

Klepper, Gernot et al.

Research Report

Herausforderung Climate Engineering: Bewertung neuer Optionen für den Klimaschutz

Kieler Beiträge zur Wirtschaftspolitik, No. 8

Provided in Cooperation with:

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

Suggested Citation: Klepper, Gernot et al. (2016) : Herausforderung Climate Engineering: Bewertung neuer Optionen für den Klimaschutz, Kieler Beiträge zur Wirtschaftspolitik, No. 8, Institut für Weltwirtschaft (IfW), Kiel

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/142241>

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 **BEITRÄGE ZUR WIRTSCHAFTSPOLITIK**

**Herausforderung
Climate Engineering
– Bewertung neuer
Optionen für den
Klimaschutz**



Nr. 8 Juni 2016

*Gernot Klepper, Jonas Dovern,
Wilfried Rickels, Daniel Barben,
Timo Goeschl, Sebastian Harnisch,
Daniel Heyen, Nina Janich,
Achim Maas, Nils Matzner,
Jürgen Scheffran, Stephanie Uther*

Institut für Weltwirtschaft
Kiel Institute for the
World Economy
ISSN 2195–7525

Herausgeber:

Institut für Weltwirtschaft (IfW)
Kiellinie 66, D-24105 Kiel
T +49 431 8814-1
F +49 431 8814-500

Schriftleitung:

Prof. Dr. Harmen Lehment (V.i.S.d. § 6 MDStV)

Das Institut für Weltwirtschaft ist eine rechtlich selbständige Stiftung des öffentlichen Rechts des Landes Schleswig-Holstein.

Redaktion:

Ilse Büxenstein-Gaspar, M.A.

Umsatzsteuer ID:

DE 251899169

Das Institut wird vertreten durch:

Prof. Dennis J. Snower, Ph.D. (Präsident)

Zuständige Aufsichtsbehörde:

Ministerium für Soziales, Gesundheit, Wissenschaft und Gleichstellung des Landes Schleswig-Holstein

Bilder/Fotos:

Cover: Getty Images

© 2016 Institut für Weltwirtschaft (IfW)
Alle Rechte vorbehalten.

Inhalt

1	Einleitung	3
2	Geschichte des Climate Engineering	5
3	Risikobewertung, Bewertungsansätze und Entscheidungskriterien	10
3.1	Vollständigkeit gewährleistende Bewertungsprozesse für CE-Technologien	11
3.1.1	Mögliche Konsequenzen, Risiken und Konfliktpotenziale von Climate Engineering	11
3.1.2	Risikoanalysen des Climate Engineering	14
3.2	Vergleichbarkeit gewährleistende Bewertungsprozesse für CE-Technologien	16
3.2.1	Kosten-Nutzen-Analyse versus Kosten-Effektivität-Analyse	17
3.2.2	Kosten-Effektivität-Analyse für CE-Technologien	19
3.2.3	Kosten-Effektivität-Analyse und Externalitäten	20
3.2.4	Kosten-Effektivität-Analyse und Verteilungseffekte	21
3.2.5	Kosten-Effektivität-Analyse unter Risiko und Unsicherheit	22
3.2.6	Vergleichende Bewertung von CE-Maßnahmen	23
3.3	Ansätze zwischen Vollständigkeit und Vergleichbarkeit	26
3.3.1	Einsichten aus der Praxis	26
3.3.2	Entscheidungskriterien	27
3.4	Auswirkungen des Climate Engineering auf klimapolitische Handlungsoptionen	28
4	Die Struktur der CE-Debatte	31
4.1.1	Argumente für die Erforschung von Climate Engineering	31
4.1.2	Argumente gegen die Erforschung von Climate Engineering	31
4.1.3	Argumente für die Notwendigkeit der Einsatzbereitschaft von CE-Technologien	33
4.1.4	Argumente gegen die Notwendigkeit der Einsatzbereitschaft von CE-Technologien	34
5	Internationale Regulierung von Climate Engineering	35
5.1.1	Uni-, mini- oder multilaterale Wege zu Erforschung und Einsatz	35
5.1.2	Prinzipien einer multilateralen Regulierung	37
5.1.3	Vorschläge zur institutionellen Ausgestaltung	39
5.2	Rechtliche und politische Herausforderungen für die Bundesrepublik Deutschland	40
6	Abschließende Betrachtungen	41
	Literaturverzeichnis	43

Verzeichnis der Tabellen

<i>Tabelle 1:</i> Technologie-Risiko-Matrix	16
<i>Tabelle 2:</i> Übersicht über Kosten-Effektivität-Analyse für die wichtigsten RM-Technologien	24
<i>Tabelle 3:</i> Übersicht über Kosten-Effektivität-Analyse für die wichtigsten CDR-Technologien	25
<i>Tabelle 4:</i> Übersicht über wichtige Argumente in der CE-Debatte	32

1 Einleitung

Jonas Dovern, Nina Janich, Gernot Klepper, Wilfried Rickels

Der Begriff *Climate Engineering* (CE) fasst verschiedene Technologien zusammen, mit denen bewusst in das Klimasystem der Erde eingegriffen wird, um den anthropogenen Klimawandel zu begrenzen. Dabei lassen sich die CE-Technologien von den herkömmlichen Vermeidungs- und Anpassungsmaßnahmen durch die Tatsache abgrenzen, dass sie ansetzen, nachdem Treibhausgase in die Atmosphäre emittiert wurden, aber bevor es zu einer Anpassung an die Auswirkungen des Klimawandels kommt (Keith 2000). Sie können danach in zwei Gruppen eingeteilt werden, je nachdem ob sie eingesetzt werden, um die atmosphärische Treibhausgaskonzentration zu senken – und damit die Ursache des Klimawandels zurückzuführen – oder ob sie eingesetzt werden, um in die Strahlungsbilanz der Erde einzugreifen und damit die Symptome des Klimawandels abzumildern. Die Technologien der ersten Gruppe werden als *Carbon Dioxid Removal* (CDR)-Technologien und jene der anderen als *Radiation Management* (RM)-Technologien bezeichnet. Dabei ist Radiation Management der weitere Begriff, da sowohl Technologien zur direkten Beeinflussung der kurzwelligen (SRM) als auch der langwelligen (TRM) Strahlung beinhaltet sind. Entsprechend könnten Technologien zur ursächlichen Rückführung des Klimawandels eigentlich auch als *Concentration Management* bezeichnet werden, da theoretisch die atmosphärische Konzentration verschiedener Treibhausgase manipuliert werden könnte (Rickels et al. 2011: 41). Da aber derzeit nur die Konzentration von Kohlendioxid (CO₂) beeinflusst wird, wird in der vorliegenden Studie der engere Begriff CDR verwendet.

Climate Engineering wird in der internationalen Klimadebatte erst seit einigen Jahren intensiv diskutiert. Die Idee, gezielt in das Klima einzugreifen, um das Wetter bzw. das Klima zu verändern, ist bereits relativ alt und hatte ihre Anfänge bereits Mitte des 19. Jahrhunderts. Allerdings haben diese Technologien in den letzten 50 Jahren nur relativ wenig Beachtung in der Auseinandersetzung mit dem anthropogenen Klimawandel gefunden. Die aber nach wie vor nahezu unveränderten Emissionstrends und die damit verbundene Einsicht, dass ein deutlicher Klimawandel immer wahrscheinlicher wird, haben CE-Technologien stärker in den Fokus der politischen Handlungsoptionen gebracht. Insbesondere seit der Arbeit von Crutzen (2006), in der Eingriffe in die Strahlungsbilanz gewissermaßen als eine der letzten Auswege dargestellt werden, gewinnt das Thema zunehmend an Bedeutung, was sich in einer zunehmenden Anzahl an Medienberichten, Gutachten und wissenschaftlichen Forschungsbeiträgen zeigt.

Mehr und mehr wird der klimapolitische Diskurs auch von der Frage geprägt, ob über die bisherigen Strategien hinaus CE-Technologien geeignet sein können, Versäumnisse bisheriger Emissionskontrolle und die Folgen des anthropogenen Temperaturanstiegs zu begrenzen. So berücksichtigt der Weltklimarat in seinem fünften Sachstandsbericht die Bedeutung von *Climate Engineering* als mögliche Reaktion auf den Klimawandel und die möglichen Folgen und Risiken für Natur und Gesellschaft (IPCC 2014).

Die Diskussion von *Climate Engineering* im Sachstandsbericht des Weltklimarats spiegelt die zunehmende Anzahl von Studien wieder, die in den vergangenen Jahren in verschiedenen Ländern zu dem Thema verfasst wurden. Im Zusammenhang mit einem Bericht des britischen *House of Commons* wurden in Großbritannien die *Oxford Principles* zur Regulierung der Erforschung von *Climate Engineering* formuliert (Rayner et al. 2009). Die fünf Prinzipien schlagen vor, CE-Technologien wie ein öffentliches Gut zu regulieren, die Öffentlichkeit am Entscheidungsprozess teilnehmen zu lassen, die Ergebnisse offen zu legen, eine unabhängige Folgenabschätzung durchzuführen und erst nach einem Governance-Prozess mit dem Einsatz der Technologien zu beginnen. Außerdem wurde im Jahr 2010 eine gemeinsame Initiative des britischen *Engineering and Physical Sciences Research Council*

(EPSRC) und des *Natural Environment Research Council* (NERC) zur Erforschung und Folgenabschätzung von *Geoengineering*-Maßnahmen ins Leben gerufen (EPSRC 2010). NERC unterstützt öffentliche Diskursaktivitäten zum *Climate Engineering*, um öffentliche Einschätzungen zu erkunden und zukünftige Forschung besser zu kommunizieren (NERC 2011).¹

Für das Repräsentantenhaus der USA wurde in einem Gutachten eine Bestandsaufnahme des Forschungsbedarfs und vorhandener Ressourcen in US-Institutionen vorgenommen und Strategien zur internationalen Koordination diskutiert (CST 2010). In dem Zusammenhang wurde auch vom *Congressional Research Service* eine Studie erstellt, die die Anwendbarkeit bestehender US-Gesetze und internationaler Vereinbarungen im Fall von Tests oder großskaligen CE-Maßnahmen zum Gegenstand hatte (Bracmort et al. 2010). Schließlich erarbeitete das *Government Accountability Office* (GAO) eine Übersicht über CE-Forschungsaktivitäten von US-Bundesinstitutionen (GAO 2010). Darüber hinaus hat in den USA kürzlich eine Arbeitsgruppe des *Bipartisan Policy Center* einen Bericht über die mögliche Wirksamkeit, Realisierbarkeit und die Konsequenzen von CE-Technologien sowie die Optionen des Risikomanagements präsentiert (Long et al. 2011). Führende Experten aus unterschiedlichen Bereichen entwickeln darin Empfehlungen für die US-Regierung bezüglich der Forschung an *Geoengineering* und Überwachungsstrategien. Interessant ist dabei, dass ein neuer Begriff *Climate Remediation* als Oberbegriff für diese Technologien eingeführt wird.

Auch im deutschsprachigen Raum signalisieren jüngste Studien und Tagungen ein wachsendes Interesse der Politik am Thema *Climate Engineering*. Mit einem Hintergrundpapier bewertet das Umweltbundesamt im Sommer 2011 die Maßnahmen hinsichtlich ihrer Realisierbarkeit, Wirksamkeit, Umweltverträglichkeit und möglicher Risiken, ordnet sie in die aktuelle Klimapolitik ein und erläutert die rechtlichen Rahmenbedingungen (Ginzky et al. 2011). Da zahlreiche Sekundärwirkungen zurzeit nicht zu klären oder vorherzusehen sind, plädiert das Umweltbundesamt für restriktive Kriterien und ein Moratorium. Im Oktober 2011 legte das Kiel Earth Institute eine vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte umfassende Sondierungsstudie über den Einsatz und die Regulierung von *Climate Engineering* vor, die einen Überblick über den aktuellen Forschungsstand gibt und der politischen Willensbildung und dem öffentlichen Diskurs eine erste Orientierung bieten soll (Rickels et al. 2011). Die sehr detaillierte Studie und die ihr zugrundeliegenden Einzelstudien geben einen umfassenden Überblick über die Interaktionen der naturwissenschaftlichen, ökonomischen, politischen, soziologischen, ethischen und rechtlichen Aspekte der CE-Debatte. In 2015 wurde ein von der Europäischen Kommission (7. EU-Rahmenforschungsförderungsprogramm) geförderter transdisziplinärer Bericht von europäischen Partnern am *Institute for Advanced Sustainability Studies e.V.* in Potsdam veröffentlicht (Schäfer 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 Oschlies (Geomar) am Kiel Earth Institute in Kiel koordiniert und legt, wie bereits die vorangegangenen Aktivitäten in 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.

