step towards comprehensive response“.

erwarten lassen (Zürn und Schäfer 2011). Entsprechend bedarf es hier noch zahlreicher Szenarienanalysen und Studien zur Folgeabschätzung, die zeigen, welche Akteurskonstellationen der verschiedenen Staaten sich in der Matrix der Klimawandel-Gewinner und -Verlierer und RM-Gewinner und -Verlierer darstellen.

5.3 Soziales Konfliktpotential

Aufgrund der in den beiden vorangegangenen Abschnitten dargelegten Probleme bei der regionalen Verteilung der Auswirkungen und der unterschiedlichen Bewertung und Wahrnehmung von Risiken kann die Diskussion, Erforschung und gegebenenfalls der Einsatz von RM-Technologien zu starken öffentlichen und medialen Reaktionen führen und birgt somit ein enormes öffentliches Konfliktpotential (Renn et al. 2011). Dabei werden potentielle Risiken bereits in der Vorbereitung der Experimente gesehen, aber natürlich auch in der politischen Umsetzung bzw. der politischen Stabilität, die wiederum die Risiken des Betriebs, der Unterbrechung des Einsatzes und auch des Missbrauch der Maßnahme bestimmen (Grunwald 2010; Scheer und Renn 2010; Corner und Pidgeon 2010; Renn et al. 2011).

Zwar hat sich die Bekanntheit der Begriffe *Geoengineering* oder *Climate Engineering* in der Öffentlichkeit in den letzten Jahren erhöht. In einer Umfrage von Leiserowitz (2010) im Jahr 2010 konnten aber nur 3 % der US-Amerikaner eine korrekte Beschreibung von *Climate Engineering* geben. Allerdings wurde dies nur im Rahmen einer größeren Umfrage abgefragt. Bei einer Untersuchung mit konkretem CE-Bezug des National Environment Research Council wurden in Großbritannien sowohl Fokusgruppen befragt als auch eine kleine Umfrage durchgeführt, die aber ebenfalls nur einen sehr geringen Bekanntheitsgrad dieser Maßnahmen offenbarte (NERC 2011a). Spence et al. (2010) berücksichtigte in einer Befragung zum Klimawandel in Großbritannien ebenfalls einige Fragen zu *Climate Engineering*, wobei sich herausstellte, dass etwa 7 % der Befragten den Begriff gut erklären konnten.

In einer internetbasierten Untersuchung wurden die Antworten von 3 105 Teilnehmern aus Kanada, Großbritannien und den USA aus dem November und Dezember 2010 ausgewertet (Mercer et al. 2011). In dieser Umfrage kannte bereits etwa ein Fünftel der Befragten die Begriffe *Geoengineering* oder *Climate Engineering*.¹⁹ In der Befragung wurde zudem gefragt, wie die grundsätzliche Einstellung zum Klimawandel ist, wie die Erforschung oder der Einsatz von RM bewertet wird und inwieweit der Einsatz von RM-Technologien als mögliche Notfalloption gesehen wird. Dabei wurde zusätzlich getestet, wie sich zusätzliche Informationen über RM-Technologien auf die Befragten auswirken können. Grundsätzlich bestand unter den Befragten eher hohe Zustimmung, dass RM erforscht werden und unter bestimmten Bedingungen auch eingesetzt werden sollte. Allerdings ergab sich für Fragen, ob RM sofort oder gar nicht eingesetzt werden sollte, kein klares Meinungsbild. Diese Ergebnisse wurden auch nicht deutlich durch die Bereitstellung von Informationen beeinflusst. Trotz dieser grundsätzlich moderaten Einstellung zu RM-Technologien, fanden aber auch die Aussagen, dass die Erdtemperatur nicht einfach mit einer Technologie beeinflusst werden sollte, relativ hohe Zustimmungen.

Diesen relativ unklaren Ergebnissen steht aber die Erkenntnis gegenüber, dass sich hinter den jeweiligen Mittelwerten teilweise sehr starke Gruppierungen an den Rändern der Zustimmungsmöglichkeiten befinden. Anhand der Frage, ob RM-Technologien als Lösung für den Klimawandel genutzt werden sollte bzw. niemals genutzt werden sollte, konnten ungefähr 29 % der Befragten als Unterstützer für RM-Technologien und 20 % als klare Gegner klassifiziert werden. Entsprechend zeigt

¹⁹ Dabei konnte nur ein kleiner Anteil der Befragten *Geoengineering* richtig beschreiben, während immerhin fast die Hälfte der Befragten, die den Begriff *Climate Engineering* kannten, ihn auch korrekt beschreiben konnte.

sich, dass auch die Frage, ob RM erforscht werden sollte, von diesen Gruppen sehr unterschiedlich bewertet wird. Die Unterstützer von RM halten nicht nur die Erforschung für sinnvoll, sondern glauben auch, dass durch entsprechende Forschung der Einsatz dieser Technologien relativ sicher und effektiv möglich ist. Diese Einschätzung wird erwartungsgemäß von den Gegnern nicht geteilt. Das Auftreten dieser beiden Gruppen unterscheidet sich nicht deutlich zwischen Kanada, Großbritannien oder den USA.

Die genauere Betrachtung dieser Frage zeigt, dass die Diskussion über *Climate Engineering* bzw. RM das Potential zu starker Polarisierung in der Bevölkerung hat. Von den Kritikern wird innerhalb der öffentlichen und medialen Wahrnehmung als Sorge vor allem geäußert, dass manche RM-Technologien möglicherweise schleichende Gefahren mit sich bringen, wie beispielsweise Gesundheitsrisiken durch Nanopartikel in der Stratosphäre oder psychische Beeinträchtigungen durch eine veränderte Wahrnehmung des Himmels (Scheer und Renn 2010). Diese werden, wie Erfahrungen bei Umweltbelastungen durch menschliche Aktivitäten zeigen (z.B. Pestizidrückstände im Trinkwasser, Gentechnik), in der intuitiven Wahrnehmung besonders intensiv empfunden und häufig mehr gefürchtet als vergleichbare Risiken aus dem Lebensalltag oder aus natürlichen Belastungsfaktoren (Renn et al. 2011). Eben diese Sorgen bzw. Risiken sind aber schwer zu quantifizieren, so dass die Menschen bei ihrer Bewertung auf die Informationen durch Experten angewiesen sind. Entsprechend wichtig ist das Vertrauen in diese Experten oder Institutionen. Dabei kann durch divergierende Einschätzung die Unsicherheit in Bezug auf diese Technologien steigen. Besteht der Eindruck, dass keine ausreichende Transparenz über die Informationsgewinnung, die Entscheidung, aber auch die Klärung von Haftungsfragen besteht, kann das Ablehnungs- und Konfliktpotential schnell steigen (Jackson und Salzmann 2010; Bracmort et al. 2010b; Renn et al. 2011). Als Folge kann dann in Bezug auf die mit RM-Technologien assoziierten Risiken von einzelnen Bevölkerungsgruppen schnell ein Nullrisiko gefordert werden, d.h. dass diese nicht mehr bereit sind, irgendein Risiko für einen bestimmten Nutzen in Kauf zu nehmen (Renn 2005; Renn et al. 2011).

Dieses Potential zur starken Polarisierung in der Bevölkerung wird durch öffentliche Akteure wie NGOs und Interessengruppen, die sehr kontroverse Positionen beziehen, zusätzlich verstärkt. So wird von Gruppen mit ursprünglicher Skepsis gegenüber dem Klimawandel wie dem *Copenhagen Consensus Center* in Person von Bjorn Lomborg der Einsatz von *Climate Engineering* bzw. RM als sehr positiv bewertet (Broder 2009). Im Gegensatz dazu gibt es aber auch Gruppen, die sich aktiv gegen CE- bzw. RM-Technologien engagieren, wie beispielsweise die NGO *Action Group on Erosion, Technology and Concentration* (ETC Group) mit ihrer globalen Kampagne *Hands Off Mother Earth!* (H.O.M.E.) (Renn et al. 2011). Andere führende NGOs haben bislang noch kaum Stellung zu RM-Technologien bezogen (Renn et al. 2011). Eine Ausnahme ist *Greenpeace UK*, die sich gegen *Climate Engineering* und RM-Technologien äußern und dabei die Gefährlichkeit und Irreversibilität dieser Technologien anführen (Renn et al. 2011).

Bei der Bewertung der öffentlichen Einschätzung bzw. dem möglichen sozialen Konfliktpotential, muss man aber berücksichtigen, dass sich die Befragungen bislang ausschließlich auf Länder konzentrieren, die von einem möglichen RM-Einsatz voraussichtlich profitieren würden und auch über die finanziellen Möglichkeiten verfügen, bei Schäden einzelne Bevölkerungsgruppen entsprechend zu kompensieren. Gemessen an der Vulnerabilität im Hinblick auf die Auswirkungen von RM-Technologien wird aber gerade das arme Westafrika als eine der sensibelsten Regionen betrachtet. Erhebungen zur Wahrnehmung in den Ländern dieser Region liegen aber noch nicht vor. Sehr wohl wird auf dieses Problem aber von den RM-Gegnern in den westlichen Ländern hingewiesen. Infolge der Verteilungskonflikte könnte es bei einem RM-Einsatz zu politischer Instabilität kommen, die am stärksten wäre, wenn der Einsatz uni- oder minilateral ausgeführt würde (Corner und Pidgeon 2010; Zürn und Schäfer 2011).

Neben der Nichtberücksichtigung der Regionen, die als RM-Verlierer dastehen würden, sind aber auch soziale Konfliktpotentiale aus drohenden Verteilungseffekten zwischen Generationen zu

erwarten. Hier besteht, wie von Betz und Canean (2011) dargestellt, der grundsätzliche Konflikt darin, ob man mit der Einsatzfähigkeit von RM-Technologien den Risiko-Trade-off zwischen Klimawandel und ihrem Einsatz nicht einfach an die nächste Generation überträgt bzw. umgekehrt aufgrund unvorhersehbarer Klimarisiken diese Technologien der nachfolgenden Generation nicht gerade zur Verfügung stellen muss. Auch diese Frage wird von den Befürwortern bzw. Gegnern von RM-Technologien erwartungsgemäß sehr unterschiedlich bewertet. Die Beantwortung bzw. Abwägung dieser Frage ist entscheidend für die Entscheidung über die Erforschung von RM, einhergehend mit den entsprechenden Konsequenzen für die Emissionskontrolle. Goeschl et al. (2013) zeigen, dass eine unterschiedliche Bewertung zwischen Generationen nicht nur dazu führen kann, dass die heutige Generation eine höhere Emissionskontrolle wählt, um die Wahrscheinlichkeit für einen späteren CE-Einsatz zu senken, sondern auch, um die Erforschung von CE-Technologien zu unterlassen. Die aktuelle Generation hat einen Anreiz, die Erforschung zu unterlassen, wenn die Möglichkeit besteht, dass die nachfolgende Generation *Climate Engineering* nicht nur als Absicherung gegen katastrophale Klimaschäden einsetzt, sondern auch im Fall niedriger Klimasensitivität CE-Technologien als Ersatz für die Emissionskontrolle einsetzen möchte. Umgekehrt kann aber auch die Situation eintreten, dass aus Sicht der zweiten Generation bei gleichzeitiger Erforschung von *Climate Engineering* eine zu geringe Emissionskontrolle gewählt wurde und sich die zweite Generation gewissermaßen gezwungen sieht RM einzusetzen.

Wie bereits weiter oben angedeutet, beschränkt sich die unterschiedliche Bewertung der RM-Technologien nicht nur die grundsätzliche Abwägung physischer Beeinträchtigung, sondern auch dadurch, dass RM von unterschiedlichen Bevölkerungsgruppen sehr unterschiedlich eingeschätzt wird. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn eine Bevölkerungsgruppe RM-Technologien stärker als andere Bevölkerungsgruppen oder Wissenschaftler ablehnen, weil sie es als massiven Eingriff in die Natur bewertet und es aus moralischen oder ethischen Gründen ablehnen.

6 Forschungsvorhaben und Akteure der Forschung

Sebastian Harnisch

Zwar ist das Forschungsfeld der technischen Beeinflussung des Wetters schon sehr alt (Fleming 2010), die Geschichte der Versuche, durch technische Mittel das Klima zu beeinflussen – insbesondere den Treibhausgashaushalt und damit die Temperaturentwicklung auf der Erde – ist aber vergleichsweise jung. Der Fokus in diesem Abschnitt liegt dabei auf den Veränderungen in der finanziellen, institutionellen und disziplinären Ausgestaltung, die eine erste Einteilung der Genese des Forschungsfeldes erlaubt.

6.1 Öffentlich geförderte Forschungsvorhaben

Nimmt man die disziplinäre Struktur der CE-Forschung zum Maßstab, so lassen sich drei Phasen identifizieren (Tabelle 5). In einer ersten Phase von Mitte der 1960er (President's Science Advisory Council 1965) Jahre bis Mitte der 2000er Jahre (Crutzen 2006) bearbeiteten zunächst einzelne Natur- und Wirtschaftswissenschaftler die Grundlagen des Feldes (Keith 2000; Sardemann 2010). Diese Forschung war disziplinär, weitgehend auf den US-amerikanischen Raum beschränkt und wurde daher von einer breiteren Öffentlichkeit und von der Politik nicht wahrgenommen.

Tabelle 5:
Entwicklung des Forschungsfeldes CE

	Disziplin	Raum	Institutionell	Finanziell
Phase 1 1965–2005	streng disziplinär	anglo-amerikanisch	Forscher in Einzelinstituten	universitätsbasiert
Phase 2 2005–2011	ansatzweise transdisziplinär	OECD-Welt mit transatlantischem Fokus	Forschungsgruppen u. F-Verbünde	DM-basiert
Phase 3 ab 2011	interdisziplinär Etablierung einer Teildisziplin	ansatzweise global	(inter-)nationale Forschungs- programme	öffentliche Förderung

Quelle: Eigene Darstellung.