Die CE-Debatte stellt sich nach wie vor sehr kontrovers dar, da die Technologien teilweise noch recht wenig verstanden sind und per Definition sehr deutliche und umfangreiche Eingriffe in die Stoffkreisläufe der Erde darstellen würden. Entsprechend wären diese Eingriffe mit sehr weitreichenden Nebenwirkungen verbunden, die auch große soziale und politische Folgen einschließen. Die Beantwortung der Frage, inwieweit diese Technologien Bestandteil der menschlichen Reaktionsstrategie

¹ Außerdem wurde vom *Science and Technology Committee* des britischen Parlaments in Zusammenarbeit mit dem *Science and Technology Committee* des US-Repräsentantenhauses ein Gutachten zur internationalen Regulierung von *Climate Engineering* veröffentlicht (STC 2010).

auf den Klimawandel sein sollten, erfordert aber vor allem die Berücksichtigung der gesellschaftlichen und politischen Dimensionen. Zentrale Fragestellung dieses Beitrages ist daher die Thematik „Risikobewertung, Bewertungsansätze und Entscheidungskriterien“. Zwei (zusammenhängende) Bereiche werden dabei erörtert. Zum einen wird dargelegt, wie Prozesse gestaltet sein können, auf Basis derer Entscheidungen für oder wider bestimmte CE-Technologie bzw. Entscheidung über das gewünschte Ausmaß eines CE-Einsatzes getroffen werden können. Dabei wird das Spannungsfeld zwischen vollständiger Beschreibung der Konsequenzen und Risiken einer Technologie und der Vergleichbarkeit der Analysen für verschiedene Technologien prominent diskutiert. Da Risiken aufgrund der Unsicherheiten über die Auswirkungen von CE-Einsätzen in solchen Analysen bzw. Entscheidungsfindungsprozessen eine solch herausgehobene Rolle spielen, erfolgt zudem eine Analyse möglicher Konsequenzen, Risiken und Konfliktpotentiale des *Climate Engineering*. Ausgehend von diesen Überlegungen wird eine vergleichende Kosten-Effektivitäts-Analyse für verschiedene CE-Technologien widergegeben und die Auswirkungen des *Climate Engineering* auf klimapolitische Handlungsoptionen analysiert. Diese Aspekte werden in Kapitel 3 behandelt, nachdem Kapitel 2 eine kurze Einführung in die Historie der Wettermodifikation bietet.

Neben der (ökonomischen) Auseinandersetzung mit den Risiken und Bewertungsmöglichkeiten des *Climate Engineering* steht als übergeordnete Frage für alle Disziplinen im Mittelpunkt, ob die Entwicklung von CE-Technologien sowie die Erforschung ihrer Nebeneffekte aus gesellschaftlicher Sicht wünschenswert und aus ethischer Sicht vertretbar ist, bzw. anhand welcher Kriterien über einen möglichen Einsatz dieser Technologien entschieden werden kann. Daher wird in Kapitel 4 kurz auf die ethische Dimension der CE-Debatte eingegangen. Im Anschluss wird in Kapitel 5 ein kurzer Überblick gegeben, welche uni-, mini- bzw. multilateralen Ansätze es im Rahmen der internationalen Regulierung für die Erforschung und den Einsatz von CE-Technologien gibt und welche Prinzipien für eine multilaterale Regulierung des CE-Bereiches gelten sollten. Zum Ende des Kapitels wird darauf eingegangen, welche konkreten rechtlichen und politischen Herausforderungen sich aus diesen Prozessen für die Bundesrepublik Deutschland ergeben. Die Arbeit schließt mit einer kurzen Zusammenfassung in Kapitel 6.

2 Geschichte des Climate Engineering

Jonas Dovern, Sebastian Harnisch, Wilfried Rickels, Jürgen Scheffran

Konkrete Ideen, das Klima oder vielmehr das Wetter gezielt zu beeinflussen, gehen weit bis ins 19. Jahrhundert zurück. Bei diesen Ideen standen aber vor allem landwirtschaftliche oder militärische Motive im Vordergrund, erst in der Mitte des 20. Jahrhunderts spielte auch die Möglichkeit, den Klimawandel zu beeinflussen, eine Rolle. Der Wetterhistoriker James R. Fleming hat diese Entwicklung untersucht und unterteilt sie in drei Phasen (Fleming 2004; Fleming 2006; Fleming 2007; Fleming 2010). Dabei beginnt die erste Phase im frühen 19. Jahrhundert und endet mit den ersten Versuchen zur Wolkenmodifikation in den 1940er Jahren, welche den Beginn der zweiten Phase markieren. Diese erstreckte sich bis in die späten 1970er Jahre, als durch die *United Nations Convention on the Prohibition of Military or Any Hostile Use of Environmental Modification Techniques* (ENMOD-Konvention) Wettermanipulation zur Kriegsführung verboten wurde und die bis heute anhaltende dritte Phase eingeläutet wurde.

Dabei beginnt bereits in der zweiten Phase auch die Entwicklung des *Climate Engineering* und die Abgrenzung zwischen Wetter- bzw. Klimamodifikation ist teilweise fließend. Aber auch wenn die Beschreibung der Versuche in der ersten Phase teilweise etwas anekdotenhaft wirkt, gibt sie doch einen guten Einblick in die Entwicklung der CE-Debatte, da zahlreiche der grundsätzlichen Probleme

bereits damals auftraten. Dabei ist auffällig, dass scheinbar nur in den Naturwissenschaften eine durchgehende Berücksichtigung des historischen Erkenntnisgewinns vorliegt, während Sozial-, Politik- und Rechtswissenschaften bislang nur sehr begrenzt auf die historischen Ereignisse zurückgreifen, um verschiedene mit *Climate Engineering* verbundene Aspekte zu untersuchen. In den folgenden Abschnitten werden basierend auf den Arbeiten von Fleming die drei Phasen der Wettermodifikation kurz vorgestellt, um dann auf die Entwicklung des *Climate Engineering* einzugehen.

Laut Fleming beginnt die erste Epoche im frühen 19. Jahrhundert, als über Eingriffe zur Erzeugung von Niederschlägen für die Landwirtschaft nachgedacht wurde oder über Eingriffe, die Flüsse im Sommer schiffbar halten sollten. Einer der ersten Vertreter dieser Epoche war James Espy (1785–1860), der Niederschläge durch große Feuer bzw. das Abbrennen von Waldflächen erzeugen wollte. Seine Ideen beschränkten sich nicht auf theoretische Überlegungen; vielmehr gab es bereits Ansätze, diese Ideen im relativ großen Maßstab zu testen. Allerdings zeigte sich bereits damals die Kontroverse in der Debatte über die Beeinflussung des Klimas oder des Wetters. So wurde ein konkreter Vorschlag für eine Ausschreibung im Jahr 1839 diskutiert, bei der eine Belohnung von 50 000 US-Dollar (USD) ausgelobt werden sollte, die für denjenigen fällig würde, dem es gelänge, den Fluss Ohio zwischen Pittsburgh und seiner Einmündung in den Mississippi während der Sommermonate schiffbar zu halten. Es konnte sich aber keine politische Mehrheit für die Ausschreibung finden und die Gegner bezeichneten die Idee schlichtweg als Unfug. So konnte Espy seine Ideen – abgesehen von einigen kleinen selbstfinanzierten Versuchen – nicht weiter testen und geriet zunehmend ins wissenschaftliche Abseits. Nichtsdestotrotz sind seine Überlegungen heute nicht in Vergessenheit geraten, da seine Ideen Eingang in der Literatur fanden.²

Der nächste Vorschlag zur künstlichen Erzeugung von Niederschlägen stützte sich auf der Beobachtung, dass sich nach Artilleriegefechten in den nachfolgenden Tagen häufig Niederschläge einstellen. Diese Zusammenhänge wurden 1871 von Edward Powers niedergeschrieben (Powers 1871). In der Folge wurden vom US Kongress finanzierte und von der Marine beaufsichtigte Tests durchgeführt, ohne dass es nennenswerte Ergebnisse gab. Bereits zeitgenössische Beobachter stellten die von Powers dargestellten Zusammenhänge als nicht belastbar dar, da Artilleriegefechte auf Perioden guten Wetters gelegt wurden. Nichtsdestotrotz hatte die Theorie weiterhin Bestand und eine lange Dürreperiode in den 80er Jahren des 19. Jahrhunderts führte dazu, dass der Kongress erneut 10 000 USD für Experimente in Texas bewilligte. Allerdings waren die Ergebnisse erneut ernüchternd. Es konnte nur festgehalten werden, dass sich bei günstigen Ausgangsbedingungen zwar Regen einstellen konnte, bei trockenem Wetter aber kein Regen erzeugt wurde. Auch wenn die Zusammenfassung der Ergebnisse heute eher eine Anekdote darstellt, deuten sie bereits auf das grundsätzliche Problem hin, die Auswirkungen der Eingriffe von der natürlichen Variabilität zu unterscheiden.

In dieser ersten Epoche wird von Fleming außerdem der „Regenmacher“ Charles M. Hatfield hervorgehoben. Seinen Versuchen, Regen durch Ausbringung einer geheimen Substanz durch hohe Türme zu erzeugen, folgte die große Flutkatastrophe in San Diego im Frühjahr 1916. In dieser Flut traten zahlreiche Flüsse über ihre Ufer, verbunden mit einigen Dutzend Flutopfern und entsprechenden negativen Konsequenzen für die Landwirtschaft. Dieser unglückliche Zufall zeigte aber bereits ein grundsätzliches Problem der Wettereingriffe, nämlich dass sich Extremereignisse nicht mehr kausal zuordnen lassen und mögliche Kompensationsregeln sehr schwierig machen. So ist es nicht überraschend, dass die Stadt San Diego, die einen Kontrakt mit Hatfield hatte, jegliche Verbindung abstritt und auch nicht die ursprünglich vereinbarte Zahlung vornahm.

Interessant im Kontext dieser ersten Wetter- und Regenmacher ist aber vor allem, dass deren Versuche bereits von Beginn auch durch kritische Beiträge in den Medien begleitet wurden. In diesen Beiträgen wird darauf hingewiesen, dass der Menschheit solche Eingriffe in das Wetter oder Klima nicht

² So wurde beispielsweise die Möglichkeit, Regen durch das Abbrennen von Kakteenfeldern zu erzeugen, von Karl May in seinen Erzählungen aufgegriffen.

zustehen. Sollten diese Eingriffe tatsächlich funktionieren, bliebe außerdem nach wie vor die Frage nach dem „richtigen“ Wetter bzw. der „richtigen“ Menge des Regensfalls ungeklärt.

Die zweite Phase der Wettermodifikation hatte bereits größere Bedeutung für das *Climate Engineering*, da in dieser Phase einer der wesentlichen Technologien das Wolkensäen war. In einer privatwirtschaftlichen Initiative begann u.a. Vincent Schaefer von *General Electric Research* diese Möglichkeiten in Labor- aber auch Feldversuchen zu untersuchen. Dabei wurden Eiskerne durch Flugzeuge in Wolken eingesät. Die ersten Ergebnisse schienen sehr vielversprechend im Hinblick auf atmosphärische Feuchtigkeitskontrolle und entsprechend euphorisch fasste der damalige Experimentleiter Irving Langmuir die Ergebnisse so zusammen, dass sehr bald wohl die großskalige Wetterbeeinflussung möglich sei, inklusive der Umleitung bzw. Abschwächung von Hurrikanen, der Erzeugung von Schneestürmen sowie der Gewinnung von neuem fruchtbarem Farmland. Erneut zeigt sich hier die Parallele zum *Climate Engineering*, indem zu Beginn der Entwicklung die technischen Möglichkeiten zur Beeinflussung der Natur als nahezu unbegrenzt dargestellt wurden, obwohl man noch so gut wie nichts über die Nebeneffekte wusste. Dieses Unwissen ließ dann die Forschungsabteilung von General Electric dann aber auch die Forschung an das Militär überstellen. Auf jeden Fall aber wurde bereits in dieser frühen Phase erkannt, dass diese Modifikation einen relativ großen Hebel ermöglicht, da nur kleine Mengen Nukleationskerne, wie trockenes Eis oder Silberjodid, verwendet werden müssen, um relativ große Effekte zu erzeugen und große Energiemengen freizusetzen. Dieses Potential zur Wetter- und Klimabeeinflussung wurde in dieser frühen Phase aber vor allem als Potential für die Kriegsführung gesehen. Insbesondere im Kalten Krieg erschienen sich neue Optionen zu ergeben, da in Europa modifizierte Wolken durch die vorherrschende Windrichtung nach Osten getrieben würden. Durch die Wolkenmodifikation ließen sich gegnerische Truppenbewegungen behindern und Luftangriffe und -aufklärung erleichtern oder auch erschweren. Aber bereits in dieser frühen Phase wurde bereits in einer Dimension über die Wettermodifikation nachgedacht, die es erlauben würde, die Landwirtschaft und die Ökonomie des Gegners zu schwächen. Entsprechend schnell erreichte das Thema in verschiedenen militärischen bzw. politischen Ebenen hohe Priorität, und es wurde vorgeschlagen, dass Forschung in der Größenordnung eines neuen Manhattan Projekts zu starten sei.

Diese erste Euphoriewelle legte sich aber wieder etwas, als Probleme auftraten, die Ergebnisse von Experimenten zu wiederholen bzw. die notwendigen Ausgangsbedingungen zu identifizieren. Entsprechend wurden die ersten Ergebnisse und Einschätzungen der Wolkenpioniere mittlerweile wieder kritischer gesehen, und der Fokus rückte stärker auf die Beeinflussung des lokalen Wetters. Eine privatwirtschaftliche Initiative führte Wolkenmodifikationen im mittleren Westen der USA durch und kassierte als Gegenleistung von den Landwirten und Gemeinden für das erzeugte Wetter jährlich zwischen 3 und 5 Mio. USD. Allerdings kam es nicht zu einem nachhaltigen Geschäftserfolg, da es relativ schnell Widerstände und Schadensersatzforderungen gab. Im Hinblick auf die Zuordnung von Wetterereignissen und damit verbundenen Schadensersatzforderungen ist die Stadt New York ein interessantes Beispiel. Die Stadt hatte einen privaten Wettermacher, Wallace Howell, beauftragt, die Wasserreservoirs der Stadt zu füllen. Zu Beginn wurde Howell von offizieller Seite Erfolg mit seinen Bemühungen beschieden, als es in der Folge aber zu Wasser- und Flutschäden kam, die 169 Klagen mit einem Schadensersatzvolumen von 2 Mio. USD nach sich zogen, änderte die Stadt ihre Position. Sie ließ Untersuchungen durchführen, die zeigten, dass die Wolkenmodifizierung von Howell ineffizient war und nicht Ursache für die Flutschäden war. Auf jeden Fall wurde als Folge eine gesetzliche Verfügung erlassen, die weitere Wetterbeeinflussung im Einzugsgebiet von New York untersagte und somit ein erstes nationales Verbot von im weitesten Sinne *Climate Engineering* aussprach.

Nach diesen Schwierigkeiten war es aber erneut ein meteorologisches Extremereignis, das den Wunsch nach der Wetterbeeinflussung wieder stärker werden ließ. Nach der langen Trockenperiode in den frühen 1950er Jahren im Westen der USA, wurde der private Wettermacher Irving Krick von großen Farm- und Viehzuchtbetrieben beauftragt, das Wetter durch Wolkenmodifikation in Teilen im Westen der USA, u.a. im Gebiet des Columbia Flusses, zu beeinflussen. Erneut wurden hier dem Wet-

termacher zu Beginn Erfolge bescheinigt. So nahm angeblich die Wassermenge im Columbia Fluss um bis zu 83 Prozent zu. Vom nationalen Wetterbüro wurden diese Erfolge aber nicht bestätigt, so dass auch dieser Versuch nicht als Erfolg dokumentiert ist. Nichtsdestotrotz hatte die Firma von Irving Krick in ihrer Hochzeit bis zu 130 Mio. Hektar unter Vertrag für Wettermodifikationen.

Die Wetter- und Wolkenmodifikation erreichte ihren Höhepunkt zwischen den Jahren 1967 und 1972. In diesem Zeitraum wurden insgesamt 2 600 Flüge durch den US-amerikanischen *Air Weather Service* (AWS) durchgeführt. Allerdings fanden diese Flüge weder über dem Gebiet der USA statt noch unter Kenntnisnahme der Öffentlichkeit. Bei dieser Wolkenmodifikation handelte es sich um ein militärisches Geheimprojekt, bei dem insgesamt 47 000 Silberjodid-Geschosse in Wolken über Nord- und Südvietnam, Laos und Kambodscha geschossen wurden. Mit diesen Modifikationen sollten die Transporte auf dem Ho Chi Minh Pfad durch Erzeugung von zum Beispiel Starkregen eingeschränkt werden. Für diese Flüge fielen jährlich Kosten in Höhe von 3,6 Mio. USD an und auch die Thailändische Regierung wusste nichts über den Zweck dieser Flüge, auch wenn die Flugzeuge von ihrem Staatsgebiet (Udon) starteten. Zwar wurde bereits 1971 über diese Aktivitäten in der US-Presse berichtet bzw. spekuliert, allerdings wurden sie von offizieller Seite nach wie vor bestritten. Erst nach Beendigung der Aktivitäten wurden sie auch offiziell bekannt. Im Jahr 1973 wurde vom US-Senat eine Resolution verabschiedet, in der umweltbezogene oder geophysische Beeinflussungsaktivitäten zur Kriegsführung unabhängig vom Zielort verboten wurden. Dieses Verbot wurde 1978 durch die ENMOD-Konvention im Rahmen der Vereinten Nationen international bestätigt. Damit kam die zweite Phase der Wettermodifikation zum Ende, und gleichzeitig wurde auch Forschungsförderung zu diesem Thema fast vollständig eingestellt.

In der dritten Phase fasst Fleming die mehr oder wenigen aktuellen Aktivitäten zur Wettermodifikation in der Neuzeit zusammen. In 2003 hat der National Research Council (NRC) einen Report mit dem Titel „*Critical issues in weather modification research*“ veröffentlicht (NRC 2003). In dem Report wird darauf eingegangen, dass zukünftige Probleme wie Wasserknappheit, Dürreperioden, Beeinträchtigung durch Stürme oder auch der Klimawandel als Rechtfertigung für die Forschung zur Wettermodifikation herangezogen werden können. Der Report hebt hervor, dass nach wie vor keine wirklich überzeugenden wissenschaftlichen Beweise für die Effektivität der Wettermodifikation vorliegen. Trotzdem wirft der Report die Frage auf, ob zum Beispiel Dürren in verschiedenen Gebieten der Welt in den nächsten Jahrzehnten durch großflächige Bewässerungsanlagen oder durch Wetterbeeinflussung gemildert werden sollen. Aus dieser Frage wird geschlussfolgert, dass weitere Forschung zur Wettermodifikation notwendig ist. Der Report diskutiert darüber hinaus auch Fragen, die in der heutigen CE-Debatte relevant sind, z.B. welche Institutionen die Forschung überwachen soll und ob großskalige Feldtests notwendig sind. Weitaustr optimistischer ist die US-amerikanische Luftwaffe, von der Stimmen bzw. Prognosen öffentlich bekannt wurden, dass bereits 2025 eine Beeinflussung des Wetters möglich sein könne, die es erlauben würde, die Kommunikations- und Beobachtungstechnologien andere Nationen signifikant einzuschränken. In dieser Phase der Wettermodifikation ist sicherlich noch die private Firma Dyn-O-Mat aus Florida zu erwähnen, die sein Mittel Dyn-O-Gel damit beworben hat, dass es in der Lage ist, Hurrikanen oder Gewittern so viel Feuchtigkeit zu entziehen, dass den Unwettern die Kraft genommen wird. Dieses Mittel bzw. die damit verbundenen Möglichkeiten wurden relativ schnell auch wieder im Hinblick auf die militärischen Einsatzmöglichkeiten diskutiert, da die Bekanntmachung in die Zeit des ersten Irakkriegs fiel (z.B. Hemschemeier 2003).

In diese dritte Phase fällt auch die Wolkenmodifikation mit Silberjodid durch China während der Olympischen Spiele 2008 in Peking, um sicherzustellen, dass die Veranstaltung nicht durch Regen gestört wird. Dabei beschränkte oder beschränkt sich die chinesische Wetterbeeinflussung nicht nur auf die olympischen Spiele. Nach Angaben der *China Meteorological Administration* sind mit dem Ziel, Wolken zu impfen, zwischen 1995 und 2003 insgesamt 4 231 Flüge unternommen worden. Außerdem sei China im Besitz von 6 781 Artilleriekanonen und 4 110 Raketenwerfern für die Regenerzeugung (Lubbadeh 2008). Neben den hier genannten Aktivitäten in den USA und China gibt es aber

auch noch zahlreiche andere Länderforschung zur Wetterkontrolle. Laut dem bereits oben erwähnten Berichts des NRC gibt es noch in 22 weiteren Ländern Programme zur Wetterkontrolle (Lubbadeh 2008). Trotz dieser weltweiten Anstrengungen ist nach wie vor wissenschaftlich ungeklärt, inwieweit das Wetter beeinflusst werden kann; essentielle Funktionsmechanismen der Wolken sind noch unverstanden. Entsprechend beschränken sich viele der Wetterprogramme darauf, Wolken, die ohnehin irgendwann zu Regen führen würden, früher abregnen zu lassen. Entsprechend hat die Zusammenfassung der ersten Wetterexperimente aus dem 19. Jahrhundert immer noch Bestand, bei denen festgehalten wurde, dass sich bei günstigen Ausgangsbedingungen zwar Regen einstellen, bei trockenem Wetter aber kein Regen erzeugt werden kann.

In der zweiten und insbesondere in der dritten Phase ist die Grenze zwischen Wetterbeeinflussung und *Climate Engineering* bereits fließend. So wären großskalige Wolkenmodifikationen zur Erzeugung von Regen sicherlich vom Umfang kaum von Wolkenmodifikationen zur Erhöhung der Albedo auf dem jeweiligen Gebiet zu unterscheiden. So verwundert es auch nicht, dass es bereits in der frühen zweiten Phase der Wettermodifikation Überlegungen im Hinblick auf die Dimension der Beeinflussung gab, die sehr deutlichen *Climate-* bzw. *Geo-Engineering* Charakter hatten. Bereits 1948 verkündete Joseph Stalin seine Vorstellung, dass mit Hilfe dieser Mittel Natur, Wetter und Klima zum Wohle der Sowjetunion zu beeinflussen wären (Burke 1956). In der Hochphase des Kalten Krieges publizierten Autoren von mindestens 19 Forschungsinstituten in der Sowjetunion Bücher oder Artikel zur Wetter- und Klimakontrolle. Den Artikeln war gemeinsam, dass sie teilweise Ausblicke über die zukünftigen Entwicklungen gaben, die deutlich machten, welche Möglichkeiten der Einflussnahme angedacht wurden. So sollte ein zweiter Nil in Nordafrika die Sahara bewässern, das arktische Eis aufgeschmolzen werden und die Beringstraße umgeleitet werden (z.B. Rusin und Flit 1960; Borisov 1967). Adabashev benutzte in seiner Arbeit für diese Maßnahmen den Begriff *Global Engineering* (Adabashev 1966). Diese historischen Überlegungen zeigen aber auch die größere Breite des Begriffs *Geo-Engineering*, da eben auch Maßnahmen wie das Errichten von Deichen, das Umleiten von Flüssen und dergleichen angedacht wurden. Wichtig ist aber zu erwähnen, dass auch in der frühen Phase es bereits zahlreiche Stimmen gab, die darauf hinwiesen, dass solche Technologien nicht in die Hände von verantwortungslosen oder nicht friedlichen Staaten fallen dürften.

Natürlich beschränken sich die Engineering-Phantasien nicht nur auf die russische Seite. Wie mittlerweile relativ gut bekannt ist, wurden US-Präsident Johnson bereits 1965 Vorschläge unterbreitet, bei denen dem Klimawandel durch die Erhöhung der Albedo begegnet werden sollte. Im dem Report *Restoring the quality of our environment* wurde vorgeschlagen, dass durch Ausbringung von reflektierendem Material auf dem Ozean die Albedo hinreichend erhöht werden kann, um dem zukünftigen Klimawandel zu begrenzen, wobei die jährlichen Kosten für diese Aktivität auf 500 Mio. USD geschätzt wurden (President's Science Advisory Council 1965).

Marchetti untersuchte 1977 die Möglichkeit, die ozeanische CO₂-Aufnahme durch die direkte Injektion von Kohlenstoff in den Ozean zu beschleunigen, und prägte für diese technologische Möglichkeit erstmalig den Begriff *Geo-Engineering* im Kontext des Klimawandels (Marchetti 1977). Zu selben Zeit erschienen die ersten Überlegungen von Budyko, die Stratosphäre durch Aerosoleinbringung zu beeinflussen (Budyko 1977), die er später noch weiter ausführte (Budyko 1982). Im Hinblick auf die direkte Senkung der bereits bestehenden atmosphärischen Kohlenstoffkonzentration konzentrierte sich die Forschung ab den 1980er Jahren vor allem auf Möglichkeiten zur Erhöhung der natürlichen biologischen Aktivität in der terrestrischen und ozeanischen Kohlenstoffsénke. Für die Erhöhung der terrestrischen CO₂-Aufnahme wurden vor allem die Möglichkeiten der Aufforstung und der Veränderung der Landnutzung untersucht, die später in begrenztem Umfang sogar Teil des Kyoto-Protokolls wurden. Für die Erhöhung der ozeanischen CO₂-Aufnahme wurde vor allem die Eisendüngung untersucht. Innerhalb der Diskussion zur Eisenhypothese postulierte John Martin Anfang der 1990er Jahre provokant, „[g]ive me a half tanker of iron and I'll give you the next ice age“ (z.B. Martin 1990). Die verschiedenen Möglichkeiten für Eingriffe in den Strahlungshaushalt bzw. den Kohlenstoffkreislauf der

Erde wurden 1992 im Report *Policy implications of greenhouse warming* zusammengefasst (CSEPP 1992). Auch wenn die Arbeiten zur direkten Beeinflussung der Strahlungsbilanz (z.B. CSEPP 1992) anfänglich kaum in den Fokus der wissenschaftlichen Diskussion über die Reaktion auf den anthropogenen Klimawandel gelangten, veröffentlichte 2003 das US-Pentagon einen kontroversen Report, in dem es basierend auf dem eher nüchtern Report des National Research Council (NRC 2002), empfiehlt, dass die Regierung *Geo-Engineering* Optionen untersuchen soll, die es erlauben, das Klima zu kontrollieren und den Klimawandel zu begrenzen (Schwartz und Randall 2003). In 2004 wurde am Tyndall-Zentrum für Klimaforschung in Kooperation mit dem MIT eine Konferenz mit dem Titel *Macro-engineering options for climate change management and mitigation* abgehalten. Hier wurde zwar die Priorität von drastischer Emissionskontrolle betont, trotzdem wurden im Hinblick auf die nicht zu erwartende Realisierung dieser Emissionskontrolle die verschiedenen Engineering-Optionen diskutiert, evaluiert und eingestuft. Es wurde angeregt, Pilotprojekte zu starten, um die Forschung näher an den Mainstream zu bringen. Auf dieser Konferenz wurden praktisch schon die Technologien vorgestellt, die später im Bericht der Royal Society und in der Sondierungsstudie für das BMBF diskutiert wurden (Royal Society 2009; Rickels et al. 2011). Zusätzlich wurden aber auch Optionen diskutiert, bei denen weder die atmosphärische CO₂-Konzentration beeinträchtigt noch kompensierend in den Strahlungshaushalt eingegriffen wird, sondern bei denen mit Hilfe technischer Eingriffe die Anpassung an den Klimawandel erleichtert wird, indem Flüsse oder Gletscherschmelzwasser umgeleitet werden, um z.B. die Ozeanzirkulation zu stabilisieren oder Migrationskorridore für Tiere einzurichten.