In der zweiten Phase (2006–2011) ist das CE-Forschungsfeld deutlich expandiert: Einzelne Forscher haben sich zu Forschungsgruppen und transnationalen Verbänden zusammengeschlossen, die aus mehreren naturwissenschaftlichen, zunehmend aber auch geistes- und sozialwissenschaftlichen Disziplinen bestehen. Zu nennen wären beispielsweise das *Geoengineering Model Intercomparison Project* (GeoMIP, Kravitz et al. 2011) oder das transnationale Konsortium – bestehend aus Harvard, Heidelberg, Oxford und Carnegie Mellon – zur Durchführung transdisziplinärer *CE-Summer-Schools*. Während dieser Phase ist die Forschung einem breiteren Publikum durch vermehrte Medienberichterstattung, öffentliche Vorträge und universitäre Lehre zugänglich gemacht worden.²⁰ Seit 2010 zudem mehrere ad-hoc Initiativen gebildet, die für den Bereich des RM Governance-Strukturen erarbeiten und diese in den internationalen Politikprozess einbringen wollen: Im März 2010 trat aus der Forschergruppe, die den Royal Society Bericht erstellte, die Solar Radiation Management Governance Initiative (SRMGI) hervor. Ebenfalls im Frühjahr etablierte das Bipartisan Policy Center (BPC) eine eigene Task Force zu *Climate Engineering*, deren Bericht im Herbst 2011 vorgelegt wurde (Long et al. 2011). Darüber hinaus rief der Climate Response Fund, eine privatrechtliche Stiftung, im März 2010 etwa 150 Wissenschaftler in das Konferenzzentrum von Asilomar, um Richtlinien für die Erforschung von CE-Technologien zu entwickeln (vgl. Darstellung in Abschnitt 6.2.).

Neben den etablierten Forschungszentren in den USA haben sich institutionell wichtige CE-Schwerpunkte in Großbritannien (Royal Society, Oxford; SPICE; IAGP), in Deutschland (IFM-GEOMAR; Institut für Weltwirtschaft, AWI, Universität Heidelberg; KIT), in Dänemark (Copenhagen Consensus) und in den Niederlanden (Vrije Universität Amsterdam; Rathenau Institute) gebildet. Diesen stehen nur wenige Institute in Osteuropa (Russland), Asien (Singapur), Afrika und Südamerika gegenüber.²¹

Derzeit mehren sich die Anzeichen, dass das CE-Forschungsfeld in eine dritte Phase eintritt. Diese ist durch eine wachsende Politisierung des Themas und dessen Integration in Institutionen des bestehenden UNFCCC-basierten Klimaregimes gekennzeichnet. Im Rahmen des IPCC hat sich die Arbeitsgruppe III (WG III) des *Climate Engineering* angenommen und ein erstes Expertentreffen im Juni 2011 in Lima abgehalten, das der Vorbereitung eines CE-Beitrages für den 5. Sachbestands-

²⁰ Neben mehreren einschlägigen Websites, wie <http://www.climate-engineering.eu/>, gibt es u.a. eine frei zugängliche Google-Mailgruppe (<http://groups.google.com/group/geoengineering?hl=en>), die mit hoher Frequenz CE-bezogene Nachrichten und Forschungsergebnisse für ein interessiertes Publikum bereitstellt.

²¹ In diesen Staaten ist die CE-Forschung bislang auf einzelne Institute beschränkt: in der Russischen Föderation beschäftigt sich das *Institute of Global Climate and Ecology*, Moskau (Y. Israel), in Singapur das *RSIS Centre for Non-Traditional Security Studies*, S. Rajaratnam School of International Studies, Nanyang Technological University und in der VR China das *College of Global Change and Earth System Science*, Beijing Normal University (John Moore) mit unterschiedlichen CE-Technologien.

bericht dienen soll. Mit der Aufnahme in den konsensorientierten IPCC-Prozess wird *Climate Engineering* damit zunächst einer autonomen, potentiell rivalisierenden Regimebildung entzogen. Gleiches lässt sich prinzipiell auch für die restriktive CE-Stellungnahme der Biodiversitätskonvention (CBD) in Nagoya aus dem Jahr 2010 feststellen. Die Empfehlung für das temporäre Verbot großskaliger RM-Feldversuche und die Stellungnahmen zur Meeresdüngung mit Eisen aus dem Jahr 2008 zeigen nicht nur den Einfluss kritischer gesellschaftlicher Akteure auf den CE-Regelungsprozess, sondern auch die Anschlussfähigkeit des bestehenden Klimaregelwerks für CE-spezifische Mechanismen.

Die rasche Zunahme der CE-Erforschung ab dem Jahr 2005 ist vor allem auf zwei Ereignisse zurückzuführen. Zum einen verdichteten sich nach der Verabschiedung des Kyoto-Protokolls durch die Berichte des IPCC die Hinweise, dass die bestehenden Mechanismen zur Reduzierung von Treibhausgaseneffekt und Erderwärmung nicht hinreichend sein würden. Zum anderen beschäftigten sich eine Reihe einflussreicher Naturwissenschaftler mit dem Thema, darunter der niederländische Nobelpreisträger und Atmosphärenchemiker Paul Crutzen (Fleming 2004; Fleming 2007). Quantitative Diskursanalysen und Experteninterviews mit Fachkollegen zeigen deutlich, dass Crutzen mit seinem Plädoyer für eine ernsthafte Erforschung des Effekts von Schwefelinjektionen in der Stratosphäre für viele Forschende das Tabu brach, frei in der Öffentlichkeit über eine technische Intervention in das Klima nachzudenken (Crutzen 2006; Gawel 2011).

Seitdem haben zahlreiche wissenschaftsnahe politische oder wissenschaftliche Institutionen umfassende Stellungnahmen verfasst, die Forschungslücken und Risiken der diversen Technologien, aber auch zunehmend sozioökonomische, juristische, oder ethische Aspekte berücksichtigen (Institution of Mechanical Engineers 2009; Royal Society 2009; Blackstock et al. 2009; GAO 2010; GAO 2011; Bracmort et al. 2010a; Ginzky et al. 2011; Rickels et al. 2011; Schäfer et al. 2015; National Research Council 2015).

Allerdings wird in der international sichtbaren Forschung weiterhin kontrovers darüber diskutiert, inwiefern RM-Technologien, wie zum Beispiel die Sulfat-Injektion in die Stratosphäre, überhaupt sinnvoll unterhalb einer globalen Anwendung (mit entsprechend großskaligen Risiken) getestet werden könnten oder sollten (MacMynowski et al. 2011).²² Zum anderen zielen derzeit alle wissenschaftsgebundenen und internationalen Regulationsinitiativen darauf ab, atmosphärische Tests mit nachweisbarem Effekt bis auf weiteres auszusetzen (Moratorium) oder zu verbieten, sofern sie nicht von einer größeren Gruppe von Staaten oder der Staatengemeinschaft vorab legitimiert wurden.

Im Vorfeld der privatwirtschaftlich-finanzierten Asilomar-Konferenz kamen einige öffentlich-finanzierte britische Forscher zusammen, um erste Grundprinzipien für die CE-Forschung zu etablieren. Diese Grundsätze, die als *Oxford Principles* bekannt wurden, zielen primär auf einen restriktiven Umgang mit CE-Technologien, indem strenge Transparenzanforderungen an CE-Forschung gestellt und privatwirtschaftlicher Nutzung enge Grenzen gesetzt werden. Eine ähnliche Stoßrichtung, wenngleich etwas permissiver, nahmen die wenig später kontrovers diskutierten *CE-Research Guidelines der Asilomar-Konferenz* ein, welche die Transparenz der CE-Forschung betonen, deren Freiheit aber deutlich stärker gewichten.²³

²² Transparenz über den Forschungsprozess in diesem sensitiven Feld bieten bislang die Konferenzen der (inter-)nationalen Fachorganisationen: European Geosciences Union General Assembly 2010, Wien, 3.–7. Mai 2010; 29th Annual Conference of the American Association for Aerosol Research, Portland, Oregon, USA, 25.–29. Oktober 2010; American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, Kalifornien, USA, 13.–17. Dezember 2010; European Geosciences Union General Assembly 2011 Wien, 3.–8. April 2011; International Union of Geodesy and Geophysics Conference Melbourne 2011, Australien, 28. Juni bis 07. Juli 2011. Workshops in jüngster Vergangenheit umfassen: Governing Climate Engineering – A Transdisciplinary Summer School, Heidelberg, 12.–16. Juli 2010; Workshop on the Ethics of Solar Radiation Management, Missoula, Montana, USA, 18.–20. Oktober 2010; Government-University-Industry Research Roundtable, Washington D.C., 12.–13. Oktober 2010; IGBP Symposium on Ecosystem Impacts of Geoengineering, La Jolla, Kalifornien, USA, 2.–4. Februar 2011; Climate Engineering – Second Transdisciplinary Summer School, Banff, Kanada, 1.–7. August 2011.

²³ „To promote the responsible conduct of research on climate engineering, recommendations were made to adopt five principles: (1) climate engineering research should be aimed at promoting the collective benefit of humankind and the environment; (2) governments must clarify responsibilities for, and, when necessary, create new mechanisms for the gover-

Übersicht 1: Beschränkte Feldversuche für CE-Technologien

Ozeanische Eisendüngung (CDR-orientiert)

Unter Beteiligung des Alfred-Weber-Instituts für Polar- und Meeresforschung wurden im Januar 2009 von einem deutsch-indischen Forscherteam im Rahmen des LOHAFEX-Projekts zwanzig Tonnen Eisensulfat im Südatlantik ausgebracht. Ziel war es eine künstliche Planktonblüte zu erzeugen, welche prinzipiell die Kohlenstoffaufnahme des Meeres verstärken könnte (sog. *Uptake*) und dadurch deren Senkenkapazität erweitern würde. Im Zentrum dieses Feldexperiments standen Fragen nach der Rolle von Eisen als Klimaregulator und seiner Bedeutung für den Kohlenstoffkreislauf, den Auswirkungen der Ausbringung auf die Zusammensetzung und die Biodiversität des Planktons, sowie die mögliche Rolle von Algenblüten auf die Ernährung des Krill und die tatsächliche Sedimentation der erzeugten Algenblüte. Nach massiven Protesten von Umweltorganisationen wurde der Versuch zunächst zeitweise ausgesetzt und dann erst auf der Grundlage weiterer (nachholender) Gutachten über die Völkerrechtskompatibilität und ökologischen Effekte durch das BMBF (gegen den erklärten Standpunkt des BMU) fortgesetzt (BT-Drs. 16/12119). Der Befund des Experimentes dämpfte jedoch die Hoffnungen, durch Eisendüngung große Mengen von Kohlendioxid im Ozean binden und durch Sedimentierung am Meeresboden sequestrieren zu können.

Aerosol-Injektion in die mittlere Troposphäre (RM-orientiert)

Unter Beteiligung des Präsidentenberaters Yuriy Izrael unternahm eine Gruppe russischer Forscher ein Kurzzeit-Experiment zur Injektion von Aerosolen in die Troposphäre, das sie später als „Geoengineering-Test“ bezeichneten (Izrael et al. 2009). Die verwendeten Aerosole unterscheiden sich aber grundlegend von jenen, die für die Injektion in die Stratosphäre in Betracht gezogen werden, so dass die Mehrzahl der Atmosphärenforscher den Wert des Tests für die weitere CE-Forschung stark in Zweifel ziehen (Gosh und Blackstock 2011)

SPICE-Test zur Aerosolverbringung (RM-orientiert)

Forscher der Universitäten Bristol, Cambridge, Edinburgh und Oxford haben im Herbst 2011 im Rahmen des staatlich geförderten SPICE-Projektes (*Stratospheric Particle Injection for Climate Engineering*) zusammen mit dem privatwirtschaftlichen Unternehmen Marshall Aerospace ein Feldexperiment zur Aerosolverbringung begonnen. Ziel des Experiments ist es, Wasser durch einen ein Kilometer langen Schlauch in die Troposphäre zu bringen und dort mithilfe einer an einem Ballon angebrachten Düse auszubringen. So soll es möglich sein, die Machbarkeit einer Aerosolverbringung in größeren Höhen (etwa 20 km) unter Allwetterbedingungen zu testen (NERC 2011b). Nach einer Intervention zahlreicher Umweltgruppen unter Anleitung der ETC-Gruppe hat der zuständige britische Forschungsrat für Ingenieur- und Materialwissenschaften Anfang Oktober 2011 ein temporäres Testmoratorium verkündet, so dass weitere Konsultationen mit Stakeholdern erfolgen können (Fecht 2011).

nance and oversight of large-scale climate engineering research activities; (3) climate-engineering research should be conducted openly and cooperatively, preferably within a framework that has broad international support; (4) iterative, independent technical assessments of research progress will be required to inform the public and policymakers; and (5) public participation and consultation in research planning and oversight, assessments, and development of decision-making mechanisms and processes must be provided“ (ASOC 2010: 2).

Eine strukturierte internationale Diskussion von CE-Technologien findet zunehmend im Zuge der IPCC Sachstandsberichte statt (IPCC 2012). Im vierten Sachstandsbericht des IPCC wurden CE-Technologien noch relativ kurz behandelt. Im fünften Sachstandsbericht innerhalb des Beitrages der dritten Arbeitsgruppe werden verschiedene CE-Technologien und damit verbundene Möglichkeiten, Risiken und Herausforderungen genauer betrachtet (Clarke et al. 2014; Kolstad et al. 2014). Auch hier wird auf das Potential von RM Technologien eine schnelle Temperaturveränderung herbeizuführen eingegangen. Genauso wird aber betont, dass der Wissens- und Forschungsstand insbesondere über RM-Technologien und verbundenen Nebenwirkungen und Risiken noch sehr gering ist und daher noch schwer einzuschätzen ist, ob und wie diese Technologien möglicherweise für den Klimaschutz genutzt werden könnten. Auch im IPCC Sachstandsbericht wird betont, dass es sich bei der Erforschung von *Climate Engineering* und RM-Technologien im Besonderen um eine interdisziplinäre Herausforderung handelt, die frühzeitig ökonomische, politikwissenschaftliche, soziale, und ethische Fragestellungen aufgreift. Gleichzeitig ist mit der Entscheidung der *Conference of Parties 10* (COP 10) der CBD in Nagoya (Juni 2010) allerdings deutlich geworden, dass Nicht-Regierungsorganisationen zunehmend versuchen, die weitere Erforschung und damit die anschließende Verbreitung von CE-Technologien, insbesondere RM-Technologien, zu verhindern (Gosh und Blackstock 2011: 14). Übersicht 1 gibt einen Ausblick über ausgewählte, beschränkte Feldversuche für CE-Technologien.