In den weiteren Fokus gelangten diese technischen Möglichkeiten aber erst mit der Arbeit von Paul Crutzen (2006), der die Möglichkeit der technischen Injektion von Schwefelpartikeln in die Stratosphäre wieder aufgriff. Seine Berechnungen basieren auf einem natürlichen Experiment zur direkten Beeinflussung der Strahlungsbilanz: Die Injektion von Schwefel durch die Eruption des Vulkans Pinatubo im Jahr 1991 mit der damit verbundenen globalen Abkühlung der globalen Temperatur um 0,5° C im Folgejahr (Bluth et al. 1992; Wilson et al. 1993; Lacis und Mishchenko 1995). Crutzen (2006) hebt hervor, dass im Hinblick auf die zunehmende Kontrolle von vor allem bodennahen Schwefelemissionen bei gleichzeitig ausbleibenden notwendigen Reduktionen der Treibhausgasemissionen möglicherweise die Einbringung von deutlich kleineren Mengen Schwefel in die Stratosphäre den kühlenden Effekt dieser Aerosole wieder herstellen könnte. Als Reaktion auf die nachfolgenden Publikationen und die zunehmende Bedeutung in der öffentlichen Diskussion erschien im Jahr 2009 der Report *Geoengineering the Climate* der Royal Society. In den folgenden Jahren erschienen zahlreiche weitere Übersichtsberichte und im fünften Sachstandsbericht des Weltklimarats werden ebenfalls verschiedenen Aspekte des *Climate Engineering* diskutiert.

3 Risikobewertung, Bewertungsansätze und Entscheidungskriterien

Daniel Barben, Timo Goeschl, Sebastian Harnisch, Daniel Heyen, Nils Matzner, Jürgen Scheffran

CE-Technologien und ihre Erforschung können möglicherweise eine sinnvolle Handlungsoption für die Bekämpfung des Klimawandels darstellen. Einer Entscheidung für Erforschung und/oder Einsatz muss daher eine Bewertung der Sinnhaftigkeit vorangestellt werden. Um zu einer für politische Entscheider hilfreichen Einschätzung hinsichtlich der Sinnhaftigkeit von CE-Maßnahmen zu kommen, ist ein mehrstufiger heuristischer Prozess notwendig, in dem Kriterien bestimmt werden können, wie die Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Maßnahmen bezüglich dieser Kriterien gemessen und auf dieser Grundlage eine Entscheidung für oder wider eine Technologie bzw. eine Entscheidung über das gewünschte Ausmaß einer solchen Maßnahme getroffen werden kann.

An den heuristischen Prozess selbst können zwei prinzipielle Qualitätskriterien angelegt werden. Ein Qualitätskriterium ist das der Vollständigkeit: Der heuristische Prozess soll in der Lage sein, ein möglichst umfassendes Bild über das Wesen der unterschiedlichen CE-Technologien und die damit verbundenen Konsequenzen und Risiken, sowohl wünschenswerter als auch nicht wünschenswerter Art, herzustellen. Alle für die Entscheidung relevanten Aspekte sollten in der Lage sein, in die vergleichende Bewertung der Handlungsoptionen einzugehen. Ein typisches Beispiel für diese Art des Vorgehens ist die Risikobewertung, wie sie im Abschnitt 3.1 dieses Kapitels vorgestellt wird.

Das zweite Qualitätskriterium, das an den heuristischen Prozess angelegt werden kann, ist das der Vergleichbarkeit (Kommensurabilität): Der heuristische Prozess soll in der Lage sein, beim Vergleich zweier oder mehrerer konkurrierender Handlungsalternativen zu einer Entscheidung zu kommen, welche der CE-Technologien vorzuziehen ist. Ein klassisches Beispiel eines auf Vergleichbarkeit ausgerichteten Verfahrens ist die Kosten-Wirksamkeitsanalyse, der sich Abschnitt 3.2 widmet. Schon aus Gründen der Logik müssen diese Entscheidungen untereinander ganz elementaren Konsistenzkriterien genügen. Das Kriterium der Vergleichbarkeit stellt sicher, dass der heuristische Prozess tatsächlich in der Lage ist, die Entscheidungsfindung methodisch zu unterstützen.

In Entscheidungssituationen mit begrenzter Komplexität, beispielsweise der Evaluierung von kleinskaligen Projekten, ist es heuristischen Prozessen möglich, sowohl vollständig zu sein als auch eine ausreichende Vergleichbarkeit herzustellen. Klassische Methoden wie die Kosten-Nutzen-Analyse können in diesen Fällen vollinhaltlich durchgeführt werden. In Bewertungssituationen, die mit begrenzten Ressourcen und fehlenden Erfahrungswerten eine Entscheidung über neuartige Technologien mit komplexen, multidimensionalen Effekten generieren sollen, besteht dagegen im Entscheidungsprozess zwischen den Kriterien der Vollständigkeit und der Vergleichbarkeit ein klares Konkurrenzverhältnis. In diesem Fall kann man sich daher nur für eine gut begründete Abwägung aus Vollständigkeit und Vergleichbarkeit entscheiden, nicht aber für eine gleichzeitige Erfüllung beider Kriterien. Die besten Möglichkeiten einer solchen Abwägung bestimmen den Spannungsbogen zwischen Vollständigkeit und Vergleichbarkeit, auf dem sich jeder konkrete Bewertungs- und Entscheidungsprozess zu CE-Maßnahmen verorten muss. Unterschiedliche, auf die Frage von CE-Maßnahmen anwendbare Ansätze dazu präsentiert Abschnitt 3.3. Dazu wird zuerst auf Ansätze aus der Praxis eingegangen, um dann allgemeine Kriterien zu diskutieren, die einen normativen Minimalrahmen vorgeben, um im Abschluss noch etwas allgemeiner auf die möglichen Auswirkungen von *Climate Engineering* auf die existierenden klimapolitischen Handlungsoptionen einzugehen.

3.1 Vollständigkeit gewährleistende Bewertungsprozesse für CE-Technologien

3.1.1 Mögliche Konsequenzen, Risiken und Konfliktpotenziale von Climate Engineering

Ausgangspunkt einer Bewertung von *Climate Engineering* ist die Betrachtung und Diskussion möglicher Konsequenzen, die einer Bearbeitung mit Bewertungsansätzen und Entscheidungskriterien zugeführt werden sollen. Im Folgenden sollen mögliche Konsequenzen und Risiken des *Climate Engineering* in den Blick genommen werden. Dabei ergibt sich als grundsätzliches Problem, dass die Nebenfolgen von CE-Einsätzen, aber auch die Effekte des Klimawandels, die es dagegen abzuwägen gilt, mit großen Unsicherheiten verbunden sind (z.B. Warburton et al. 1995). Eine adäquate Risikoanalyse setzt voraus, dass diese Unsicherheiten zunächst in kalkulierbare Risiken umgewandelt werden müssen (Stirling 2008). Da aber bei vielen möglichen Konsequenzen sowohl Eintrittswahrscheinlichkeit als auch Ausmaß der Konsequenz schwer abzuschätzen sind, ist die Möglichkeit, quantifizierbare Ergebnisse aus Risikoanalysen abzuleiten, derzeit noch begrenzt.

Mögliche Konsequenzen sind in diesem Zusammenhang zu verstehen als die Ereignisse oder Ereignissequenzen, die durch *Climate Engineering* ausgelöst werden können. Der betrachtete Horizont

möglicher Ereignisse bemisst sich zum einen an der Plausibilität der Ereignisse, unter Zugrundelegung von Erfahrungen und logischen Schlussfolgerungen, zum anderen an der Relevanz für die jeweiligen Akteure. Plausibilität und Relevanz müssen sich im gesellschaftlichen Diskursprozess klären und behaupten. Im Sinne einer Konkretisierung versucht die Risikoanalyse, möglichen Konsequenzen Verlustwerte und Wahrscheinlichkeiten zuzuweisen, was bei komplexen und unsicheren Problemen nicht immer möglich ist. Insofern ist die Risikoanalyse von *Climate Engineering* Teil einer umfassenderen Möglichkeits- und Konsequenzanalyse.

Da es bislang nur wenige Erfahrungen mit *Climate Engineering* (und keine mit großskaligen CE-Einsätzen) gibt, ist eine Untersuchung der möglichen Konsequenzen und der damit verbundenen Risiken noch recht hypothetisch. Ein systemischer Ansatz zur Eingrenzung des Möglichkeitsfeldes versucht, plausible Wirkungsketten und Handlungspfade zu betrachten, die sich aus dem Einsatz verschiedener Techniken und Verfahren in bestimmten Umgebungen ergeben können. Sofern mögliche Auswirkungen auf natürliche und soziale Systeme dadurch besser nachvollziehbar werden, können verschiedene Optionen und Szenarien miteinander (und mit anderen klimapolitischen Strategien) verglichen werden, wobei als Bezugspunkt die Gefahren, Risiken und Konfliktpotenziale des Klimawandels dienen. Dies wäre eine Voraussetzung, um geeignete Entscheidungspunkte und Reaktionsmechanismen zu erkennen, aus denen dann Anhaltspunkte für eine Regulierung gewonnen werden könnten, im Kontext der UNFCCC-Verpflichtung zur Vermeidung eines gefährlichen Klimawandels (Ott et al. 2004).

Dieses Ideal lässt sich bei *Climate Engineering* derzeit aber nur bedingt realisieren. Viele der zugrundeliegenden naturwissenschaftlich-technischen Gesetzmäßigkeiten sind zwar bekannt oder lassen sich im Einzelnen untersuchen (z.B. Komponenten und Wechselwirkungen des Klimasystems). Zudem gibt es vielfältige Kenntnisse darüber, wie Eingriffe des Menschen auf das Erdsystem einwirken (z.B. von CO₂-Emissionen oder Aerosolen auf die Atmosphäre). Daraus allerdings eindeutige Prognosen oder konkrete Risikoabschätzungen über *Climate Engineering* ableiten zu wollen, wäre zum jetzigen Zeitpunkt vermessen. Von vielen Wirkungsketten sind nur Bruchstücke bekannt und je weiter man in der Ereignissequenz voranschreitet (zeitlich, räumlich, Verbindung mit sozioökonomischen und politischen Dimensionen), umso schemenhafter werden die möglichen Zukunftspfade und umso weniger eignen sie sich als Grundlage von Bewertungen, Entscheidungen, Reaktionen und Strategien. Da es bei *Climate Engineering* um die Steuerung des globalen Klimasystems geht, um Prozesse, die mehrere Jahrhunderte in die Zukunft reichen, und um eine Neubestimmung des gesamten Mensch-Natur-Verhältnisses, ist hier der sichtbare Ereignishorizont schnell erreicht. Hohe Unsicherheit, Komplexität und Ambiguität tragen das ihre dazu bei, den Ausblick auf die Zukunft zu fragmentieren. Ein daraus abgeleitetes Vorsichts-Prinzip ist es, die gewählten Schritte und ihre Geschwindigkeit an den jeweils sichtbaren Handlungsraum anzupassen, um nicht unerwartete oder unbekannte Gefährdungen zu provozieren. Mit neuen Instrumenten und Erkenntnissen kann der Handlungsraum zugleich erweitert werden.

Unter diesem Aspekt ist es sinnvoll, das Möglichkeitsfeld soweit auszuleuchten, wie es beim derzeitigen Forschungsstand geht, und verschiedene Konsequenzen und Risiken zu klassifizieren (vgl. Renn et al. 2011; Scheer und Renn 2010; Robock 2008a; Grunwald 2010; Corner und Pidgeon 2010). Dabei werden auch mögliche Konfliktfelder benannt, die durch *Climate Engineering* berührt werden.

Direkte Auswirkungen auf die Umwelt: Die verschiedenen CE-Technologien wirken jeweils lokal in sehr unterschiedlicher Weise auf die verschiedenen Umgebungen ein (z.B. auf Atmosphäre, Ozean, Wasserkreislauf, Biodiversität, Wälder, Landwirtschaft, Städte), um die intendierte globale Wirkung zu erzielen. Sie verändern damit die lokale Umwelt, entweder direkt oder indirekt über die dem jeweiligen Mechanismus zugrundeliegenden Wirkungsketten. Alle weiteren Systeme, die mit diesen Wirkungsketten verbunden sind (insbesondere Ökosysteme), verändern sich dadurch mit, was Risiken für die menschliche Umwelt und Gesundheit erzeugen kann. Entsprechende Risiken können bereits

bei Feldexperimenten für Forschungszwecke auftreten, wenn auch in kleinerem Umfang als bei der vollen Implementierung.

Konsequenzen der beabsichtigten Wirkungen auf das Klimasystem: Hierzu gehören zu erwartende und vorhersehbare Folgen, Nebeneffekte und Externalitäten, die als Folge der gewünschten Anpassung klimatischer Variablen entstehen, insbesondere von globaler Mitteltemperatur und Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre. Analog zu den Folgen des Klimawandels geht es hier um die Folgen des inversen Klimawandels, also z.B. um eine Änderung von Niederschlagsmustern, Ökosystemen, Ernten und demographischen Mustern als Folge einer künstlichen Abkühlung. Als Beispiel wird häufig das Verschwinden des blauen Himmel bei Einsatz von RM-Verfahren genannt.

Unbeabsichtigte Folgen für das Klimasystem: Im Unterschied zu den möglichen beabsichtigten Konsequenzen können sich unerwartete und unvorhersehbare Nebeneffekte und Externalitäten ergeben, die nicht ins Kalkül gezogen wurden. Hier spielen Unsicherheiten und Komplexitäten im Klimasystem eine Rolle, die sich einer Vorhersage und Kontrolle entziehen. Ein Beispiel wäre es, wenn in Afrika oder im Mittelmeerraum die Zahl der Dürren unerwartet zunähme oder *Climate Engineering* unerwartet Kippelemente im Klimasystem anstieße (z.B. Ausbleiben des Monsun), wodurch eine Kaskade von Ereignissen ausgelöst würde.

Konsequenzen aus der Einführung von CE-Maßnahmen: Um *Climate Engineering* zu realisieren, bedarf es einer Infrastruktur und erheblicher Anstrengungen und Aktivitäten, die Ressourcen und Mittel in Anspruch nehmen und bestehende natürliche und sozioökonomische Strukturen verändern. Die für die Realisierung von *Climate Engineering* aufgewendeten Ressourcen verbrauchen Energie und Rohstoffe, verbrauchen Landflächen, die möglicherweise in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion stehen, belasten die Umwelt und setzen Emissionen frei, die selbst wiederum das Klima belasten können. Die eingesetzten Mittel und Investitionen können nicht für andere gesellschaftlich relevante Zwecke ausgegeben werden, insbesondere nicht für alternative Energien und emissionsenkende Handlungspfade, was die bisherige Klimapolitik untergraben kann. Gesellschaftliche Widerstände gegen CE-Maßnahmen können Proteste und Konflikte auf jeder Stufe der Implementierung von *Climate Engineering* provozieren (Antizipation, Forschung, Entwicklung, Erprobung, Standortsuche, Einsatz).

Reaktionen und Wechselwirkungen im internationalen politischen System: Da jede Weltregion in unterschiedlicher Weise vom Klimawandel wie auch von *Climate Engineering* betroffen wäre, können dadurch Widerstände von Staaten provoziert werden, die sich durch Risiken betroffen fühlen oder die als mögliche Gewinner des Klimawandels nun Nachteile befürchten. Ein Grundproblem ist die asymmetrische und ungerechte Verteilung von Vorteilen, Kosten und Risiken von Eingriffen ins Klimasystem, die zu Sicherheitsdilemmata und Konflikten im internationalen System führen kann. Diese könnten sich auf unglückliche Weise mit den befürchteten Sicherheitsrisiken des Klimawandels verbinden (WBGU 2007; Scheffran und Battaglini 2011). Denkbar wären Spannungen in der internationalen Zusammenarbeit, diplomatische Krisen, gewalttätige Aktionen gegen CE-Maßnahmen, Terrorismus und bewaffnete Konflikte. Dabei können sich zwischenstaatliche Auseinandersetzungen mit innergesellschaftlichen Konflikten verbinden, z.B. wenn die USA unter dem Druck von Dürren im Mittleren Westen einseitige CE-Maßnahmen ergriffen, die von China oder Russland abgelehnt würden, weil diese dort zu landwirtschaftlichen Einbußen oder Naturkatastrophen führten. Besonders problematisch erscheint der Missbrauch von CE-Maßnahmen aufgrund ihres *Dual-Use*-Potenzials. Einige der Techniken könnten unter Umständen als Druck- und Gewaltmittel eingesetzt werden, um politische Ziele durchzusetzen, z.B. zur intendierten Wetterkriegführung oder, im Falle von Weltraumspiegeln, zur Abblockung oder Fokussierung von Sonnenlicht in Teilen der Erde. Diese Potenziale variieren stark – je nach verwendeter Technologie.

Ein Problem bei allen fünf Typen möglicher Konsequenzen ist, dass es angesichts der unsicheren und komplexen Wirkungsketten und Ereignissequenzen teilweise schwierig ist, ein bestimmtes Ereignis überhaupt als Folge intendierter CE-Maßnahmen nachzuweisen. Dieses Zurechnungs- oder Attri-

butionsproblem ist auch aus anderen Risikofeldern bekannt (etwa beim Rauchen), bekommt aber mit *Climate Engineering* eine globale Bedeutung. So könnten die Unsicherheiten Konflikte auslösen, z.B. wenn katastrophale Wetterereignisse als eine mögliche Folge von CE-Maßnahmen interpretiert werden, was wiederum zu Streitigkeiten über Ursachen und Verantwortlichkeiten führen könnte. Auch wenn es nicht möglich sein mag, ein bestimmtes Wetter-Extremereignis auf *Climate Engineering* zurückzuführen, könnten die davon Betroffenen dies dennoch unterstellen und damit versuchen, die Verursacher zur Verantwortung zu ziehen. Ist dies beim nichtintendierten Klimawandel bereits heute ein mögliches Konfliktfeld, so könnte beim intendierten *Climate Engineering* das Wetter ein neuer Typ von Konfliktfaktor werden, wenn nicht geeignete regulative Prozesse und institutionelle Strukturen gefunden werden.

Die Konfliktpotenziale des *Climate Engineering* stellen eine besondere Form von Risiken dar, die eine Folge menschlicher Reaktionen sind und über gesellschaftlich-politische Prozesse und Strukturen vermittelt werden.³ Die Akteure verfolgen unterschiedliche Interessen und haben unterschiedliche Machtmittel, die es auszutarieren gilt. Da es eine globale Mitteltemperatur nicht gibt, die für alle optimal ist, muss ein Kompromiss gefunden werden (das 2°-Ziel bietet sich hier an). Streitigkeiten über Kompensationen und Verteilungsmechanismen sind damit nicht ausgeschlossen (z.B. zwischen Entwicklungs- und Industrieländern, städtischen und ländlichen Regionen oder Küsten- und Binnenlandbewohnern).

Selbst im Falle einer globalen Kooperation handelt es sich um kein einfaches Kontrollproblem, denn es geht um eine Vielzahl von Faktoren und Akteuren, die auf schwer durchschaubare Weise miteinander wechselwirken. Auch wenn die Menschheit sich auf ein Ziel einigt und den bestmöglichen Plan zu seiner Realisierung verabschiedet, kann sie das Ziel verfehlen, wenn das Klimasystem nicht so reagiert wie erwartet. Hier spielen Nichtlinearitäten, Irreversibilitäten, Pfadabhängigkeiten, *lock-ins* und Hystereseeffekte eine Rolle, die einer Steuerung des Klimasystems einen Streich spielen können. Da auch die Gesellschaften von schwer zu steuernden Triebkräften beeinflusst werden, könnten sich die Dynamiken der natürlichen und sozialen Systeme aufschaukeln und das Erdsystem außer Kontrolle bringen.

In jedem Falle stellen sich aufgrund der Komplexität der vielen miteinander verbundenen Problemfelder für eine Vielzahl von Akteuren neue Herausforderungen bei Vorhersage und Management dieser Ereignisse, die in Raum und Zeit über lokale, regionale und globalen Ebenen verschränkt sind. Bei der Analyse der verschiedenen Wirkungs- und Handlungspfade könnte ein Fokus darauf liegen, sensitive Entscheidungspunkte zu identifizieren und (Un-)Sicherheitsgrenzen abzuschätzen, um kritische Grenzwerte und Umkipppunkte in natürlichen und sozialen Systemen zu vermeiden. Aufgrund der hohen Unsicherheiten erscheinen Verfahren der adaptiven Kontrolle gegenüber der optimalen Kontrolle von *Climate Engineering* geeignet, da sie Eingriffe mit dem jeweiligen Stand des Wissens und der Handlungsfähigkeit abgleichen, um innerhalb von tolerablen Schranken und Handlungsfenstern zu bleiben. Diese Optionen können durch Szenarien weiter erforscht werden, die die Typologien zukünftiger Konsequenzen und Risiken klarer zu zeichnen und den Nebel zu lichten.

3.1.2 Risikoanalysen des Climate Engineering

Die Risikoanalysen bisheriger CE-Berichte und CE-Gutachten unterscheiden sich in ihrem jeweiligen Analyserahmen. Die Thematisierung von Risiken geschieht meist in folgenden Ansätzen:

1. Risikoanalyse anhand technischer oder auch sozialwissenschaftlicher Kriterien (Royal Society 2009; GAO 2010; STC 2010),
2. Risikowahrnehmungs-Studie zu ausgewählten gesellschaftlichen Gruppen/Ländern (Rickels et al. 2011; NERC 2011),

³ Eine Übersicht über das Konfliktpotential findet sich in Renn et al. (2011) und Rickels et al. (2011: 86ff). In beiden Fällen basiert die Zusammenstellung auf den Ergebnissen einer Delphi-Umfrage.

3. Problematisierung von Risiken, ohne eigene systematische Risikoanalyse (ETC Group 2009).

Während die Problematisierung von Risiken stärker bei NGOs vorzufinden ist, wird die Untersuchung von Risikowahrnehmung (auch genau dieser NGOs) eine Aufgabe der Sozialwissenschaften. Risikoanalysen werden seit kürzerer Zeit interdisziplinär bearbeitet. Innerhalb der Risikoanalysen wird nach unterschiedlichen Kriterien bewertet, die jedoch stets die wichtigen Komponenten von (zumindest grob einschätzbarem) Schaden enthalten, wie zum Beispiel die Wirkung auf Menschen und Ökosysteme und das jeweilige Ausmaß der Belastung. Weitere Kriterien der Risikoanalyse sind die Funktionsfähigkeit, Machbarkeit, Reifegrad und Versagen technischer Systeme sowie die Entwicklungsphase von Systemen, d.h. die Erforschung, Erprobung, Einsatz und Beendigung (Blackstock et al. 2009). Diese verschiedenen Schadenskomponenten und Kriterien gehen dann ein in die Risikobewertung und das Risikomanagement (Ginzky et al. 2011).

In einer Betrachtung der Gutachten mit Risikoanalyse lassen sich Risikotypen unterscheiden, bei denen es um verschiedene Betrachtungsebenen geht. Unter der Voraussetzung, dass vornehmlich allgemeine oder spezielle Risiken diskutiert werden, unterscheiden sich die Ergebnisse der Gutachten. Um folgende Risikotypen handelt es sich:

Allgemeine Risiken des Climate Engineering: Dabei geht es um Risiken, die für alle CE-Technologien zutreffen und zunächst unabhängig davon sind, ob sie vorwiegend technischer oder sozialer Natur sind. Sie lassen sich nicht (vollständig) dadurch eliminieren, dass das spezifische Einsatzszenario angepasst wird (Grunwald 2010: 38; Sardemann und Grunwald 2010: 5–6; Ott 2010b: 41–42). Bisher lassen sich anscheinend keine allgemeinen Risiken identifizieren, die für alle CE-Technologien gelten. Am ehesten ist vorstellbar, dass internationale Konflikte oder mögliche Schäden von Feldversuchen als Risiken für alle bekannten CE-Maßnahmen entdeckt werden.

Soziale und technische Risiken: Diese Unterscheidung wurzelt in der wissenschaftlich-disziplinären Arbeitsteilung. Ein Risiko von der Tendenz her als technisch oder sozial einzustufen, bringt den Vorteil, Zuständigkeiten für die Risikominimierung zu klären, verdeckt jedoch gleichzeitig, dass Technik aus der Gesellschaft hervorgeht (durch Fördermittel, Nachfrage, Einbindung von Akteuren im Entwicklungsprozess), soziale Risiken auch technische Anteile haben (naturwissenschaftlich-technische Grundlagen eines sozialen Konflikts) und umgekehrt die Identifikation technischer Risiken sozial erfolgt (z.B. Klimawandel oder saurer Regen als Schaden empfunden werden). Die Einschätzungen gehen darüber auseinander, ob die Risiken eher der einen oder der anderen Seite angehören (Bracmort et al. 2010: 4).