Im Folgenden soll näher auf die Forschungslandschaften in wichtigen Staaten eingegangen werden. Die CE-Forschung entwickelte sich in den USA früher und rascher als in anderen westlichen Demokratien. Dies kann u.a. auf die Größe des US-amerikanischen Wissenschaftsmarktes, die frühen Versuche des US-Verteidigungsministeriums und landwirtschaftlicher Großbetriebe zur gezielten Wetterbeeinflussung zurückgeführt werden (Fleming 2010). Ergänzt werden diese Faktoren durch das hohe CO₂-Emissionspotential und die daraus erwachsenden (politischen) Verantwortlichkeiten sowie die Besonderheiten des amerikanischen politischen Prozesses. So sind bereits in den Jahren 2009/2010 durch das *Science and Technology Committee* des US-Repräsentantenhaus drei Expertenanhörungen durchgeführt worden, die jenseits parteipolitischer Unterschiede in der Frage des Klimaschutzes für eine rasche Involvierung des Parlaments geführt haben. Während ein nationales Forschungsprogramm derzeit – nicht zuletzt wegen der institutionellen Zerklüftung – außer Frage steht, ist es plausibel anzunehmen, dass *Climate Engineering* für jene Klimaskeptiker in der republikanischen Partei, die den THG-Effekt generell bestreiten, in der Zukunft eine attraktive Rückfallposition darstellen könnte. Im aktuellen Bericht zu RM-Technologien des National Research Council findet aber ausgewogenen Darstellung der gegenwärtigen Forschungsergebnisse statt die sich ebenfalls nicht nur eine rein naturwissenschaftliche Abhandlung beschränkt.

In Großbritannien dürfte eine traditionell starke umweltwissenschaftliche Forschungsgemeinde und kompetitive Forschungsförderungsmechanismen – insbesondere das sog. *Sandpit*-Verfahren – für den raschen Aufwuchs der britischen CE-Forschung verantwortlich sein. Auch wenn der Versuch einer frühen themenspezifischen Fachzeitschrift, dem *Geoengineering Quarterly*, (vorerst) gescheitert ist, hat die durch die frühe Involvierung der Royal Society, dem interdisziplinären Oxford-*Geoengineering*-Projekt, dem aktuellen SPICE-Testprojekt (siehe oben) sowie dem *Integrated Assessment of Geoengineering Proposals* (IAGP), einem sozialwissenschaftlichen Forschungsprojekt zur Technikvermittlung und Akzeptanz, international wichtige Impulse gesetzt und Forschungsfragen aufgeworfen.

In Deutschland ist die Erforschung wichtiger Grundlagenprinzipien für CE-Technologie, wie zum Beispiel das sogenannte *ocean upwelling* oder Eisendüngung in bestehenden Forschungszentren, hier des GEOMAR und des AWI, Bremerhaven, bereits fest etabliert. Der Schwerpunkt der Forschung dürfte auch in der Bundesrepublik dürfte im Bereich der erweiterten CDR-Mechanismen liegen, die neben natürlichen Senken auch künstliche Sequestrierungstechniken umfasst (Rösch et al. 2010). Von 2009 bis 2012 erforschte eine interdisziplinäre Forschergruppe am Heidelberger Marsilius-Kolleg die Chancen und Risiken von CDR- und RM-Technologien aus natur-, geistes-, und sozialwissenschaftli-

cher Perspektive. Daneben finden sich mehrere nationale und europäische Forschungsverbände, wie das IMPLICC (*Implications and risks of engineering solar radiation to limit climate change*), welches unter Leitung des Hamburger Max-Planck-Instituts für Meteorologie drei Klimasimulationen zur Modellierung von RM-Effekten getestet hat (Schmidt et al. 2010). In 2011 wurde ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderter interdisziplinärer Bericht zu den verschiedenen Aspekten des *Climate Engineering* am Kiel Earth Institut in Kiel veröffentlicht (Rickels et al. 2011). Der Bericht legt besonderes Augenmerk auf eine umfassende Darstellung der internationalen Debatte zu *Climate Engineering* um dann aufbauend auf dieser Debattenanalyse die verschiedenen Argumente zu untersuchen. In 2015 wurde ein von der Europäischen Kommission (7. EU-Rahmenforschungs-förderungsprogramm) geförderter transdisziplinärer Bericht von europäischen Partnern am *Institute for Advanced Sustainability Studies e.V.* in Potsdam veröffentlicht (Schaefer et al. 2015). Besonders hervorzuheben ist ein von der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) gefördertes Schwerpunktprogramm zu *Climate Engineering* (SPP 1689: *Climate Engineering – Risk, Challenges, Opportunities?*). Das Schwerpunktprogramm wird seit 2013 von Prof. Andreas Oshlies (Geomar) am Kiel Earth Institute in Kiel koordiniert und legt bereits wie die vorangegangenen Aktivitäten im Deutschland besonderes Gewicht auf die interdisziplinäre Erforschung von *Climate Engineering*. Im Rahmen des Schwerpunktprogramms werden ausschließlich Projekte gefördert, die zur Bewertung von *Climate Engineering* aber nicht zu der Entwicklung von Technologien beitragen.

6.2 Private Forschungsvorhaben

Eine Reihe von CE-Forschern und NGOs befürchten seit längerem die Finanzierung und/oder Aneignung von CE-Technologien durch wohlhabende Einzelpersonen (sog. *Greenfinger*-Szenarien Victor 2008: 333). Bislang haben sich diese Befürchtungen nicht eingestellt. Es ist bei näherer Betrachtung auch aus mehreren Gründen unwahrscheinlich, dass sich dies in absehbarer Zeit ändert: Zum einen unterliegen auch Privatpersonen nationaler Jurisdiktion, so dass aversive globale oder regionale Effekte möglicher größerer Tests oder Anwendungen dem Residenzstaat zugeschrieben werden könnten. Zum anderen werden private CE-Förderer im Vergleich zu potentiellen staatlichen Förderinstitutionen wesentlich stärker auf Reputationsgewinne und Verluste durch entsprechende Aktivitäten achten, denn der persönliche Nutzen einer CE-Aktivität entspringt in der Regel der (vermeintlich) philanthropischen Gesinnung, das eigene Vermögen zum Wohle der Menschheit (oder einiger ihrer Teile) einzusetzen. Bleibt dieser Reputationsgewinn aber aus – und dies ist bei der mangelnden Transparenz, Kontrolle und damit Legitimität privater Forschung und Anwendung deutlich erkennbar –, dann sinken die Anreize für ein starkes privates Engagement. Zieht man zudem das immanente Terminationsproblem für CE-Anwendungen in Betracht, dann können plausiblerweise nur staatlich Institutionen, wenn sie es denn wollten, nachhaltige und damit glaubwürdige CE-Programme auflegen.²⁴

Bei der überwiegenden Zahl von privat-finanzierten CE-Forschungsaktivitäten handelt es sich bislang um kleine und beschränkte Projekte, die bestehende staatlich-geförderte Aktivitäten komplementieren, aber nicht ersetzen oder in eine völlig neue Richtung lenken. So wird der von Bill Gates persönlich finanzierte *Fund for Innovative Climate and Energy Research* (FICER), der von den beiden anerkannten universitätsbasierten Forschern David Keith und Kenneth G. Caldeira administriert wird, dafür verwendet, die CO₂-Emission durch internationalen Handel, die Entwicklung von CO₂-negativen Technologien sowie die Klimamodellierung von Umwelteffekten bei der RM-

²⁴ In diesem Zusammenhang ist es bemerkenswert und bezeichnend, dass die private Spende von Bill Gates (bislang 4,6 Mill. US\$) für das FICER-Projekt auf der Projektwebsite ausdrücklich nicht der Bill & Melinda Gates Stiftung oder ihren Aktivitäten zugeordnet wird (FICER 2011).

Anwendung zu erforschen. Eine Finanzierung von Feldversuchen zur direkten Intervention in das Klimasystem schließt der FICER ausdrücklich aus.

Gleiches lässt sich prinzipiell für die vom *Environmental Defense Fund* unterstützte SRMGI feststellen, die gleichzeitig auch von staatlichen Stellen gefördert wird. Die SRMGI zielt auf die verbesserte Information und den Dialog mit einer breiteren Öffentlichkeit über die Chancen aber vor allem auch der Risiken von RM-Technologien. Diese bedürfen aus Sicht der Initiative dringend der Kontrolle und Regulierung (SRMGI 2011).

Dass ein neues Forschungsfeld auch wirtschaftliche Interessen wecken kann, lässt sich zwar nicht nur in kommerziellen Forschungsprojekten beobachten; aber dort sind sie besonders sichtbar. In der CE-Forschungsgemeinde wurde deshalb besonders kritisch die Beziehungen zwischen der Mitorganisatorin der Asilomar-Konferenz im Jahr 2010, Magret Leimen, und der Firma Climos ihres Sohnes, Dan Whaley diskutiert. Denn sowohl Climos, das sich auf eine kommerzielle Nutzung von Ozeandüngung in Verbindung mit dem Verkauf von CO₂-Zertifikaten spezialisiert hat, als auch der australische Bundesstaat Victoria, der stark von der Kohleförderung profitiert, haben starke wirtschaftliche Eigeninteressen, wenn es um die Regulierung von CE-Technologien geht (Kintisch 2009).

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Jonas Dovern, Sebastian Harnisch, Gernot Klepper, Andreas Oschlies, Ulrich Platt, Wilfried Rickels

Der vorliegende Diskussionsbeitrag beschäftigt sich mit der Frage, inwieweit gezielte Eingriffe in die Strahlungsbilanz der Erde, sogenanntes *Radiation Management* (RM), eine Rolle in der Kontrolle des Klimawandels spielen können. RM-Technologien erlauben keine ursächliche Rückführung des Strahlungsantriebs, der durch die Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre bestimmt wird und damit durch die anthropogenen Emissionen dieser Gase. Insofern sind RM-Maßnahmen mit der Forderung in Art. 2 der UNFCCC, dass die Stabilisierung atmosphärischer Treibhausgase auf einem Niveau, auf dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird, zumindest dem Wortsinn nach nicht vereinbar. Vielmehr können sie nur die Temperatur der Erde beeinflussen, indem sie die Strahlungsbilanz der Erde manipulieren. Sie unterscheiden sich damit deutlich von den anderen Technologien, die unter dem Begriff *Climate Engineering* zusammengefasst werden, dem *Carbon Dioxide Removal* (CDR). Der Einsatz von CDR-Technologien erlaubt die ursächliche Rückführung des anthropogen verursachten Strahlungsantriebs dadurch, dass sie die Konzentration von Treibhausgasen absenken. Allerdings erreichen sie einzeln oder im Verbund (bislang) keine schnelle Beeinflussung der Temperatur. Entsprechend bieten RM-Technologien die Chance schnell die globale Temperatur abzusenken und unterscheiden sich damit deutlich von den anderen Optionen des Klimaschutzes.

Die Strahlungsbilanz der Erde und die globale Durchschnittstemperatur der Erde werden im Prinzip von drei Kerngrößen bestimmt, der Solarkonstante, der Albedo und der Treibhausgaskonzentration. Die auf die Erde eintreffende Energie wird durch die einfallende Sonneneinstrahlung und damit durch die Solarkonstante bestimmt. Ein Teil dieser kurzwelligen Strahlung wird durch Aerosole, Wolken und die Landoberfläche wieder in das All reflektiert. Die Summe der Reflektion wird als die Albedo bezeichnet. Die verbleibende kurzwellige Netto-Einstrahlung wird in Wärme und diese wiederum in entsprechend langwellige Wärmeabstrahlung umgewandelt, die dann im thermischen Gleichgewicht der kurzwelligen Netto-Einstrahlung entspricht. Für die Bestimmung der Temperatur auf der Erde ist der Anteil der Wärmeabstrahlung, der in der Atmosphäre zurückgehalten wird, von entscheidender Bedeutung. Ohne diese Rückhaltung durch atmosphärische Spurengase (Treibhausgase) würde sich

ein thermisches Gleichgewicht mit einer durchschnittlichen Bodentemperatur von etwa minus 18° C ergeben, durch die Rückhaltung ergibt sich ein thermisches Gleichgewicht mit einer durchschnittlichen Bodentemperatur von etwa 15° C.

Durch menschliche Einflüsse verändert sich sowohl die Albedo der Erde als auch die Rückhaltung der langwelligen Wärmeabstrahlung. Landnutzungsänderungen und Aerosolemissionen haben die Albedo der Erde erhöht und damit einen kühlenden Effekt, da sie die Netto-Einstrahlung verringern. Gleichzeitig wird durch die anthropogen verursachten Treibhausgasemissionen ein größerer Teil der langwelligen Wärmeabstrahlung zurückgehalten mit einem wärmenden Effekt. Insgesamt dominiert aber sehr deutlich der Treibhauseffekt, so dass der Nettostrahlungsantrieb von Modellrechnungen auf aktuell 1,6 W/m² geschätzt (mit einem Unsicherheitsbereich von 0,6 bis 2,4 W/m²) wird. Ohne den negativen Effekt der erhöhten Albedo auf die Strahlungsbilanz, würde sich ein geschätzter Strahlungsantrieb von etwa 2,6 W/m² ergeben, so dass ein Teil des Strahlungsantriebs bereits durch ein sozusagen nichtintendiertes *Radiation Management* kompensiert wird.