Vergleich der Risiken von RM und CDR: Die Aufteilung von *Climate Engineering* in RM und CDR leitet sich daraus ab, welcher Wirkungspfad im Klimasystem beeinflusst wird, was wiederum Auswirkungen auf die jeweilige Schadensarten hat. RM wird oft als risikoreicher angesehen, während die Konsequenzen von CDR teilweise schwieriger einzuschätzen seien (Long et al. 2011: 11–19). Viele RM- und CDR-Technologien teilen die gleichen Risiken, wie etwa internationale Krisen zu befördern oder Schäden in lokalen (Klima-)Systemen zu verursachen. Nur wenige Risiken treffen auf nur eine Technologie zu und umgekehrt hat eine Technologie meist mehr als ein Risiko.

Spezifische Risiken einzelner CE-Technologien wurden durch den Bericht der Royal Society (2009) bekannt gemacht und ihrer Gefährlichkeit nach verglichen. Auf Grundlage einzelner Technologien, und nicht nur der Technologiegruppen RM/CDR, lassen sich Risiken und deren mögliche Schäden genauer diskutieren. Bisher wurden schon Fortschritte gemacht Risiken einzelner Technologien konkreter zu fassen. Beispielsweise wurde für Schwefel-Aerosole in der Stratosphäre zunächst das Risiko von verstärkten sauren Regenfällen vermutet, was mittlerweile als vernachlässigbar gilt (Mitchell und Finnegan 2009).

Die meisten Studien benutzen nur eine dieser Unterscheidungen in ihrer Risikoanalyse. Selten werden sowohl allgemeine als auch spezifische Risiken des *Climate Engineering* nebeneinander diskutiert. Die folgende Kartographierung von Risiken ist nicht auf eine Analyseebene festgelegt. Denkbare Einsatzszenarien müssten damit anhand mehrerer Risikotypen analysiert werden (Tabelle 1). Ein um-

fassendes Risikoportfolio muss multidimensional angelegt sein, damit es alle Typen und Ebenen von Risiken mitberücksichtigt. Für eine Entscheidung über Forschung, Feldexperimente und eventuell spätere Anwendung bietet eine breite Risikoanalyse mehr Kalkulierbarkeit.

Tabelle 1:
Technologie-Risiko-Matrix

	Internationale Spannungen und Staatenkonflikte	Missbrauch (als Waffe)	Schäden durch vorbereitendes Experiment	Schaden durch Betriebsabbruch	Overshoot	Veränderung des Wasserkreislaufes	Schaden für lokale Klimasysteme und Umwelt	Ozonlochvergrößerung	Verlust von Biodiversität	Sequestrierungsrisiken (ähnlich CCS)	Versauerung des Tiefmeeres
	soziale und politische Risiken		soziale und technische Risiken			vorwiegend technische Risiken					
Reflektoren im Weltall	mittel	mittel	?	mittel	mittel	?	?	–	–	–	–
Aerosole in der Stratosphäre	hoch	mittel	hoch	mittel	hoch	hoch	mittel	mittel	–	–	–
Modifikation von Zirruswolken	gering	?	?	mittel	gering	mittel	?	–	–	–	–
Modifikation mariner Schichtwolken	gering	–	gering	mittel	?	hoch	mittel	–	–	–	–
Modifikation der Erdoberflächenalbedo	–	–	gering	–	–	?	mittel	–	–	–	–
Künstlicher Auftrieb/Abtrieb	–	–	gering	–	–	–	?	–	?	–	–
Einbringung von Olivin	gering	–	gering	–	–	–	?	–	?	–	gering
Einbringung von Kalziumoxid/-hydroxid	gering	–	gering	–	–	–	?	–	?	–	gering
Einbringung von pulverisiertem Kalk	gering	–	gering	–	–	–	?	–	?	–	gering
Düngung durch Makronährstoffe	gering	–	mittel	–	–	–	mittel	–	?	–	gering
Düngung durch Mikronährstoffe	gering	–	mittel	–	–	–	mittel	–	?	–	gering
Air Capture	–	–	–	–	–	–	?	–	–	mittel	(mittel)
Biokohle	–	–	–	–	–	–	?	–	mittel	mittel	(gering)
Aufforstung	–	–	–	–	–	gering	?	–	hoch	(mittel)	–

Die Bezeichnung ? zeigt an, dass der derzeitige Kenntnisstand noch keine Einschätzung zulässt.

Quelle: Eigene Darstellung.

Angesichts der in der Matrix dargestellten verschiedenartigen Risikoprofile einzelner CE-Maßnahmen scheint ein allgemeiner Vergleich der CE-Risiken mit den Risiken des Klimawandels nur begrenzt möglich. Dies ergibt sich nicht aus dem grundsätzlichen Problem, die jeweiligen Unsicherheiten in quantifizierbare Risiken zu überführen. Die grundsätzliche Entscheidungssituation zwischen Klimawandel und *Climate Engineering* wird den unterschiedlichen Charakteristiken der verschiedenen CE-Technologien nicht gerecht. Vielmehr müssten einzelne Technologien und ihre genauen Anwendungsszenarien diskutiert werden, als allgemeine Abwägungen zu forcieren. So unterschiede sich die als hochriskante eingeschätzte Stratosphärische-Aerosole-Technologie (siehe Tabelle 1) selbst bei internationaler Zustimmung in ihrem Risikoprofil immer noch sehr von dem als relativ sicher eingeschätzten Air Capture, das auch unilateral durchgeführt keine politischen Spannungen auslösen würde.

3.2 Vergleichbarkeit gewährleistende Bewertungsprozesse für CE-Technologien

Bei den im vorangehenden Teil behandelten Risikodiskursen zu *Climate Engineering* gilt ein zentrales Augenmerk der Heterogenität und Vielfalt der Folgen- und Risikoperzeption. Die in diesem Abschnitt

zu behandelnden Bewertungsmethoden für *Climate Engineering* stehen indessen vor der Herausforderung, die Folgen und Risiken von *Climate Engineering* in einem einheitlichen und konsistenten Verfahren abzubilden, um sie so vergleichbar zu machen und eine Hilfestellung für die Entscheidungsfindung zu bieten. Die Kosten-Nutzen-Analyse (*Cost-Benefit Analysis*, CBA) und die Kosten-Effektivität-Analyse (*Cost-Effectiveness Analysis*, CEA) bieten für diese Aufgaben bewährte Heuristiken. Ein gutes Verständnis ihrer Leistungsfähigkeit ist jedoch notwendig, um die erwartete Hilfestellung dieser und alternativer Methoden für die Entscheidung über den geeigneten Umgang mit *Climate Engineering* realistisch einschätzen zu können.

Die folgenden Abschnitte bieten mit den Tabellen 2 und 3 einen Überblick über die bislang durchgeführten CEA zu CE-Maßnahmen. Dieser Überblick macht klar, dass diese Analysen zum aktuellen Zeitpunkt wenig Hilfestellung für die politische Entscheidungsfindung bieten können. Für die im Kontext von *Climate Engineering* notwendige, methodisch ausgefeilte Form der Analyse fehlt heute die Datengrundlage aus Klimamodellierung und Impact Assessment Studien. Vor diesem Hintergrund wird in Abschnitt 3.2.1 erklärt, welcher Erkenntnisgewinn die bisher durchgeführten Kosten-Effektivitäts-Analysen liefern und warum bislang keine Kosten-Nutzen-Analysen im eigentlichen Sinn vorliegen können. In Abschnitt 3.2.2 werden die Anforderungen erläutert, die an eine qualitativ hochwertige CEA von CE-Maßnahmen gestellt werden müssen, und es wird zu den folgenden Abschnitten übergeleitet, in denen dargelegt wird, dass die Möglichkeiten, bei Vorliegen entsprechender Daten aus der Klimamodellierung und dem Impact Assessment eine für die Entscheidung hilfreiche Analyse durchzuführen, methodisch bereits gegeben sind. Insbesondere sind die Herausforderungen der sogenannten externen Effekte von *Climate Engineering* (Abschnitt 3.2.3), der Verteilungswirkungen von *Climate Engineering* sowohl innerhalb von Generationen als auch über Generationen hinweg (Abschnitt 3.2.4) als auch die Herausforderungen durch Risiko und Unsicherheit (Abschnitt 3.2.5) mittels moderner Analyse beherrschbar. Externe Effekte, Verteilungswirkungen und Unsicherheit lassen sich in CEA und CBA nicht nur abbilden, sondern auch konsistent berücksichtigen. CEA und CBA sind somit als Hilfestellungen zur Entscheidungsfindung im Hinblick auf einen Einsatz von CE-Maßnahmen grundsätzlich geeignet.

Wie die in der vergleichenden Gegenüberstellung der bislang vorliegenden CEA zu *Climate Engineering* in Abschnitt 3.2.6 deutlich wird, bleiben diese Analysen weit hinter den Möglichkeiten einer modernen CEA zurück. Das wichtigste Hindernis im Hinblick auf den Einsatz von CEA und CBA besteht im Fehlen der Datengrundlage naturwissenschaftlicher Art, ergänzt durch zweckdienliche sozialwissenschaftliche Erhebungen. Trotz methodischer Leistungsfähigkeit ist ohne ausreichende Kenntnis der zeitlichen und räumlichen Effekte von CE-Maßnahmen eine Bewertung dieser Effekte im Rahmen einer seriösen CEA oder CBA aus naheliegenden Gründen unmöglich. Die Verbesserung dieser Datengrundlage ist somit absolut prioritär zu behandeln.

3.2.1 Kosten-Nutzen-Analyse versus Kosten-Effektivität-Analyse

Seit Stern (2007) sind die makroökonomisch bedeutsamen Kostendimensionen einer ambitionierten Emissionsvermeidungsstrategie (1–2 % in Relation zum Bruttoweltprodukt pro Jahr nach Stern 2008) und die Größenordnung des Nutzens, dadurch Schäden abzuwenden – bis 30 % in Relation zum Bruttoweltprodukt im Jahre 2100 (ibid.) –, auch in der politischen Öffentlichkeit geläufig. Entsprechend gehen die für politische Entscheidungsträger bestimmten Berichte zu *Climate Engineering* ausnahmslos auch auf die Kosten- und Nutzenaspekte eines Einsatzes solcher Methoden ein und bedienen sich bei deren Beurteilung ökonomischer Konzepte wie der Kosten-Nutzen-Analyse (Royal Society 2009; GAO 2011; Rickels et al. 2011).

Die Kosten-Nutzen-Analyse (CBA) ist ein weit verbreitetes heuristisches Verfahren, um systematisch Vorteile und Opfer ausgewählter Projekte möglichst erschöpfend zu erfassen und vergleichend zu bewerten (Pearce 1992; Stiglitz 2000). Dies geschieht mit dem Ziel, Klarheit über die Sinnhaf-

tigkeit eines bestimmten Projektes zu erhalten und aus konkurrierenden Projekten jenes auszuwählen, das den größten Wohlfahrtsgewinn herstellt. In diesem Sinne verspricht die CBA eine Lösung für das zu Beginn des Kapitels angesprochene Entscheidungsproblem. Dieses Versprechen kann eine CBA im Falle von CE-Maßnahmen allerdings nur dann einlösen, wenn eine Reihe von wichtigen Voraussetzungen zumindest annähernd erfüllt ist. Insbesondere erfordert eine wahre CBA Kenntnis über die relative Wünschbarkeit verschiedener Effekte seitens der Gesellschaft (Stiglitz 2000). Informationen über die relative Wünschbarkeit können durch empirische Verfahren prinzipiell erschlossen werden. Kosten-Nutzen-Analysen für andere öffentliche Projekte, z.B. im Bereich Infrastruktur und Umweltpolitik, bedienen sich dieser zum Teil sehr aufwendigen Verfahren (Boardman et al. 2011; Bateman et al. 2002). Aufgrund der hohen Komplexität und Neuartigkeit von *Climate Engineering* liegen die dafür notwendigen Informationen über die Frage, wie Bürger unterschiedliche Effekte des *Climate Engineering* gegeneinander abwägen, den Entscheidern, wie auch in der Klimapolitik, nicht ohne Weiteres vor. Dies ist der Hauptgrund, warum in der politikberatenden Literatur zu *Climate Engineering* typischerweise keine Kosten-Nutzen-Analyse im eigentlichen Sinne durchgeführt wird. Die Durchführung einer solchen CBA ist im Kontext einer Maßnahme von der gesellschaftlichen Tragweite von *Climate Engineering* zwar wünschenswert, aber auf Sicht nur dann realistisch, wenn sich der Informationshorizont zu *Climate Engineering* substantiell verbessert.

Charakteristisch für die aktuelle politikberatende Literatur ist die Präferenz für Kosten-Effektivitäts-Analysen (CEA). CEAs kommen in Situationen zum Einsatz, in denen keine belast- und vergleichbaren Bewertungsmaßstäbe für die mannigfaltigen Effekte vorliegen, und sind deshalb auch in der Klimapolitikanalyse verbreitet. Als Behelfsmittel für fehlende Information über vergleichbare Wohlfahrtsgewinne wird eine erwünschte Zielgröße festgesetzt, die auf nachvollziehbare und überprüfbare Weise definiert ist (Boardman et al. 2011). Diese kann einerseits als fixes Projektziel definiert sein.⁴ Da individuelle Technologien schon aus physikalischen Gründen nur über ein bestimmtes begrenztes Potential verfügen und daher häufig nicht in der Lage sind, ein festes Ziel alleine zu erreichen, ist dieser Ansatz vielfach zu wenig aussagekräftig und ermöglicht keine vollständige Vergleichbarkeit. Eine Alternative ist daher, eine nichtmonetäre Zieleinheit zu definieren. Die dann sinnvoll zu beantwortende Frage ist, welche Maßnahme dieses Ziel mit den geringsten gesellschaftlichen Opfern erreicht.⁵ Eine übliche Maßgröße ist daher der Quotient aus Kostenaufwand pro Einheit Zielgröße.⁶ Im Kontext von *Climate Engineering* liefert CEA einen Vergleich unterschiedlicher CE-Optionen auf der Basis, zu welchen Kosten eine Einheit Strahlungsintensitätsreduktion bereitgestellt werden kann.

Da die gesamtwirtschaftlichen Kosten und Erträge eines CE-Ansatzes nur sehr rudimentär abgeschätzt werden können, sind die Anwendungsmöglichkeiten der CBA für *Climate Engineering* derzeit noch sehr begrenzt. Daher gehen wir im Folgenden auf die in der Literatur verwendeten CEA-Verfahren ein. Die CEA unterscheidet sich von der CBA daher durch ihren wesentlich begrenzteren Anspruch und durch ihr extern definiertes Ziel.⁷ Durch die Festsetzung der erwünschten Resultate findet notwendigerweise eine Verengung auf einzelne Kriterien statt, im Falle des *Climate Engineering* auf vorwiegend ein Ziel, nämlich die Minderung des Strahlungsantriebs (Rickels et al. 2011). Eine Vorentscheidung für oder wider gewisse Formen der Zielerreichung ist damit häufig implizit (Boardman et al. 2011). Dem stehen zwei Vorzüge entgegen. Einerseits gibt eine CEA zwar möglich-

⁴ Ein klassisches Beispiel aus der Klimapolitik ist die Festlegung auf einen Schwellenwert der höchst zulässigen Erderderwärmung, z.B. 2° C.

⁵ Im Kontext des *Climate Engineering* wären unterschiedliche Zieleinheiten möglich, beispielsweise CO₂-Konzentrationsäquivalente. In der Literatur zu *Climate Engineering* hat sich die Strahlungsintensitätsreduktion, gemessen in Wm⁻², als Zieleinheit durchgesetzt (Royal Society 2009; Rickels et al. 2011).

⁶ Dieser üblichen Maßgröße wohnt bereits eine Umwandlung der gesellschaftlichen Opfer in Einkommensäquivalente inne. Prinzipiell könnte die Analyse aber auch auf Grundlage anderer Einheiten (z.B. imaginärer Nutzeneinheiten) durchgeführt werden. Dies erweist sich in der Praxis allerdings als schwierig.

⁷ Im Gegensatz dazu ist das Ziel der CBA abstrakt als Maximierung der gesamtgesellschaftlichen Wohlfahrt definiert.

erweise arbiträre, aber zumindest wohldefinierte Kriterien vor, an denen die technologischen Optionen gemessen und verglichen werden können. Eine mögliche, aus der CBA-Literatur bekannte Fehlerquelle ist damit ausgeschaltet. Andererseits stellt ein CEA-Ansatz praktisch automatisch die Frage nach alternativen Formen der Zielerreichung. Dies ist der Analyse von CE-Maßnahmen besonders angemessen, da damit die Einbettung der CE-Frage in den breiteren Kontext einer umfassenden Emissionsvermeidungs- und Adaptationspolitik erzwungen wird.

3.2.2 Kosten-Effektivität-Analyse für CE-Technologien

CEA ist ein Sammelbegriff für eine Reihe unterschiedlich ausgefeilter Methoden, mit denen die Kosten, die durch die Zielerreichung entstehen, erfasst werden. Die Qualität der CEA ist nicht beliebig wählbar: Eine Verbesserung der Vollständigkeit führt explizit zu höheren informationellen Anforderungen und damit Kosten.⁸ Implizit führt eine Verbesserung der Vollständigkeit zu einer Reduktion der Vergleichbarkeit und damit zu einer Minderung der CEA als heuristische Hilfe. Der Grund ist, dass eine Ausweitung der berücksichtigten Kostenkategorien notwendigerweise in Bereiche führt, in denen eine einheitliche und verlässliche Bezifferung der Kosten zunehmend schwierig zu bewerkstelligen wird. Eine pragmatische Lösung besteht in vielen Zusammenhängen darin, sich in der CEA ausschließlich auf jene Aspekte zu beschränken, die monetär fassbar sind. Dies erlaubt die größtmögliche Vergleichbarkeit, vernachlässigt jedoch alle nicht einfach monetär fassbaren Kosten.⁹ Die Popularität dieser Herangehensweise hat dazu geführt, dass CEA und CBA oft mit dieser spezifischen Lösung gleichgesetzt werden und die CEA pauschal kritisch betrachtet wird (vgl. IPCC 2001: Kapitel 1). Dies führt zu einem Missverständnis über die Breite und tatsächlichen Möglichkeiten der CEA.

Zum aktuellen Zeitpunkt ist die Datenlage zu den Kosten von RM- und CDR-Maßnahmen noch unzureichend, um die notwendigen Abschätzungen auf seriöse Weise durchzuführen (Royal Society 2009; GAO 2011; Rickels et al. 2011). Die für diesen Abschnitt zusammengestellten Übersichtstabellen spiegeln diesen Sachstand im Hinblick auf Unvollständigkeit und häufige Inkonsistenz der verfügbaren Information wider. Die Datenlage ist auch insoweit unbefriedigend, als die relativ belastbarsten Informationen im Bereich der direkten Kosten von RM-Maßnahmen vorliegen. Diese Kosten sind im Hinblick auf die gesamtwirtschaftlichen Kosten von CE-Maßnahmen allerdings die vermutlich am wenigsten aussagenkräftigen Kategorien. Gerade bei komplexen Technologien wie dem *Climate Engineering*, bei denen mit einem hohen Grad an Externalitäten und Unsicherheit zu rechnen ist, greift eine Beschränkung auf einfach zu erhebende Kosten zu kurz. Die Einbeziehung von externen Effekten, Verteilungswirkungen und die Berücksichtigung von Risiko und Unsicherheit sind dringend geboten. Diese Erweiterungen sind im Rahmen einer CBA oder CEA methodisch prinzipiell möglich, wie in den folgenden Abschnitten erläutert wird. Allerdings muss es vorrangiges Ziel zukünftiger Forschung sein, die für diese Erweiterungen notwendigen Daten zu erheben.

Der folgende Abschnitt geht auf grundlegende Erwägungen ein, die einer vergleichenden Analyse von CE-Technologien im Rahmen einer CEA vorangestellt werden müssen. Diese Erwägungen führen zu den folgenreichen Abgrenzungsentscheidungen in der CEA. Die wichtigsten Abgrenzungskriterien im Hinblick auf *Climate Engineering* beziehen sich auf die berücksichtigten Kostenträger (insbesondere in ökonomischer und räumlicher Hinsicht), auf den berücksichtigten Zeithorizont und auf die vergleichende Berücksichtigung von Risiko und Unsicherheit.

⁸ Die Kosten sind nicht trivial: Die Bundesumweltbehörde der USA veranschlagt beispielsweise im Jahr 1987 Kosten von etwa 1 Million USD für die Durchführung einer CBA für eine umweltpolitische Maßnahme (USEPA 1987). Heute dürften die Kosten um Einiges höher sein. Außerdem sind diese Maßnahmen im Hinblick auf Wirkungsradius, zeitliche Dimension und Wirkungskomplexität um Größenordnungen einfacher als die Bewertung von CE-Maßnahmen.

⁹ Dieses Vorgehen kann gerechtfertigt sein. Wenn die nicht einfach monetarisierbaren Effekte vernachlässigbar klein sind, ist es möglich, den gesellschaftlichen Verlust aus dieser Beschränkung zu verteidigen.

3.2.3 Kosten-Effektivität-Analyse und Externalitäten

Die Dimension des Kostenträgers grenzt zwischen dem Betreiber als Kostenträger und anderen von der Maßnahme Betroffenen ab. Ein Fokus auf den Betreiber der CE-Maßnahme führt zu einer engen Beschränkung auf die sogenannten direkten Kosten. Ein Fokus auf andere Betroffene hingegen weitet den Kreis der Kostenträger in räumlicher und zeitlicher Hinsicht aus und berücksichtigt die sogenannten indirekten Kosten oder Externalitäten.

Fokussierung auf direkte Kosten: Die Bestimmung der direkten Kosten von CE-Optionen stellt den Betreiber einer CE-Maßnahme in den kalkulatorischen Mittelpunkt. Das Erkenntnisinteresse gilt der unmittelbaren Wirtschaftlichkeit von CE-Maßnahmen, die gegeben sein muss, um eine solche Option weiter in Betracht zu ziehen. Rickels et al. (2011) bieten in Kapitel 4 ihrer Studie einen erschöpfenden Überblick über den aktuellen Wissensstand. Die direkten Kosten setzen sich aus den Kapitalkosten der Kapazitätsbereitstellung und den variablen Kosten des Betriebs zusammen. Die direkten Kosten unterscheiden sich für unterschiedliche CE-Technologien sowohl in der Höhe als auch in der Zusammensetzung deutlich. Trotz der Einschränkung auf den Betreiber ist die Bestimmung dieser Kosten nicht notwendigerweise trivial, da RM- und CDR-Maßnahmen bei entsprechender Größe nicht mehr marginal sind: Bei entsprechender Betriebsgröße kann der Einsatz von *Climate Engineering* sowohl Mengen- als auch Preiseffekte zur Folge haben, die substantielle Kostenimplikationen haben können (Rickels et al. 2011: 63ff). Die Technologien unterscheiden sich daher nicht nur aus Gründen technologischer Unsicherheit, sondern auch aus Gründen der Kostenstruktur (Kapitalbindung über längere Zeithorizonte) und Marktstruktureffekte ganz erheblich im Hinblick auf die Risiken und Unsicherheiten, die mit diesen Kostenschätzungen verbunden sind.

Berücksichtigung von Externalitäten: Da es sich bei *Climate Engineering* der Natur nach um eine Aktivität handelt, deren wesentliche Effekte globaler Natur sind, ist eine auf die direkten Kosten verengte Analyse zwar möglich, aber von untergeordneter Rolle. Im Mittelpunkt stehen stattdessen die Träger indirekter Kosten. Diese unterscheiden sich aus der Sicht des Betreibers im wesentlichen Punkt: Sie haben zunächst auf seine Entscheidung über Einsatz und Ausmaß der CE-Maßnahme keinen Einfluss, es sei denn, es gibt institutionelle Vorkehrungen, welche diese durchsetzen. Die Analyse der indirekten Kosten erfordert eine sinnvolle Abgrenzung und Identifikation hinsichtlich des Kreises der potentiellen Kostenträger in räumlicher und zeitlicher Hinsicht. Aufgrund der schon in der Intention angelegten globalen Wirksamkeit von *Climate Engineering* ist eine räumliche Eingrenzung nicht sinnvoll. Die räumlich heterogenen und auf Menschen in vollkommen unterschiedlichen ökonomischen Situationen einwirkenden Effekte – mit anderen Worten: die sogenannten intragenerativen Verteilungseffekte – bedürfen dabei besonderer Beachtung, wie im folgenden Abschnitt dargelegt wird. Die zeitliche Abgrenzung liegt aufgrund der physikalischen Trägheit des Klimasystems, mit der CELösungen materiell verknüpft sind, im Bereich von 50 bis zu mehreren hundert Jahren. Zeithorizonte dieser Länge erfordern die Durchführung einer CEA, die auf die intergenerativen Verteilungseffekte konkret eingeht. Die Berücksichtigung solcher Effekte wurde bislang zwar in CEA-Ansätzen zu *Climate Engineering* kaum durchgeführt,¹⁰ ist aber methodisch prinzipiell möglich, wie im folgenden Abschnitt ausgeführt. Konkret fehlt zurzeit die Datengrundlage aus der CE-Modellierung, um diese Methoden jetzt schon einsetzen zu können. Die Schaffung einer solchen Grundlage wäre prioritär zu behandeln.