Die Bestimmung der Temperaturreaktion auf den positiven Netto-Strahlungsantrieb lässt sich aber nur als Bandbreite abschätzen, da die Klimasensitivität (Temperaturreaktion) durch verschiedene Rückkopplungsmechanismen bestimmt wird. Diese Rückkopplungen (insbesondere die Zunahme des natürlichen Treibhausgases Wasserdampf und die Abnahme des Meereises) bestimmen mehr als die Hälfte des berechneten Temperaturanstiegs. Allerdings ist ihr Verständnis und entsprechend ihre Modellierung mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Basierend auf verschiedenen Beobachtungen und Modellen lässt sich eine Schätzung für diese Klimasensitivität ableiten, die bei einer Verdopplung der vorindustriellen CO₂-Konzentrationen wahrscheinlich einem Temperaturanstieg zwischen 2° und 4,5° C entspricht (Knutti und Hegerl 2008). Es ist nicht möglich, noch höhere Werte prinzipiell auszuschließen. In dem vierten Sachstandsbericht des IPCC wird eine gegenwärtige Erwärmung durch die bis 2005 emittierten Treibhausgase von etwa 0,2° C pro Jahrzehnt angegeben (Forster et al. 2007). Die bis zum Ende des 20. Jahrhunderts projizierte Erwärmung hängt dabei stark von der zukünftigen Entwicklung der anthropogenen Emissionen ab und wird wahrscheinlich im Bereich von 1,1° bis 6,4° C liegen. Neben der Entwicklung der anthropogenen Treibhausgasemissionen ist auch die Entwicklung anthropogener Aerosolemissionen zu berücksichtigen, die derzeit einen Teil der Erwärmung kompensieren. Hier ist aber mit deutlich abnehmenden Emissionen zu rechnen, da diese Emissionen teilweise mit direkten Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit verbunden sind und sich durch technologische Anpassung teilweise sehr einfach kontrollieren lassen. Entsprechend wird dieser bislang kühlende Effekt reduziert, so dass die durch Treibhausgasemissionen verursachte Erwärmung in der Zukunft wahrscheinlich zunehmen wird.

Bei einer weiteren Zunahme der Emissionen von Treibhausgasen beeinflussen vor allem die sogenannten Kipppunkte im Klimasystem das zukünftige Klima. Ein Kipppunkt ist eine (angenommene) kritische Schwelle, jenseits welcher der zukünftige Zustand des Klimasystems bereits durch eine kleine Änderung des Strahlungsantriebs qualitativ verändert werden kann (Lenton et al. 2008; Allison et al. 2009). Die Überschreitung eines solchen Kipppunktes stellt ein Ereignis dar, das eine sehr geringe Eintrittswahrscheinlichkeit besitzt aber sehr starke Auswirkungen auf das Klima hat. So würden das Schmelzen oder die Instabilität der Eisschilde in Grönland oder der Antarktis enorme Auswirkungen auf den Meeresspiegelanstieg. Ebenso würden Veränderungen im westafrikanischen Monsun die Wasserverfügbarkeit in der Sahel-Zone beeinflussen. RM-Technologien werden als mögliche Reaktion auf einen bevorstehenden oder einsetzenden abrupten Klimawandel diskutiert. Dabei ergibt sich allerdings das Problem, dass diese Kipppunkte nur sehr schwer modelliert bzw. abgeschätzt werden können.

Durch RM-Technologien lassen sich alle drei Kerngrößen des Klimasystems beeinflussen. Durch Modifikationen im Weltraum wie die Ausbringung von Reflektoren lässt sich die solare Einstrahlung auf die Erde reduzieren. Die Nettoeinstrahlung kann reduziert werden, indem die bereits stattfindende Beeinflussung der Albedo gezielt verstärkt wird. Grundsätzlich lässt sich die Albedo durch Modi-

fikationen an der Erdoberfläche, an Wolken die überwiegend kurzwellige Sonnenstrahlung reflektieren oder durch Injektion von Aerosolen in Stratosphäre erhöhen. Diese Technologien mit Einfluss auf die Brutto- oder Nettoeinstrahlung werden auch als *Solar Radiation Management* Technologien bezeichnet. Da sich die Literatur vor allem auf diese Technologien konzentriert, wird anstelle von *Radiation Management* entsprechend auch der konkretere Begriff des *Solar Radiation Managements* verwendet. Dabei wird aber nicht berücksichtigt, dass sich auch die langwellige Wärmeabstrahlung nicht nur indirekt über die Veränderung der atmosphärischen CO₂-Konzentration, sondern auch direkt beeinflusst werden kann. Durch Modifikation sehr hoher Eiswolken kann ebenfalls die langwellige Wärmeabstrahlung erhöht werden, ohne den Strahlungsantrieb ursächlich zu reduzieren. Diese Technologien kann man in Abgrenzung zu den SRM-Technologien als *Thermal Radiation Management* (TRM)-Technologien bezeichnen, so dass der weitere Obergriffe *Radiation Management* beide Technologiegruppen vereint.

Grundsätzlich besteht bei den RM-Technologien aber das Problem, dass der treibhausgasinduzierte langwellige Strahlungsantrieb durch eine Veränderung der kurzwelligen Strahlung kompensiert wird. Zwar zielen TRM-Technologien überwiegend auf eine Veränderung der langwelligen Wärmeabstrahlung, allerdings wird dabei auch die kurzwellige Strahlung beeinflusst. Als problematisch bei diesen Maßnahmen erweist sich, dass der langwellige und kurzwellige Strahlungsfluss geographisch und zeitlich unterschiedlich verteilt ist. Während der LW-Strahlungsantrieb mit einem Maximum in den Subtropen über das Jahr weitgehend konstant und in allen Breiten vorhanden ist, variiert der SW-Strahlungsantrieb räumlich und zeitlich mit den Jahreszeiten wesentlich stärker. Trotz dieses Ungleichgewichts, erlaubt der Einsatz von RM-Technologien wahrscheinlich eine vergleichsweise gleichmäßig über die Erde verteilte Absenkung der Temperatur. Dies wird durch den schnellen und effektiven Energietransport in der Atmosphäre ermöglicht, der sich dem durch RM geänderten Strahlungsantrieb anpasst. Allerdings ändert sich dadurch auch das Muster der atmosphärischen Zirkulation und damit der atmosphärische Teil des Wasserkreislaufs (Feichter und Leisner 2009). Als Folge werden andere Klimavariablen wie der Niederschlag aber auch die Seeisbedeckung unterschiedlich stark beeinflusst. Derzeit wird davon ausgegangen, dass es bei einer Reduzierung der Strahlungsbilanz durch RM zu einer Abnahme der globalen Niederschlagsmenge kommt, während es ohne RM Intervention als Folge der zunehmenden Treibhausgasemissionen zu einer Zunahme der globalen Niederschlagsmenge kommen würde. Allerdings verschieben sich die Niederschlagsmuster regional und das Erdsystemverständnis ist noch zu begrenzt, als dass eine Vorhersage der regionalen Veränderungen möglich wäre.

Neben dem grundsätzlichen Problem der inhomogenen Kompensation verschiedener Klimavariablen, ergibt sich das zusätzliche Problem, dass anderen Folgen der erhöhten atmosphärischen CO₂-Konzentration nicht reduziert werden. Zum einen würde bei einem Abbremsen des Temperaturanstiegs durch RM-Technologien bei gleichzeitigem Anstieg der atmosphärischer CO₂-Konzentrationen der positive Düngungseffekt weiterhin bestehen, so dass die beschleunigte Aufnahme von Kohlenstoff durch terrestrische Ökosysteme nicht mehr durch einen temperaturbedingten Anstieg der Respiration kompensiert werden würde. Ein ähnlicher Effekt ergibt sich bei der ozeanischen Senke durch die begünstigte CO₂-Aufnahme der Algen. Entsprechend ist es möglich, dass die biologische Aufnahme von Treibhausgasen aus der Atmosphäre unter RM-Maßnahmen schneller ablaufen kann als es ohne die RM-Intervention der Fall wäre. Zum anderen gibt es aber auch chemische Verschiebungen in den Kohlenstoffkreislauf der Erde. Die zunehmende Lösung von CO₂ im Meerwasser führt zu einer Abnahme des pH-Werts. Bereits hat der pH-Wert im Ozean als Folge der anthropogenen CO₂-Emissionen bereits um 0,1 Einheiten abgenommen. Wie sich die marine Fauna auf die zukünftig prognostizierte weitere Absenkung des pH-Werts anpassen kann, ist noch völlig unklar. Darüber hinaus ergeben sich durch die beschleunigte Verwitterung an Land bereits messbare Veränderungen in der Verwitterung historischer Bauwerke.

Umgekehrt ist aber ebenfalls zu beachten, dass bei CDR-Technologien durch Veränderung der Erdalbedo ebenfalls Einfluss auf die Strahlungsbilanz der Erde genommen wird. Beispielsweise kann bei einer Umwandlung von Wald- in stärker reflektierende Grasflächen die terrestrische CO₂-Senke verringert werden, insgesamt aber ein kühlender Einfluss auf das Klima erreicht werden. So wird erwartet, dass die Aufforstung tropischer Wälder als eher kühlend wirkt während die Aufforstung borealer Wälder als tendenziell wärmend wirken könnte.

Aus diesen grundsätzlichen Nebenwirkungen, Grenzen und Wechselwirkungen mit dem globalen Kohlenstoffkreislauf ergibt sich, dass die Effektivität der einzelnen RM-Technologien nicht eindeutig bewerten lässt. So muss entschieden werden, ob die Effektivität allein anhand des globalen Temperaturanstiegs gemessen werden soll, oder ob auch andere Variablen wie die atmosphärische CO₂-Konzentration, der Versauerungsgrad des Ozeans oder Niederschlagsmengen und -volatilität berücksichtigt werden sollen. Hinzu kommen die regional unterschiedlichen Wirkungen, die gewichtet werden müssten. Legt man aber als Kriterium nur die schnelle Beeinflussung der globalen Durchschnittstemperatur zu Grunde, kann RM sehr effektiv sein. Solch eine schnelle Reaktion könnte notwendig sein, wenn die Überschreitung kritischer Kippunkte droht (Caldeira und Wood 2008; Irvine et al. 2009). Allerdings würde dies auch bedeuten, dass die RM-Maßnahmen unter Umständen über sehr lange Zeiträume (mehrere 100 bis 1 000 Jahre) fortgeführt werden müssten, weil sich die Treibhausgaskonzentration auf natürlichem Wege nur sehr langsam reduzieren würde (vgl. beispielsweise Brovkin et al. 2009).

Zu den derzeit diskutierten RM-Technologien für eine solche schnelle Beeinflussung der globalen Durchschnittstemperatur gehören die Ausbringung von Reflektoren im Weltall, die Injektion von Aerosolen in der Stratosphäre, die Modifikation von Zirruswolken und marinen Schichtwolken und die Modifikation der Erdoberflächenalbedo. Bei den Reflektoren im Weltall bestehen zwar theoretische Konzepte für den Einsatz dieser Technologie; die technische Umsetzbarkeit ist aber noch nicht gegeben und wird auch nicht in den nächsten Jahrzehnten erwartet. Zusätzlich erscheinen die Kosten für einen Einsatz prohibitiv hoch. Die Injektion von Aerosolen in die Stratosphäre verspricht eine große Effektivität in Bezug auf die Kontrolle der Temperatur. Außerdem ist bei dieser Technologie die Erforschung bereits deutlich weiter vorangeschritten und der Wirkungsmechanismus ist durch die Beobachtung der Wirkung von Vulkanausbrüchen bestätigt. Zwar wurden bei dieser Technologie die Schätzungen der Betriebskosten in letzter Zeit deutlich nach oben korrigiert, trotzdem sind die reinen Betriebskosten anscheinend deutlich niedriger als vergleichbare Maßnahmen der Emissionskontrolle.

Die Modifikation von Zirruswolken hat ein geringeres Potential zur Beeinflussung der globalen Temperatur als die Modifikation mariner Schichtwolken oder die Modifikation der Stratosphäre. Die zugrundeliegenden Wirkungsmechanismen sind noch kaum verstanden. Diese Maßnahme ist gemessen an den Betriebskosten vergleichsweise günstig. Die Modifikation mariner Schichtwolken könnte eine effektive und kostengünstige RM-Maßnahme darstellen, wenn sich deren grundsätzliche Wirksamkeit bestätigen sollte. Einzelne Studien erwarten einen relativ starken Einfluss dieser Maßnahme auf den hydrologischen Kreislauf. Die derzeit in der Literatur diskutierte Umsetzung (automatische Flettner-Schiffe) erscheint noch unausgereift, und wichtige technologische Komponenten müssen noch entwickelt werden. Ungeachtet der zu erwartenden erheblichen Kostensteigerungen bleiben die Betriebskosten vergleichsweise gering. Die Modifikation der Erdoberfläche ist in ihrer Effektivität durch die Flächenverfügbarkeit begrenzt und stellt daher keine effektive Maßnahme im globalen Maßstab dar. Sie kann allerdings zur Optimierung des Stadtklimas beitragen und darüber hinaus eine marginale Ergänzung zur Emissionskontrolle liefern.

Insgesamt erscheinen nur die Injektion von Aerosolen in die Stratosphäre sowie die Modifikation von Zirruswolken und marinen Schichtwolken im Hinblick auf Effektivität und die damit verbundenen Kosten uni- oder minilateral möglicherweise durchführbar. Dabei bleiben aber zahlreiche Kostenaspekte unberücksichtigt, die vor allem in Hinblick auf die langfristige Realisierung solcher Maßnahmen diese Aussage in Frage stellen. Dazu kommen noch Preiseffekte, die bei diesen Technologien

wahrscheinlich die Skaleneffekte dominieren werden, so dass auch auf kurzen Zeiträumen die Realisierung dieser Technologien deutlich teurer wird.

In dieser Abschätzung sind die gesamtwirtschaftlichen Kosten noch nicht enthalten. Diese sind derzeit noch nicht abschätzbar, da zahlreiche Nebeneffekte weder verstanden noch in entsprechenden Analysen monetär bewertet wurden. Grundsätzlich bergen alle SRM-Maßnahmen aufgrund von nicht intendierten regionalen Nebenwirkungen die Gefahr erheblicher gesamtwirtschaftliche Kosten.

Allerdings stellen die hier diskutierten Technologien notwendigerweise nur eine Momentaufnahme in der aktuellen Debatte dar. Es gibt ständig neue Vorschläge, Studien und Ideen, so dass bereits getroffene Einschätzungen angepasst bzw. sogar revidiert werden müssen. Diese Entwicklung zeigt, dass bei einem möglichen RM-Einsatz in der Zukunft, wahrscheinlich ganz andere Technologien als die heute diskutierten zur Debatte stehen. Die grundsätzlichen Probleme, über regional unterschiedliche Nebenwirkungen sowie wirtschaftliche, politische und soziale Konflikte werden aber auch mit diesen Technologien verbunden sein.

Neben der Vorläufigkeit der derzeitigen möglichen Technologiebewertung, besteht ein weiteres grundsätzliches Problem bei der Beurteilung der Effektivität von RM-Technologien. Neben der bereits oben angesprochenen Schwierigkeit, ob die Effektivität allein an der globalen Durchschnittstemperatur gemessen werden soll, ergibt sich auch das Problem, dass die beobachtete Veränderung der Temperatur einer RM-Technologie kausal zurechenbar sein muss. Die bisherige Klimaforschung zeigt aber deutlich, dass Veränderungen der Temperatur nur über das Messen langer Zeitreihen aus dem Grundrauschen der Messgrößen des Erdsystems herauszufiltern sind. So zeigen Satellitenmessungen auf Jahresbasis eine globale natürliche Variabilität im kurzwelligen Strahlungsfluss von $0,3 \text{ W/m}^2$ (Hansen et al. 2005). Um davon eine CE-Wirkung in dieser Größenordnung zu unterscheiden, müsste mit den gegenwärtigen Satellitensystemen ca. 10–15 Jahre gemessen werden (Loeb et al. 2007). Und selbst dann können Effekte auf die globale Temperatur nur mit statistischen Methoden identifiziert werden. Auch numerische Simulationen können keine exakten Berechnungen der Wirkung von RM-Technologien bieten, da Modelle nicht alle relevanten (Aerosol-, Wolken- und Strahlungs-)Prozesse auflösen können und die parametrische Darstellung dieser Zusammenhänge mit Unsicherheiten verbunden ist. Eine bislang noch wenig diskutierte Möglichkeit zur Verbesserung der Ergebnisse von Feldtests bestünde darin, ein RM-Signal regelmäßig zu wiederholen umso in verschiedenen Variablen eine Variabilität zu erzeugen, die sich auch bei einem insgesamt geringerem absolutem Signal besser aus der Zeitreihe natürlicher Variabilität herauslesen lassen würde. Inwieweit ein solcher Test aber tatsächlich eine bessere Identifizierung des RM-Einsatzes bzw. -Erfolges zulassen würde, ist noch unklar.

Noch schwieriger als die Messung der Effektivität stellt sich die Modellierung, Abschätzung und Bewertung der möglichen Nebenfolgen dar. Die Bandbreiten möglicher Nebenfolgen sind mit dem heutigen Stand der Erdsystemforschung nur begrenzt zu quantifizieren. Auch wenn ein Teil dieser Unsicherheit durch weitere Erforschung des Erdsystems theoretisch reduziert oder gar beseitigt werden könnte, gibt es eine inhärente, nicht zu reduzierende interne Variabilität des Erdsystems, die gerade auf regionaler Ebene Aussagen über die Wirkung und Nebenwirkungen von RM-Nebenfolgen schwierig macht. Derzeit können solche regionalen Effekte kaum abgeschätzt werden. Vor dem Hintergrund der natürlichen Klimavariabilität wäre auch ein statistisch abgesicherter Nachweis solcher Effekte mit großen Schwierigkeiten verbunden.

Berücksichtigt man diese naturwissenschaftlichen Unsicherheiten im Hinblick auf die Effektivität und Nebenwirkungen von RM-Technologien, so ist derzeit kaum eine verlässliche Abschätzung der Effizienz der Maßnahmen im Vergleich zu Alternativen des Klimaschutzes möglich. Dabei ist nicht nur das Ausmaß der Wirkung kaum in einem angemessenen Zeitraum quantifizierbar, sondern auch die Kosten der Maßnahmen können aus ähnlichen Gründen nicht identifiziert werden. Insbesondere sind neben den Kosten der RM-Maßnahmen selbst die nicht intendierten Nebeneffekte unbekannt,

weil diese ebenso wenig aus der Variabilität des regionalen Klimas herausgefiltert werden können wie die globalen Effekte.

Die vorliegenden Kostenschätzungen beschränken sich somit überwiegend auf die betriebswirtschaftlichen Kosten, wobei die nötigen Aufwendungen für Forschung und Entwicklung sowie für die Bereitstellungen der Technologien kaum oder wenig detailliert dargestellt sind. Zusätzlich sind Preis- und Skaleneffekte nicht berücksichtigt. Viele Schätzungen legen die heutigen Preise für Verbrauchs- und Investitionsgüter zu Grunde. Wenn der Einsatz dieser Technologien tatsächlich so ausgeweitet wird, dass sie die Temperatur merklich absenken, dann ist mit erheblichen Preiseffekten auf vor- und nachgelagerten Märkten zu rechnen, so dass die vorliegenden Schätzungen die tatsächlichen Kosten zu niedrig angesetzt sind. Trotz dieser Preiseffekte, kann man davon ausgehen, dass die Betriebskosten verschiedener RM-Technologien in einer Größenordnung liegen würden, der es erlaubt, dass einzelne Technologien von einem einzelnen Staaten bzw. einer kleinen Gruppe von Staaten realisiert wird, insbesondere wenn die Maßnahmen noch nicht im weltweiten Maßstab umgesetzt werden.

Diese Aussage berücksichtigt allerdings noch nicht die gesamtwirtschaftlichen und Wohlfahrtsaspekte. Auch wenn RM-Technologien kurzfristig nicht sehr hohe Betriebskosten aufweisen, müssen diese Technologien möglicherweise über viele hundert Jahre durchgeführt werden, wenn der treibhausgasinduzierte Strahlungsantrieb ungebremst weiter wächst und nicht durch flankierende Maßnahmen kontrolliert wird. Die damit einhergehenden Kosten im Vergleich zur Kontrolle von Emissionen sind bisher nicht untersucht worden. Entsprechend lässt sich die Annahme der vermeintlich günstigeren Betriebskosten von RM-Technologien gegenüber der Emissionskontrolle empirisch noch nicht bestätigen.

Bei allen Unsicherheiten über die Betriebskosten der RM-Technologien kann man davon ausgehen, dass die gesamtwirtschaftlichen Kosten der verschiedenen RM-Technologien vor allem durch ihre externen Kosten bestimmt werden. Diese Technologien haben ein erhebliches Potential für regionale Nebenwirkungen durch die unterschiedliche Beeinflussung der verschiedenen Klimavariablen. Schätzungen über die externen Kosten liegen aber ebenfalls noch nicht vor. Gemessen an den naturwissenschaftlichen Unsicherheiten bei dem gleichzeitig großen Hebel der RM-Technologien für globale Veränderungen kann man aber davon ausgehen, dass diese Technologien das Risiko sehr hoher gesamtwirtschaftlicher Kosten mit sich bringen.

Entsprechend haben diese Technologien auch ein erhebliches wirtschaftliches, politisches und soziales Konfliktpotential. Dieses Potential ergibt sich neben der unterschiedlichen regionalen Verteilung der Effekte dieser Technologien zusätzlich aus der Verdrängung der herkömmlichen Emissionskontrolle.

Die meisten bisher publizierten ökonomischen Modellanalysen zeigen, dass mit dem Einsatz der RM-Technologien immer ein Rückgang bei der Emissionskontrolle verbunden ist. Allerdings ergeben sich daraus Risiken, weil die RM-Maßnahmen nur symptomatisch wirken, nicht aber die atmosphärische CO₂-Konzentration senken. Wird aber aus irgendeinem Grund in der Zukunft der RM-Einsatz unterbrochen, so kann ein sprunghafter Klimawandel auftreten mit Auswirkungen, die sogar die Wohlfahrtsverluste aus einem Szenario ohne jegliche Intervention übersteigen können. Grundsätzlich besteht noch erheblicher Forschungsbedarf hinsichtlich der Untersuchung einer angemessenen Kombination von RM-Maßnahmen und der Emissionskontrolle.

Neben diesen noch weitgehend offenen Fragen im Hinblick auf die intertemporalen Aspekte des Einsatzes von RM-Technologien sind auch deren Konsequenzen auf verschiedene Regionen der Erde noch wenig bekannt und auch die Wirkung auf andere Aspekte des Klimawandels neben dem Anstieg der Durchschnittstemperatur der Erde sind kaum erforscht. Es ist allerdings offensichtlich, dass RM-Maßnahmen regional unterschiedliche Auswirkungen auf die verschiedenen Dimensionen des Klimawandels haben werden. Die Bewertung bzw. die Optimierung eines globalen RM-Einsatzes sollte deshalb nicht nur anhand der globalen Durchschnittstemperatur geschehen, sondern muss weitere

Klimavariablen (Niederschläge, Eisbedeckung, usw.) in ihrer lokalen Ausprägung berücksichtigen. Hier sind noch beträchtliche Fortschritte in der Grundlagenforschung nötig, bevor zu diesen komplexen Zusammenhängen belastbare Aussagen gemacht werden können.

Aufgrund der unterschiedlichen regionalen Auswirkungen eines RM-Einsatzes ergeben sich je nach Technologie, Anwendungsart und Dauer politische Konfliktpotentiale, wenn die Entscheidungsfindung auf dezentraler Ebene stattfindet. Diese Konfliktpotentiale liegen zum einen darin begründet, dass davon auszugehen ist, dass einige der RM-Technologien gemessen an den reinen Betriebskosten von einem großen Staat bzw. einer Gruppe von Staaten uni- bzw. minilateral eingesetzt werden können. Wird die Erdmitteltemperatur durch einen Staat zur Befriedigung aller reguliert, so könnten die Bemühungen zur Emissionskontrolle auch in an dem Einsatz nicht beteiligten Staaten stark nachlassen; zum anderen, und dies ist nach bisherigen Erkenntnissen der wahrscheinlichere Fall, Staaten, die negativ vom RM betroffen sind, zu Gegenmaßnahmen verleitet werden. In jedem Fall ergeben sich durch die Verfügbarkeit von RM-Technologien gerade im Hinblick auf die regional unterschiedlichen Auswirkungen eines Einsatzes neue Verhandlungsoptionen und -positionen für die Ausarbeitung internationaler Klimaverträge ergeben können.

Aufgrund der Probleme bei der regionalen Verteilung der Auswirkungen und der unterschiedlichen Bewertung und Wahrnehmung von Risiken kann die Diskussion, Erforschung und gegebenenfalls der Einsatz von RM-Technologien zu starken öffentlichen und medialen Reaktionen führen. Dabei wird der öffentliche Diskurs dadurch erschwert, dass die Öffentlichkeit noch wenig über das Thema *Climate Engineering* informiert ist, ein Interesse an diesem Thema entsteht, aber gleichzeitig die Forschung noch wenige belastbare Aussagen zu *Radiation Management* machen kann. Trotzdem, bzw. gerade deswegen, zeigt sich in Befragungen zumeist eine mehrheitlich tendenziell skeptische Haltung gegenüber *Climate Engineering*, wobei extreme Positionen (für oder gegen *Climate Engineering*) stark ausgeprägt sind. Dieses Potential zur starken Polarisierung in der Bevölkerung wird durch öffentliche Akteure wie NGOs und Interessengruppen, die sehr kontroversen Positionen beziehen, zusätzlich verstärkt.

Die Entwicklung der Diskussion über *Climate Engineering* und die Erforschung der verschiedenen Technologien bzw. die damit verbundenen Probleme geht aber zurück bis in die 60ziger Jahre des vorherigen Jahrhunderts. Die Entwicklung seit dem lässt sich in zwei bzw. drei Hauptphasen einteilen. In der Mitte der 1960er Jahre begann die erste Phase, in der bis Mitte der 2000er Jahre hauptsächlich die Grundlagen des *Climate Engineering* von einzelnen Natur- und Wirtschaftswissenschaftler erforscht wurde. In der zweiten Phase, die von 2006 bis zum Jahr 2011 reicht, ist das Forschungsfeld deutlich expandiert: Einzelne Forscher haben sich zu Forschungsgruppen und transnationalen Verbänden zusammengeschlossen, die aus mehreren naturwissenschaftlichen, zunehmend aber auch geistes- und sozialwissenschaftlichen Disziplinen bestehen. In dieser Phase wurde auch die explizite Förderung von Forschung zum *Climate Engineering* – sowohl von privaten Geldgebern als auch von öffentlicher Seite – deutlich ausgeweitet. Mittlerweile mehren sich die Anzeichen, dass die Diskussion über *Climate Engineering* und die damit verbundene Forschung in eine dritte Phase eintritt, die vor allem durch eine wachsende Politisierung des Themas aber auch durch eine zunehmend systematischere Forschung gekennzeichnet ist.

Derzeit bestehen noch erhebliche Unsicherheiten über viele Aspekte des Radiation Managements. Weder die Potentiale noch die Nebenwirkungen der Technologien können zufriedenstellend bestimmt werden. Darüber hinaus stellen die derzeit diskutierten Technologien nur eine Momentaufnahme für möglicherweise zur Verfügung stehende Technologien für einen Eingriff in die Strahlungsbilanz dar. Aufgrund der Komplexität des Erdsystems, das noch längst nicht im Detail verstanden ist, geschweige denn modelliert werden kann, können aber die verschiedenen Nebenfolgen, die sich durch einen globalen Eingriff in die Strahlungsbilanz ergeben, nicht präzise oder abschließend vorhergesagt werden. Entsprechend schwierig gestaltet es sich, gesamtwirtschaftliche Kostenschätzungen oder Abschätzungen über das politische und gesellschaftliche Konfliktpotential abzuleiten. Wie sich die Erderwärmung

in den nächsten Jahrzehnten bereits durch die aktuell erhöhte Treibhausgaskonzentration entwickeln wird, ist dabei noch sehr ungewiss, weil der Temperaturanstieg von Rückkopplungseffekten im Erdsystem abhängt, die derzeit nur unzureichend verstanden sind. Aufgrund dieser Bandbreite an Unsicherheiten besteht noch ein erheblicher Forschungsbedarf, wobei zu berücksichtigen ist, dass bereits die Forschungsentscheidung weitreichende Konsequenzen im Hinblick auf die Emissionskontrolle, zukünftigen Einsatz und auch politische sowie gesellschaftliche Konflikte haben kann.

Literaturverzeichnis

- Akbari, H., S. Menon und A. Rosenfeld (2009). Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO₂. *Climatic Change* 95: 275–86.
- Albrecht, B. (1989). Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness. *Science* 245: 1227–30.
- Allison, I., N.L. Bindoff, R.A. Bindshadler, P.M. Cox, N. de Noblet, M.H. England, J.E. Francis, N. Gruber, A. M. Haywood, D.J. Karoly, G. Kaser, C. Le Quéré, T.M. Lenton, M.E. Mann, B.I. McNeil, A.J. Pitman, S. Rahmstorf, E. Rignot, H.J. Schellnhuber, S.H. Schneider, S.C. Sherwood, R.C.J. Somerville, K. Steffen, E.J. Steig, M. Visbeck, und A.J. Weaver (2009). The Copenhagen Diagnosis, 2009: Updating the world on the latest climate science. The University of New South Wales Climate Change Research Centre (CCRC), Sydney, Australia.
- Angel, R. (2006). Feasibility of cooling the Earth with a cloud of small spacecraft near the Lagrange point (L1). *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103(46): 17184–9.
- Archer, D., und V. Brovkin (2008). The Millennial Atmospheric Lifetime of Anthropogenic CO₂. *Climatic Change* 90: 283–97.
- ASOC (2010). The Asilomar Conference Recommendations on Principles for research into climate engineering techniques. Climate Institute, Washington, D.C. Online: <http://www.climate.org/PDF/AsilomarConferenceReport.pdf> [abgerufen am: 27.10.2011].
- Bala, G., K. Caldeira, R. Nemani, L. Cao, G. Ban-Weiss und H.J. Shin (2010). Albedo enhancement of marine clouds to counteract global warming: impacts on the hydrological cycle. *Climate Dynamics* 6: DOI 10.1007/s00382-010-0868-1.
- Ban-Weiss, G., und K. Caldeira (2010). Geoengineering as an optimization problem. *Environmental Research Letters* 5(3): 9.
- Barrett, S. (2008). The incredible economics of geoengineering. *Environmental and Resource Economics* 39: 45–54.
- Barrett, S. (2009). Geoengineering's role in climate change policy. John Hopkins University School of Advanced International Studies. Online: <http://www.aei.org/docLib/Barrett%20Draft.pdf> [abgerufen am: 15.03.2011].
- Barrett, S. (2010). Geoengineering's Governance: Written Statement: Prepared for the US House of Representatives Committee on Science and Technology Hearing on "Geoengineering III: Domestic and International Research Governance". Online: http://democrats.science.house.gov/Media/file/Commdocs/hearings/2010/Full/18mar/Barrett_Testimony.pdf [abgerufen am: 31.03.2011]. Quelle inzwischen verschoben auf: http://archives.democrats.science.house.gov/Media/file/Commdocs/hearings/2010/Full/18mar/Barrett_Testimony.pdf.
- Barrett, S. (2014). Solar Geoengineering's Brave New World: Thoughts on the Governance of an Unprecedented Technology. *Review of Environmental Economics and Policy* 8 (2): 249–269.
- Bathiany, S., M. Claussen, V. Brovkin, T. Raddatz und V. Gayler (2010). Combined biogeophysical and biogeochemical effects of large-scale forest cover changes in the MPI earth system model. *Biogeosciences* 7(5): 1383–99.

- Betz, G., und S. Cacean (2011). *Climate Engineering: Ethische Aspekte*: Erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF). Karlsruhe Institut für Technologie, Berlin.
- Bickel, J., und S. Agrawal (2013). Reexamining the economics of aerosol geoengineering. *Climatic Change* 119(3): 993–1006.
- Blackstock, J.J., D.S. Battisti, K. Caldeira, D.M. Eardley, J.I. Katz, D.W. Keith, A.A.N. Patrinos, D.P. Schrag, R.H. Socolow und S.E. Koonin (2009). Climate engineering responses to climate emergencies. *Novim*. Online: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0907/0907.5140.pdf> [abgerufen am: 17.11.2011].
- Bollmann, M., T. Bosch, F. Colijn, R. Ebinghaus, R. Froese, K. Güssow, S. Khalilian, S. Krastel, A. Körtzinger, M. Langebuch, M. Latif, B. Matthiessen, F. Melzner, A. Oeschies, S. Petersen, A. Proelss, M. Quaas, J. Reichenbach, T. Requate, T. Reusch, P. Rosenstiel, J. Schmidt, K. Schrottke, H. Sichelschmidt, U. Siebert, R. Soltwedel, U. Sommer, K. Stattegger, H. Sterr, R. Sturm, T. Treude, A. Vafeidis, C. van Bernen, J. van Beusekorn, R. Voss, M. Visbeck, M. Wahl, W. Wallmann und F. Weinberger (2010). *World ocean review. Living with the oceans*. Hamburg: Maribus gGmbH.
- Bramm, K., R.K. Lattanzio und E. Barbour (2010a). *Geoengineering: Governance and technology policy*. Congressional Research Service, Washington, D.C., R41371.
- Bramm, K., R.K. Lattanzio und E. Barbour (2010b). Using science to create a better place: Environmental Research from Welsh Universities. *Environmental Research Monitoring Q1-2010*. Online: <http://www.werh.org/research/documents/Abstracts2010-q1.pdf> [abgerufen am: 09.03.2011].
- Broder, J. (2009). A Skeptic Finds Faith in Geoengineering. Online: <http://green.blogs.nytimes.com/2009/09/03/a-skeptic-finds-faith/?scp=3&sq=green,%2520inc&st=cse> [abgerufen am: 30.03.2011].
- Brovkin, V., V. Petoukhov, M. Claussen, E. Bauer, D. Archer und C. Jaeger (2009). Geoengineering climate by stratospheric sulfur injections: Earth system vulnerability to technological failure. *Climatic Change* 92: 243–259.
- Budyko, M. (1977). *Climatic Changes, American Geophysical Society*. Washington, D.C.
- Budyko, M. (1982). *The Earth's Climate, Past and Future*. New York, N.Y.: Academic Press.
- Caldeira, K., und L. Wood (2008). Global and Arctic climate engineering: numerical model studies. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 366: 1–18.
- Charney, J. (1975). Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 428: 193–202.
- Charney, J., P.H. Stone und W. Quirk (1975). Drought in the Sahara: A Biogeophysical Feedback Mechanism. *Science* 187: 434–5.
- Clarke L., K. Jiang, K. Akimoto, M. Babiker, G. Blanford, K. Fisher-Vanden, J.-C. Hourcade, V. Krey, E. Kriegler, A. Löschel, D. McCollum, S. Paltsev, S. Rose, P. R. Shukla, M. Tavoni, B. C. C. van der Zwaan, and D.P. van Vuuren, 2014: Assessing Transformation Pathways. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel und J.C. Minx (Hrsg.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Cline, W. (2007). Global warming and agriculture: End-of-century estimates by country. Online: <http://site.ebrary.com/lib/academiccompletetitles/home.action> [abgerufen am: 17.11.2011].
- Coakley Jr., J., R.L. Bernstein und P. Durkee (1987). Effect of ship-stack effluents on cloud reflectivity. *Science* 237: 1020–2.
- Collingridge, D. (1980). *The social control of technology*. Frances Pinter, London.
- Cool Roofs (2011). Promotion of cool roofs in the EU. Online: <http://www.coolroofs-eu.eu/> [abgerufen am: 17.11.2011].
- Corner, A., und N. Pidgeon (2010). Geoengineering the Climate: The Social and Ethical Implications. *Environment* 52(1): 24–37.

- Crutzen, P. (2006). Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve a policy dilemma? *Climatic Change* 77: 211–9.
- CSEPP (1992). *Policy implications of greenhouse warming. Mitigation, adaptation, and the science base.* (Committee on Science Engineering and Public Policy). Washington, D.C.: National Academy Press.
- Dasgupta, P. (2008). Discounting climate change. *Journal of Risk and Uncertainty* 37: 141–69.
- Dickinson, R. (1996). Climate engineering: A review of aerosol approaches to changing the global energy balance. *Climatic Change* 33(3): 279–90.
- Early, J. (1989). The space based solar shield to offset greenhouse effect. *Journal of the British Interplanetary Society* 42: 567–9.
- Edenhofer, O., und M. Kalkuhl (2009). Das grüne Paradoxon – Menetekel oder Prognose. In F. Beckenbach et al. (Hrsg.), *Diskurs Klimapolitik. Jahrbuch Ökologische Ökonomie. Jg. 6.* Marburg: Metropolis.
- Eliseev, A., A. Chernokulsky, A. Karpenko und I. Mokhov (2010). Global warming mitigation by sulphur loading in the stratosphere: dependence of required emissions on allowable residual warming rate. *Theoretical and Applied Climatology* 101(1-2): 67–81.
- Fecht, S. (2011). U.K. geoengineering tests delayed until spring. *Scientific American*. Online: <http://blogs.scientificamerican.com/observations/2011/10/07/geoengineering-tests-delayed-until-spring/> [abgerufen am: 27.10.2011].
- Feichter, J., und T. Leisner (2009). Climate engineering: A critical review of approaches to modify the global energy balance. *The European Physical Journal Special Topics* 176: 81–92.
- FICER (2011). Fund for Innovative Climate and Energy Research: Purpose. Online: <http://people.ucalgary.ca/~keith/FICER.html> [abgerufen am: 17.11.2011].
- Fleming, J. (2004). Fixing the weather and climate: Military and civilian schemes for cloude seeding and climate engineering. In Rosner, L. (Hrsg.), *The technological fix: How people use technology to create and solve problems.* New York: Routledge.
- Fleming, J. (2007). The climate engineers: Playing god to save the planet. *The Wilson Quarterly* (Spring 2007): 46–60.
- Fleming, J. (2010). *Fixing the sky. The checkered history of weather and climate control.* New York and Chichester, West Sussex: Columbia University Press.
- Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz und R. van Dorland (2007). Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In S. Solomon et al. (Hrsg.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge, United Kingdom, and New York, N.Y., USA: Cambridge University Press.
- Friedlingstein, P., P. Cox, R. Betts, L. Bopp, W. von Bloh, V. Brovkin, P. Cadule, S. Doney, M. Eby, I. Fung, G. Bala, J. John, C. Jones, F. Joos, T. Kato, M. Kawamiya, W. Knorr, K. Lindsay, H. Matthews, T. Raddatz, P. Rayner, C. Reick, E. Roeckner, K.-G. Schnitzler, R. Schnur, K. Strassmann, A. Weaver, C. Yoshikawa und N. Zeng (2006). Climate–Carbon Cycle Feedback Analysis: Results from the C4MIP Model Intercomparison: *Journal of Climate. J. Climate* 19(14): 3337–53.
- GAO (US Government Accountability Office) (2010). Climate Change: A Coordinated Strategy Could Focus Federal Geoengineering Research and Inform Governance Efforts: Report to the Chairman, Committee on Science and Technology, US House of Representatives. Washington, D.C., GAO-10-903.
- GAO (US Government Accountability Office) (2011). Technology assessment. Climate engineering. Technical status, future directions and potential responses: Report to Congressional Requester. Washington, D.C. GAO-11-71.
- Gaskill, A. (2004). Global Albedo Enhancement Project. Online: <http://www.global-warming-geo-engineering.org/1/contents.html> [abgerufen am: 17.10.2011].
- Gawel, E. (2011). Climate Engineering als Mittel der Klimapolitik. *Zeitschrift für Umweltrecht* 10: 451–7.

- Ginzky, H., F. Herrmann, K. Kartschall, W. Leujak, K. Lipsius, C. Mäder, S. Schwermer und G. Straube (2011). GEO-ENGINEERING. Wirksamer Klimaschutz oder Größenwahn?: Methoden – Rechtliche Rahmenbedingungen – Umweltpolitische Forderungen. Online: <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/4125.pdf> [abgerufen am: 31.10.2011].
- Goes, M., K. Keller und N. Tuana (2011). The economics (or lack thereof) of aerosol geoengineering. *Climatic Change* 109(3): 719–44.
- Goeschl, T., D. Heyen und J. Moreno-Cruz (2013). The Intergenerational Transfer of Solar Radiation Management Capabilities and Atmospheric Carbon Stocks. *Environmental and Resource Economics* 56: 85-104.
- Gosh, A., und J. Blackstock (2011). SRMGI background paper: Does geoengineering need a global response – and of what kind? International aspects of SRM research governance. Beitrag auf der “*Solar Radiation Management Governance Initiative Conference*”, 21.–24. März.
- Govindasamy, B., und K. Caldeira (2000). Geoengineering Earth’s radiation balance to mitigate CO₂-induced climate change. *Geophysical Research Letters* 27(14): 2141–4.
- Govindasamy, B., K. Caldeira und P. Duffy (2003). Geoengineering Earth’s radiation balance to mitigate climate change from a quadrupling of CO₂. *Global and Planetary Change* 37: 157–8.
- Govindasamy, B., S. Thompson, P. Duffy, K. Caldeira und C. Delire (2002). Impact of geoengineering schemes on the terrestrial biosphere. *Geophysical Research Letters* 29: doi:10.1029/2002GL015911(22).
- Gramstad, K., und S. Tjøtta (2010). Climate Engineering: Cost benefit and beyond 05/10. Online: http://www.uib.no/filearchive/wp-05.10_2.pdf [abgerufen am: 30.10.2010].
- Grunwald, A. (2010). Der Einsatz steigt: globale Risiken. *Politische Ökologie* 120: 37–9.
- Hansen, J. (2002). A brighter future. *Climatic Change* 52: 435–40.
- Hansen, J., L. Nazarenko, R. Ruedy, M. Sato, J. Willis, A. Del Genio, D. Koch, A. Lacis, K. Lo, S. Menon, T. Novakov, J. Perlwitz, G. Russell, G. Schmidt und N. Tausnev (2005). Earth’s Energy Imbalance: Confirmation and Implications. *Science* 308: 1431–5.
- Heal, G. (2009). Climate economics: A meta-review and some suggestions for future research. *Review of Environmental Economics and Policy* 3(1): 4–21.
- Heckendorn, P., D. Weisenstein, S. Fueglistaler, B. Luo, E. Rozanov, M. Schraner, L. Thomason und T. Peter (2009). The impact of geoengineering aerosols on stratospheric temperature and ozone. *Environmental Research Letters* 4(4): doi: 10.1088/1748-9326/4/4/045108.
- Hegerl, G., und S. Solomon (2009). Risks of Climate Engineering. *Science* 325(5943): 955–6.
- Heintzenberg, J. (2011). Climate Engineering: Chancen und Risiken einer Beeinflussung der Erderwärmung. Naturwissenschaftliche und technische Aspekte: Erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF). Leibniz-Institut für Troposphärenforschung e.V., Leipzig. Online: <http://www.kiel-earth-institute.de/projekte/forschung/naturwissenschaft> [abgerufen am: 15.10.2011].
- Hoffmann, M., und Rahmsdorf S. (2009). On the stability of the atlantic meridional overturning circulation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106: doi10.1073/pnas.0909146106.
- Horton, J. (2011). Geoengineering and the Myth of Unilateralism: Pressures and Prospects for International Cooperation. *Stanford Journal of Law, Science & Policy* 4: 56–68.
- Hucko, M. (2009). System and Method of Control of the Terrestrial Climate and its Protection against Warming and Climatic Catastrophes Caused by Warming such as Hurricanes, Patent in den USA: United States Patent Office. USA.
- Institution of Mechanical Engineers (2009). Geo-engineering: Giving us the time to act? Online: <http://www.imeche.org/knowledge/themes/environment/climate-change/geo-engineering> [abgerufen am: 14.11.2011].
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (Intergovernmental Panel on Climate Change). Genf, Schweiz.

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2012). Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Geoengineering [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, C. Field, V. Barros, T. F. Stocker, Q. Dahe, J. Minx, K. Mach, G.-K. Plattner, S. Schlömer, G. Hansen, M. Mastrandrea (Hrsg.)]. IPCC Working Group III Technical Support Unit, Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany, Potsdam, Germany.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri und L.A. Meyer (Hrsg.)]. IPCC, Genf, Schweiz.
- Irvine, P., D. Lunt, E. Stone und A. Ridgwell (2009). The fate of the Greenland Ice Sheet in a geoengineered, high CO₂ world. *Environmental Research Letters* 4: 1–8.
- Irvine, P., A. Ridgwell und D. Lunt (2010). Assessing the regional disparities in geoengineering impacts. *Geophysical Research Letters* 37: doi:10.1029/2010GL044447.
- Izrael, Y.A., V.M. Zakharov, N.N. Petrov, A.G. Ryaboshapko, V.N. Ivanov, A.V. Savchenko, Y.V. Andreev, Y.A. Puzov, B.G. Danelyan und V.P. Kulyapin (2009). Field experiment on studying solar radiation passing through aerosol layers. *Russian Meteorology and Hydrology* 34(5): 265–73.
- Jackson, R., und J. Salzmänn (2010). Pursuing Geoengineering for Atmospheric Restoration - Transport Research International Documentation - TRID. *Issues in Science & Technology* 26(4): 67–76.
- Jacobson, M. (2001). Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols. *Nature* 409: 695–7.
- Jones, A., J. Haywood und O. Boucher (2009). Climate Impacts of geoengineering marine stratocumulus clouds. *Journal of Geophysical Research* 114: doi:10.1029/2008JD011450.
- Jones, A., J. Haywood, O. Boucher, B. Kravitz und A. Robock (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. *Atmospheric Chemistry and Physics* 10(13): 5999–6006.
- Katz, J. (2010). Stratospheric albedo modification. *Energy and Environmental Science* 3: doi:10.1039/c002441d(11): 1634–44.
- Keith, D. (2000). Geoengineering the Climate: History and Prospect. *Annual Review of Energy and the Environment* 25(1): 245–84.
- Keith, D., E. Parson und M. Morgan (2010). Research on Global Sun Block Needed Now. *Nature* 463(7280): 426–7.
- Kintisch, E. (2009). March Geoengineering Confab Draws Praise, Criticism. *Science Insider* (6. November, 2009). Online: <http://news.sciencemag.org/scienceinsider/2009/11/march-geoengine.html> [abgerufen am: 27.10.2011].
- Kintisch, E. (2010). *Hack the planet. Science's best hope – or worst nightmare – for averting climate catastrophe*. New Jersey u.a.: John Wiley & Sons.
- Klepper, G. und W. Rickels (2011). Climate Engineering: Wirtschaftliche Aspekte: Erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF). Kiel Earth Institute, Kiel. Online: <http://www.kiel-earth-institute.de/projekte/forschung/okonomie> [abgerufen am: 15.10.2011].
- Klepper, G. und Rickels, W. (2012). The Real Economics of Climate Engineering. *Economics Research International*, doi:10.1155/2012/316564.
- Klepper, G. und Rickels, W. (2014). Climate Engineering: Economics Prospects and Considerations. *Review of Environmental Economics and Policy* 8 (2): 270–289.
- Knutti, R. und G. Hegerl (2008). The equilibrium sensitivity of the Earth's temperature to radiation changes. *Nature Geoscience* 1: 735–43.
- Koch, D., Y. Balkanski, S.E. Bauer, R.C. Easter, S. Ferrachat, S.J. Ghan, C. Hoose, T. Iversen, A. Kirkevåg, J.E. Kristjansson, X. Liu, U. Lohmann, S. Menon, J. Quaas, M. Schulz, Ø. Seland, T. Takemura und N. Yan (2011). Soot microphysical effects on liquid clouds, a multi-model investigation. *Atmospheric Chemistry and Physics* 11: 1051–64.

- Koch, D., und A. DelGenio (2010). Black carbon semi-direct effects on cloud cover: review and synthesis. *Atmospheric Chemistry and Physics* 10: 7685–96.
- Kolstad C., K. Urama, J. Broome, A. Bruvoll, M. Cariño Olvera, D. Fullerton, C. Gollier, W. M. Hanemann, R. Hassan, F. Jotzo, M. R. Khan, L. Meyer, and L. Mundaca, 2014: Social, Economic and Ethical Concepts and Methods. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (Hrsg.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Korhonen, H., K.S. Carslaw und S. Romakkaniemi (2010). Enhancement of marine cloud albedo via controlled sea spray injections: a global model study of the influence of emission rates, microphysics and transport. *Atmospheric Chemistry and Physics* 10(9): 4133–43.
- Kousky, C., O. Rostapshova, M. Toman und R. Zeckhauser (2009). Responding to Threats of Climate Change Mega-Catastrophes. Policy Research Paper 5127. World Bank, Washington, D.C.
- Kravitz, B., A. Robock, O. Boucher, H. Schmidt, K.E. Taylor, G. Stenchikov und M. Schulz (2011). The geoengineering model intercomparison project (GeoMIP). *Atmospheric Science Letters* 12(2): 162–7.
- Kravitz, B., A. Robock, L. Oman, G.L. Stenchikov und A. Marquardt (2009). Acid Deposition from Stratospheric Geoengineering with Sulfate Aerosols. *Journal of Geophysical Research* 114, doi:10.1029/2009JD011918.
- Kravitz, B., A. Robock, L. Oman, G.L. Stenchikov und A. Marquardt (2010). Correction to “Acid Deposition from Stratospheric Geoengineering with Sulfate Aerosols”. *Journal of Geophysical Research* 115, doi:10.1029/2010JD014579.
- Lacis, A., und M. Mishchenko (1995). Climate forcing, climate sensitivity, and climate response: Aradiative modelling perspective on atmospheric aerosols. In R. Charlson und J. Heintzenberg (Hrsg.), *Aerosol Forcing of Climate*. Chichester: Wiley (11–42).
- Latham, J. (1990). Control of global warming? *Nature* 347: 339–40.
- Latham, J., K. Bower, T. Choullarton, H. Coe, P. Conelly, G. Cooper, T. Craft, J. Foster, A. Gadian, L. Galbraith, H. Iacovides, D. Johnston, B. Launder, B. Leslie, J. Meyer, A. Neukermans, B. Ormond, B. Parkes, P. Rasch, J. Rush, S. Salter, T. Stevenson, H. Wang, Q. Wang und R. Wood (2011). Marine cloud brightening. *Philosophical Transactions of the Royal Society A, in Review*. Online <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/370/1974/4217.short>
- Latham, J., P. Rasch, C. Chen, L. Kettles, A. Gadian, A. Gettelman, H. Morrison, K. Bower und T. Choullarton (2008). Global temperature stabilization via controlled albedo enhancement of low-level maritime clouds. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 366: 3969–87.
- Lee, J., P. Yang, A. Dessler, B. Gao und S. Platnik (2009). Distribution and radiative forcing of tropical thin cirrus clouds. *Journal of Atmospheric Science* 66: doi: 10.1175/2009JAS3183.1.
- Leiserowitz, A. (2010). Geoengineering and the Change in the Public Mind: Asilomar Conference on Climate Intervention. Pacific Grove, CA.
- Leisner, T. (2011). Bewertung des Climate Engineering Vorschlags: Modification of cirrus clouds to reduce global warming, von. D. L. Mitchell und W. Finnegan. E-Mail vom 26.03.2011 an W. Rickels.
- Leisner, T. (2012). Photophoretische Kräfte. E-Mail vom 23.01.2012 an W. Rickels,.
- Leisner, T., und S. Müller-Kliesner (2010). Aerosolbasierte Methoden des Climate Engineering. Eine Bewertung. *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis* 19(2): 25–32.
- Lenton, T.M. (2011). Early warnings of climate tipping points. *Nature Climate Change* 1: doi:10.1038/NCLIMATE1143.
- Lenton, T.M., und N.E. Vaughan (2009). The radiative forcing potential of different climate engineering options. *Atmospheric Chemistry and Physics* 9: 5539–61.

- Lenton, T.M., H. Held, E. Kriegler, J.W. Half, W. Lucht, S. Rahmstorf und H.J. Schellnhuber (2008). Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105(6): 1786–93.
- Llanillo, P., P.D. Jones und R. von Glasow (2010). The Influence of Stratospheric Sulphate Aerosol Deployment on the Surface Air Temperature and the Risk of an Abrupt Global Warming. *Atmosphere* 1(1): 62–84.
- Loeb, N.G.; B.A. Wielicki, W. Su, K. Loukachine, W. Sun, T. Wong, K.J. Priestley, G. Matthews, W.F. Miller und R. Davies (2007). Multi-Instrument Comparison of Top-of-Atmosphere Reflected Solar Radiation. *Journal of Climate* 20(3): 575–91.
- Long, J., S. Rademaker, J. Anderson, R. Benedick, K. Caldeira, J. Chaisson, D. Goldston, S. Hamburg, D.W. Keith, R. Lehmann, F. Loy, G.M. Morgan, D. Sarewitz, T.C. Schelling, J. Shepherd, D. Victor, D. Whelan und D. Winickoff (2011). Task Force on Climate Remediation Research: Geoengineering: A national strategic plan for research on the potential effectiveness, feasibility, and consequences of climate remediation technologies. Online: <http://www.bipartisanpolicy.org/sites/default/files/BPC%20Climate%20Remediation%20Final%20Report.pdf> [abgerufen am: 17.10.2011].
- Lunt, D.J., A. Ridgwell, P.J. Valdes und A. Seale (2008). "Sunshade World": A fully coupled GCM evaluation of the climatic impacts of geoengineering. *Geophysical Research Letters* 35: doi:10.1029/2008GL033674.
- MacCracken, M. (2009). Beyond Mitigation. *The World Bank Policy Research Working Paper* 4938. World Bank, Washington, D.C.
- MacMynowski, D.G., D.W. Keith, K.G. Caldeira und H.J. Shin (2011). Can we test geoengineering? *Energy & Environmental Science* 4(12): 5044–52.
- Mautner, M. (1991). A space-based solar screen against climate warming. *Journal of the British Interplanetary Society* 44: 135–8.
- McClellan, J., J. Sisco, B. Suarez und G. Keogh (2010). Geoengineering cost analysis. Final Report, prepared under Contract to the University of Calgary. Aurora Flight Sciences Corporation, Cambridge, Massachusetts. AR10-182.
- Mercado, L.M., N. Belloin, S. Sitch, O. Boucher, C. Huntingford, M. Wild und P.M. Cox (2009). Impact of changes in diffuse radiation on the global land carbon sink. *Nature* (458): 1014–7.
- Mercer, A., D.W. Keith und J. Sharp (2011). Public understanding of Solar Radiation Management. *Environmental Research Letters* 6(4): doi:10.1088/1748-9326/6/4/044006.
- Mitchell, D. (2011). Cost estimates cirrus cloud modification. E-Mail, 09.02.2011 an W. Rickels.
- Mitchell, D., und W. Finnegan (2009). Modification of cirrus clouds to reduce global warming. *Environmental Research Letters* 4: 45102.
- Moreno-Cruz, J., und D. Keith (2012). Climate policy under uncertainty: A case for solar geoengineering. *Climatic Change* (3): 431–44.
- Moreno-Cruz, J., K. Ricke und D. Keith (2012). A simple model to account for regional inequalities in the effectiveness of solar radiation management. *Climatic Change* 110(3-4): 649–68.
- Moreno-Cruz, J., und S. Smulders (2010). Revisiting the Economics of Climate Change: The Role of Geoengineering. Online: <http://works.bepress.com/morenocruz/4> [abgerufen am: 31.03.2011].
- Murphy, D.M. (2009). Effect of Stratospheric Aerosols on Direct Sunlight and Implications for Concentrating Solar Power. *Environmental Science and Technology* 8: 2784–86.
- National Research Council (2015): Climate Intervention: Reflecting Sunlight to Cool Earth. Washington, DC: The National Academies Press, doi:10.17226/18988.
- NERC (Natural Environmental Research Council) (2011a). Experiment Earth? Report on a public dialogue on geoengineering. Natural Environmental Research Council, Washington, D.C. Online: <http://www.nerc.ac.uk/about/consult/geoengineering-dialogue-final-report.pdf> [abgerufen am: 30.03.2011].
- NERC (Natural Environmental Research Council) (2011b). The SPICE project: A geoengineering feasibility study. Natural Environmental Research Council, Washington, D.C. Online: <http://www.nerc.ac.uk/press/releases/2011/22-spice.asp> [abgerufen am: 27.10.2011].

- Ornstein, L., I. Aleinov und D. Rind (2009). Irrigated afforestation of the Sahara and Australian Outback to end global warming. *Climatic Change* 97: 409–37.
- Pearson, J., J. Oldson und E. Levin (2006). Earth Rings for Planetary Environmental Control. *Acta Astronautica* 58(1): 44–57.
- Pierce, J.R., D.K. Weisenstein, P. Heckendorn, T. Peter und D.W. Keith (2010). Efficient formation of stratospheric aerosol for climate engineering by emission of condensible vapor from aircraft. *Geophysical Research Letters* 37, doi:10.1029/2010GL043975.
- Pongratz, J., C.H. Reick, T. Raddatz und M. Claussen (2010). Biogeophysical versus biogeochemical climate response to historical anthropogenic land cover change. *Geophysical Research Letters* 37: L08702, doi:10.1029/2010GL043010.
- President's Science Advisory Council (1965). Restoring the quality of the environment. Washington, D.C.
- Rasch, P., P.J. Crutzen und D. Coleman (2008a). Exploring the geoengineering of climate using stratospheric sulfate aerosols: The role of particle size. *Geophysical Research Letters* 35, doi:10.1029/2007GL032179.
- Rasch, P., J. Tilmes, R.P. Turco, A. Robock, L. Oman, C.C. Chen, G.L. Stenchikov und R. Garcia (2008b). An overview of geoengineering of climate using stratospheric sulphate aerosols. *Philosophical Transactions of the Royal Society. Series A* 366: 4007–37.
- Rasch, P., J. Latham und C. Chen (2009). Geoengineering by cloud seeding: influence on sea ice and climate system. *Environmental Research Letters* 4(4): 1–8.
- Raupach, M., und J. Canadell (2010). Carbon and the Anthropocene. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 2: 210–8.
- Renn, O. (2005). Risk Perception and Communication: lessons for the food and food packaging industry. *Food Additives and Contaminants* 22(10): 1061–71.
- Renn, O., N. Brachatzek und S. Hiller (2011). *Climate Engineering: Risikowahrnehmung, gesellschaftliche Risikodiskurse und Optionen der Öffentlichkeitsbeteiligung*. Erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF). Stuttgart.
- Ricke, K., M.G. Morgan und M. Allen (2010). Regional climate response to solar radiation management. *Nature Geoscience* 3: 537–41.
- Rickels, W., G. Klepper, J. Dovern, G. Betz, N. Brachatzek, S. Cacean, K. Güssow, J. Heintzenberg, S. Hiller, C. Hoose, T. Leisner, A. Oschlies, U. Platt, A. Proelss, O. Renn, S. Schäfer und M. Zürn (2011). *Gezielte Eingriffe in das Klimasystem? Eine Bestandsaufnahme der Debatte zu Climate Engineering*. Sondierungsstudie für das Bundesministerium für Bildung, Kiel.
- Ridgwell, A., J.S. Singarayer, A.M. Hetherington und P.A. Valdes (2009). Tackling regional climate change by leaf Albedo bio-geoengineering. *Current Biology* 19(2): 146–50.
- Robock, A. (2011). Bubble, bubble, toil and trouble. *Climatic Change* 105: 383–5.
- Robock, A., A. Marquardt, B. Kravitz und G.L. Stenchikov (2009). Benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering. *Geophysical Research Letters* 36: 1–9.
- Robock, A., L. Oman und G. Stenchikov (2008). Regional climate responses to geoengineering with tropical and Arctic SO₂ injections. *Journal of Geophysical Research* 113: 1–15.
- Robock, A., A. Bunzl, B. Kravitz und G.L. Stenchikov (2010). A test for geoengineering? *Science* 327(5965): 530–1.
- Roderick, M.L., G.D. Farquhar, S.L. Berry und I.R. Noble (2001). On the direct effect of clouds and atmospheric particles on the productivity and structure of vegetation. *Oecologia* 129: 21–30.
- Rösch, C., M. Achternbosch und J. Schippl (2010). Climate Engineering Light: Naturliche Prozesse der CO₂ Speicherung. *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis* 19(2): 43–52.
- Ross, A., und H. Matthews (2009). Climate engineering and the risk of rapid climate change. *Environmental Research Letters* (4): 45103.

- Royal Society (2009). Geoengineering the Climate: Science, governance and uncertainty. *RS Policy document* 10/09.
- Salter, S., G. Sortino und J. Latham (2008). Sea-going hardware for the cloud albedo method of reversing global warming. *Philosophical Transactions of the Royal Society. Series A* 366: 3989–4006.
- Sardemann, G. (2010). Die Welt aus den Angeln heben. *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis* 19(2): 8–17.
- Schäfer, S. M. Lawrence, H. Stelzer, W. Born, S. Low, A. Aaheim, P. Adriázola, G. Betz, O. Boucher, A. Cariu, P. Devine-Right, A.T. Gullberg, S. Haszeldine, J. Haywood, K. Houghton, R. Ibarrola, P. Irvine, J.-E. Kristjansson, T. Lenton, J.S.A. Link, A. Maas, L. Meyer, H. Muri, A. Oeschles, A. Proelß, T. Rayner, W. Rickels, L. Ruthner, J. Scheffran, H. Schmidt, M. Schulz, V. Scott, S. Shackley, D. Tänzler, M. Watson, N. Vaughan (2015): The European Transdisciplinary Assessment of Climate Engineering (EuTRACE): Removing Greenhouse Gases from the Atmosphere and Reflecting Sunlight away from Earth. Funded by the European Union's Seventh Framework Programme under Grant Agreement 306993.
- Scheer, D., und O. Renn (2010). Klar ist nur die Unklarheit: Notwendiger Plan B gegen den Klimawandel? *Geo-Engineering. Politische Ökologie* 120: 27–9.
- Schelling, T. (1996). The Economic Diplomacy of Geoengineering. *Climatic Change* 33: 303–7.
- Schmidt, H., A. Aaheim, K. Alterskjar, F. Benduhn, D. Bou Karam, J.E. Kristjansson, M. Lawrence, U. Niemeier, M. Schulz und C. Timmreck (2010). IMPLICC (Implications and risks of engineering solar radiation to limit climate change). Grant no: FP7-ENV-2008-1-226567. Online: http://implicc.zmaw.de/fileadmin/user_upload/implicc/other_documents/implicc_report_dec2010_summary.pdf [abgerufen am: 17.11.2011].
- Schwartz, S. (2007). Heat capacity, time constant, and sensitivity of Earth's climate system. *Journal of Geophysical Research* 112(D24S05): doi:10.1029/2007JD008746.
- Schwartz, S. (2008). Reply to comments by G. Foster et al., R. Knutti et al., and N. Scafetta on "Heat capacity, time constant, and sensitivity of Earth's climate system". *Journal of Geophysical Research* 113, doi:10.1029/2008JD009872(D15105).
- Seitz, R. (2011). Bright water: hydrosols, water conservation and climate change. *Climatic Change* 105: 365–81.
- Singarayer, J., A. Ridgwell und P. Irvine (2009). Assessing the benefits of crop albedo bio-geoengineering. *Environmental Research Letters* 4(4): 45110.
- Sinn, H. (2008). Public policies against global warming: a supply side approach. *International Tax and Public Finance* 15: 360–94.
- Small, J.D., P.Y. Chuang, G. Feingold und H. Jiang (2009). Can aerosol decrease cloud lifetime? *Geophysical Research Letters* 36, doi:10.1029/2009GL038888.
- Spence, A., D. Venables, N. Pidgeon, W. Pootinga und C. Demski (2010). Public perceptions of climate change: Summary findings of a survey conducted from January to March 2010. Cardiff School of Psychology, Cardiff.
- SRMGI (2011). About SRMGI. Solar Radiation Management Research Governance Initiative. Online: <http://www.srmgi.org/about-srmgi/> [abgerufen am: 17.11.2011].
- Stephens, J., und D. Keith (2008). Assessing geochemical carbon management. *Climatic Change* 90(3): 217–42.
- Stevens, B. (2009). Untangling aerosol effects on clouds and precipitation in a buffered system. *Nature* 461, doi:10.1038/nature08281.
- Taucher, J., und A. Oeschles (2011). Can we predict the direction of marine primary production change under global warming? *Geophysical Research Letters* 38: doi:10.1029/2010GL04534.
- Teller, E., T. Hyde und L. Wood (2002). Active Climate Stabilization: Practical Physics-Based Approaches to Prevention of Climate Change. Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), CA (USA). UCRL-JC-148012.
- Teller, E., L. Wood und R. Hyde (1997). Global warming and ice ages: 1. Prospects for physics based modulation of global change. Livermore National Laboratory, Livermore, CA. UCRL-JC-128157.

- Trenberth, K., und A. Dai (2007). Effects of Mount Pinatubo volcanic eruption on the hydrological cycle as an analog of geoengineering. *Geophysical Research Letters* 34(15): doi:10.1029/2007GL030524.
- Trenberth, K., J.T. Fasullo und J. Kiehl (2009). Earth's Global Energy Budget. *Bulletin of the American Meteorological Society* 90: 311–24.
- Tuck, A.F., D.J. Donaldson, M.H. Hitchman, E.C. Richard, H. Tervahattu, V. Vaida und J.C. Wilson (2008). On geoengineering with sulphate aerosols in the tropical upper troposphere and lower stratosphere. *Climatic Change* 90(3): 315–31.
- Twomey, S. (1974). Pollution and the planetary albedo. *Atmospheric Environment* 8: 1251–6.
- Victor, D. (2008). On the regulation of geoengineering. *Oxford Review of Economic Policy* 24(2): 322–36.
- Wakefield, S.R. (2008). A dust- or particle-based solar shield to counteract global warming. United Kingdom Patent 2446250-A. V, Application Date: December 12, 2007; Publication Date: August 6, 2008. Online: <http://www.directorypatent.com/GB/2446250-a.html> [abgerufen am: 17.11.2011]
- Wang, H., G. Feingold, R. Wood und J. Kazil (2010). Modelling microphysical and meteorological controls on precipitation and cloud cellular structures in Southeast Pacific stratocumulus. *Atmospheric Chemistry and Physics* 10: 6347–62.
- Wang, H., P.J. Rasch und G. Feingold (2011). Manipulating marine stratocumulus cloud amount and albedo: a process-modelling study of aerosol-cloud-precipitation interactions in response to injection of cloud condensation nuclei. *Atmospheric Chemistry and Physics* 11: 4237–49.
- Warburton, J., L.G. Young und R. Stone (1995). Assessment of Seeding Effects in Snowpack Augmentation Programs: Ice Nucleation and Scavenging of Seeding Aerosols. *Journal of Applied Meteorology* 34: 121–30.
- Wigley, T. (2006). A combined mitigation/geoengineering approach to climate stabilization. *Science* 314: 452–4.
- Wille, H., M. Rodriguez, J. Kasparian, D. Mondelain, J. Yu, A. Mysyrowicz, R.W.J. Sauerbrey und L. Wöste (2002). Teramobile: a mobile femtosecond-terawatt laser and detection system. *European Physical Journal of Applied Physics* 20: 183–90.
- Xia, L., und A. Robock (2011). Impacts of Stratospheric Sulfate Geoengineering on Food Supply in China. Veranstaltung vom 2011. Online: <http://www.kiss.caltech.edu/workshops/geoengineering2011/presentations/xia.pdf> [abgerufen am: 17.11.2011].
- Zhang, Y., A. Macke und F. Albers (1999). Effect of crystal size spectrum and crystal shape on stratiform cirrus radiative forcing. *Atmospheric Research* 52: 59–75.
- Zürn, M., und S. Schäfer (2011). Climate Engineering: Internationale Beziehungen und politische Regulierung: Erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF). Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (WZB), Berlin. Online: <http://www.kiel-earth-institute.de/projekte/forschung/politikwissenschaft> [abgerufen am: 15.10.2011].

- 534./535. Weltkonjunktur im Frühjahr 2014
Kiel, April 2014. 46 S. 18 Euro.
- 536./537. Deutsche Konjunktur im Frühjahr 2014
Kiel, April 2014. 45 S. 18 Euro.
538. Konjunkturbereinigung der Länder: Eine Quasi-Echtzeitanalyse
am Beispiel Schleswig-Holsteins
Jens Boysen-Hogrefe
Kiel, Juni 2014. 16 S. 9 Euro.
- 539./540. Weltkonjunktur und deutsche Konjunktur im Sommer 2014
Kiel, Juni 2014. 35 S. 18 Euro.
- 541./542. Makroprudenzielle Finanzmarktpolitik: Nationale Handlungsoptionen
im Euroraum
*Stefan Kooths, Martin Plödt, Björn van Roye und
Joachim Scheide*
Kiel, August 2014. 53 S. 18 Euro.
- 543./544. Weltkonjunktur im Herbst 2014
Kiel, Oktober 2014. 46 S. 18 Euro.
- 545./546. Deutsche Konjunktur im Herbst 2014
Kiel, Oktober 2014. 35 S. 18 Euro.
- 547./548. Der Kieler Subventionsbericht: Eine Aktualisierung bis zum
Jahr 2013/2014
Claus-Friedrich Laaser und Astrid Rosenschon
Kiel, Juli 2015. 75 S. 18 Euro.
- 549./550. Radiation Management: Gezielte Beeinflussung des globalen
Strahlungshaushalts zur Kontrolle des anthropogenen Klima-
wandels
*Jonas Dovern, Sebastian Harnisch, Gernot Klepper,
Ulrich Platt, Andreas Oschlies und Wilfried Rickels*
Kiel, Dezember 2015. 64 S. 18 Euro.