Eine kategorische Abgrenzung der anfallenden Externalitäten ist im Hinblick auf die komplexe Wirkweise von *Climate Engineering a priori* zu vermeiden. In jedem Fall problematisch ist, dass zahlreiche CE-induzierte Externalitäten einer simplen marktlichen Bewertung oft nicht zugänglich sein

¹⁰ CEAs zu *Climate Engineering* gehen mangels Daten auf diese langfristigen Effekte bislang kaum direkt ein. In der Praxis staatlich durchgeführter CBA und CEA auf anderen Gebieten (z.B. Infrastrukturprojekte) werden Effekte, die länger als 25 bis 30 Jahre in der Zukunft liegen, typischerweise nicht berücksichtigt. Staatlich durchgeführte CBA- und CEA-Studien haben mit 60 Jahren Zeithorizont in Schweden die längste Perspektive unter den OECD-Ländern. In Deutschland gibt es für CBA und CEA der öffentlichen Hand keine formalen Vorgaben im Hinblick auf den Planungshorizont (Hepburn 2006).

werden, z.B. im Fall von Schäden in komplexen Ökosystemen. Dies heißt, dass nicht unmittelbar in Geldeinheiten ausdrückbare Kosten anfallen. Diese Komplikation ist allerdings kein Spezifikum der CEA von *Climate Engineering*. Insbesondere profitiert die CEA von *Climate Engineering* vom sich permanent verbessernden Informationshorizont zum Impact Assessment von Klimawandel. Die Literatur zur Bewertung von Klimaschäden im Besonderen (z.B. Mendelsohn und Neumann 2004; Deschenes und Greenstone 2007) und von nichtmarktlichen Gütern im Allgemeinen (Champ et al. 2003; Haab und McConnell 2002) bietet ein immer leistungsfähigeres Instrumentarium, um auch diese Effekte quantitativ abzubilden und damit umfassend in die CEA einfließen zu lassen. Zudem zielt der Wissenschaftsprozess prioritär auf jene Effekte ab, die als besonders gewichtig eingeschätzt werden. Beispielsweise lassen sich die Effekte von Temperaturextremen auf die für Entwicklungsländer besonders wichtige Ernährungssicherheit (Schlenker und Roberts 2009) oder die Effekte von atmosphärischem Sulfat auf Gesundheitssysteme (Künzli et al. 2000) mittlerweile zunehmend präzise beziffern. Kontinuierlich breitere Bewertungsmöglichkeiten dieser Art werden zunehmend zur Verfügung stehen, sind bislang jedoch noch nicht auf die mit *Climate Engineering* verbundenen Effekte angepasst und angewandt worden. Trotz dieser Fortschritte ist nicht zu erwarten, dass alle Effekte umfassend und korrekt bewertet in die CEA eingehen können. Dieser Unvollständigkeit des Informationshorizontes muss in der Endentscheidung Rechnung getragen werden.

3.2.4 Kosten-Effektivität-Analyse und Verteilungseffekte

Intragenerative Wohlstandsverteilung: CE-Maßnahmen werden aufgrund ihrer räumlich wenig begrenzten Wirkung Folgen für Menschen in Erdregionen haben, die sich im Hinblick auf ihren Wohlstand in radikal unterschiedlichen Situationen befinden. Die Verbindung aus räumlicher Uneingeschränktheit und hoher wirtschaftlicher Heterogenität verweist auf die Schwierigkeit der interpersonellen Vergleichbarkeit von Kosten.¹¹ Hier stehen bei entsprechender Datengrundlage aus der Klimamodellierung und dem Impact Assessment zu CE-Maßnahmen Verfahren zur Verfügung, die eine bessere Vergleichbarkeit anbieten, und in anderen Gebieten der ökonomischen Politik- und Technikbewertung zur Anwendung kommen. Diese Verfahren können Verteilungseffekte offenlegen und dokumentieren, z.B. durch Verteilungsmaße wie den Gini-Koeffizienten (Lambert et al. 2003), eine möglichst erschöpfende Aufzählung in einer sogenannten erweiterten CEA (siehe z.B. de Lopez 2003) oder einer *social accounting matrix* (für ein Beispiel siehe Marcouiller und Stier 1996).

Weitergehend sind Ansätze, die unerwünschte Verteilungswirkungen bewertend in die CEA selbst eingehen lassen. Die bekanntesten Ausformungen sind, zurückgehend auf Dreze und Stern (1987), Varianten der CEA mit expliziten Verteilungsgewichten. Solche Varianten werden beispielsweise vom Britischen Schatzamt zur Beurteilung öffentlicher Projekte herangezogen (HM Treasury 2003). Diese Formen der CEA gewichten Kosten, die unterdurchschnittlich Wohlhabende treffen, höher und solche, die überdurchschnittlich Wohlhabende treffen, geringer. Ähnliche Wirkungen entfaltet eine CEA, die Kosten auf Grundlage eines *equity-sensitive average income* je nach dem relativen Wohlstand des Kostenträgers unterschiedlich gewichtet (Atkinson 1970). Für globale öffentliche Güter wie Mitigationsmaßnahmen im Klimakontext werden ähnliche Gedankengänge angewandt (Stern 2007), auch wenn sie in die ökonomische Literatur zu *Climate Engineering* bislang noch nicht explizit eingegangen sind.

Intergenerative Wohlstandsverteilung: Die Wahl des zeitlichen Horizonts spielt sowohl in der Bewertung der Kosten in der CEA eine Rolle als auch in der Vergleichbarkeit der Effektivität. Denn die zeitliche Struktur von Kosten und Wirkung von CE-Maßnahme zu CE-Maßnahme einerseits und zwischen CE-Maßnahmen und Mitigations- und Adaptationsmaßnahmen andererseits unterscheidet

¹¹ Empirische und experimentelle Befunde zeigen beispielsweise deutlich, dass, wenn zwei Individuen mit großem Jahreseinkommensunterschied den gleichen absoluten ökonomischen Verlust erleiden, die Wohlfahrtseinbuße aus diesem Verlust für das Individuum mit dem geringeren Einkommen größer ist.

sich zum Teil drastisch. Methoden für eine konsistente Lösung dieser Herausforderungen stehen zur Verfügung, auch wenn sie aufgrund der mangelnden Datengrundlage bislang nicht für CEA zu *Climate Engineering* nutzbar gemacht werden konnten. Das zentrale Instrument dafür ist die Entscheidung über ein Diskontprogramm, das den Entscheider in die Lage versetzt, Kosten (oder Wirkungen), die zu unterschiedlichen Zeitpunkten entstehen, miteinander vergleichbar zu machen. Um den Entscheider nicht in interne Widersprüche zu verwickeln, muss dieses Programm gewissen Konsistenzkriterien genügen (Koopmans 1960), behält aber noch vielfältige Freiheitsgrade. Beispielsweise sind auch nichtkonstante Diskontrenten möglich. Hyperbolische Diskontprogramme beispielsweise erlauben dem Entscheider, auch zeitlich weit entfernten Generationen ausreichendes Gewicht einzuräumen, ohne Inkonsistenzen einzugehen (Groom et al. 2005). Diese Logik kann bei Vorliegen von als seriös eingestuften Projektionen von politischen Entscheidern auch unmittelbar in die planerische Praxis umgesetzt werden. Ein praktisches Beispiel hierfür ist die Evaluation öffentlicher Großprojekte in Großbritannien. Dort ist für die Vergleichbarkeit von Nutzen und Kosten zu unterschiedlichen Zeitpunkten eine hyperbolische Diskontrate vorgesehen, die mit der Zeit abnimmt und somit spätere Zeitpunkte in größerem Maße berücksichtigt. Der Leitfaden für Projektevaluierung des Britischen Schatzamtes, bekannt als *The Green Book*, schlägt beispielsweise eine jährliche Diskontrate von 3,5 Prozent für die ersten 30 Jahre eines Projektlebens vor. Kosten und Nutzen, die zu einem späteren Zeitpunkt anfallen, werden mit einer im Zeithorizont weniger stark fallenden Rate abgezinst. Für Effekte in 100 Jahren ist beispielsweise ein Diskontfaktor von 0.051 vorgesehen: Ein für das Jahr 2112 vorausgesagter Schaden von 1 Mrd. Euro – verursacht durch eine heute durchgeführte CE-Maßnahme – würde somit in die Evaluation mit 51 Mio. Euro einfließen. Dies ist deutlich mehr als bei konstanter Diskontrate, bei der die gleichen Schäden nur mit 32 Mio. Euro in die Berechnung eingehen würden (siehe HM Treasury 2003: Annex 6). Wichtig ist bei der Berücksichtigung von intra- und intergenerativen Verteilungseffekten, dass die gewählten Gewichtungen miteinander vereinbar sind (Dasgupta 2008).¹²

3.2.5 Kosten-Effektivität-Analyse unter Risiko und Unsicherheit

Das Vorliegen von hohem Risiko und signifikanter Unsicherheit ist ein allgemeiner Befund aller vorhandenen Studien zu *Climate Engineering* (Royal Society 2009; GAO 2011; Rickels et al. 2011). Angesichts des problematischen Wissensstandes ist die in den meisten Studien verfolgte Lösung, auf eine Integration der risiko- oder unsicherheitsbehafteten Komponenten innerhalb der CEA zu verzichten, pragmatisch. Risiko- und Unsicherheitsaspekte werden einfach separat angeführt (GAO 2011) oder zumindest im Hinblick auf Größenordnungen grob klassifiziert (Royal Society 2009).

Bei sich verbessernder Informationslage und entsprechenden Ressourcen ist es sowohl möglich als auch sinnvoll, Aspekte von Risiko und Unsicherheit im Rahmen einer CEA explizit zu berücksichtigen. Mit entsprechendem Mitteleinsatz ist eine verbesserte Integration möglich, die die Möglichkeiten moderner CEA nutzen (Boardman et al. 2011). Erforderlich ist dafür in jedem Fall, Information über die generelle oder spezifische Risikohaltung der Kostenträger zu erhalten. Eine Ausweitung des Kreises der Kostenträger erfordert im Idealfall Daten über die individuelle Risikoaversion oder zumindest auf Bevölkerungsebene repräsentative Parameter, um eine solche Risikoaversion zu quantifizieren. Darüber hinaus ist von Wichtigkeit, ob die Risikoaversion der Betroffenen als annähernd generisch betrachtet werden kann oder spezifisch von der verwendeten Technologie abhängig ist (z.B. Viscusi 1995). Auf technologiespezifischer Ebene kann diese Information ausschließlich auf direktem Weg erfahren werden (z.B. experimentell, Holt und Laury 2002). Auf Populationsniveau kann auf empirisch erhobene Daten zurückgegriffen werden, falls generische Risikoaversionsschätzungen als ausreichend eingeschätzt werden (Sunstein 2002). Sollte diese Informationen vorliegen, stehen unterschiedliche Techniken zur Verfügung, um sowohl das Tragen von Risiko durch den Betreiber (wie durch

¹² Stern (2007) traf in dieser Hinsicht auf fundierte Kritik.

Unsicherheit über direkte Kosten) als auch die Aufbüdung von Risiken auf Betroffene in die Kostenkalkulation einer CE-Maßnahme einfließen zu lassen. Ein Beispiel ist die Integration solcher Risiken in Form eines Kostenaufschlags (Boardman et al. 2011). Diese Risikoprämie auf die risikoreichere Option verschiebt dann die relative Bewertung zugunsten von Option mit geringerer Unsicherheit (Randall 2011).

Besondere Aufmerksamkeit widmet die Analyse von CE-Technologien dem Risiko unumkehrbarer Effekte von Eingriffen in das Klimasystem. Dieses Problem ist seit Langem aus der Diskussion über Emissionskontrolle bekannt, allerdings in entgegengesetzter Richtung: Dort wird befürchtet, dass unzureichende Emissionskontrolle zum Überschreiten von Schwellenwerten in der CO₂-Konzentration oder der Oberflächentemperatur führen könnte, die den anthropogenen Klimawandel signifikant beschleunigen könnten bzw. (annähernd) irreversible Veränderungen des Klimasystems hervorrufen können (Fankhauser 1995; Schneider 2004). Auch Irreversibilitäten dieser Art können in der CEA in Form eines Kostenaufschlages berücksichtigt werden (Arrow und Fisher 1974). Bei jenen unsicheren CE-Optionen, die mit Irreversibilitäten behaftet sind, drückt sich dieser Aufschlag dadurch aus, dass mit dem Einsatz dieser Technologien aus entscheidungsoptimalen Gesichtspunkten im Vergleich zu den weniger unsicheren Technologien noch länger gewartet werden sollte. Es ergibt sich ein sogenannter Quasi-Optionswert. Das Warten ist ein Verzicht auf eine wohlfahrtsstiftende Maßnahme und geht als Kostenpunkt in die CEA ein.¹³ Auch extremere Formen von Risikohaltungen, z.B. eine Ambiguitätsaversion seitens des Entscheiders, könnten nach dem heutigen Stand der Literatur vergleichendes Bewertungsmodell im Stile einer CEA berücksichtigt werden (Barrieu und Sinclair-Desgagné 2006). Dass dies in den bisherigen Studien noch nicht geschehen ist, spiegelt hauptsächlich den noch jungen Stand der ökonomischen Literatur zu *Climate Engineering* wider.

Aus dynamischer Perspektive besteht die Möglichkeit, den engen Zusammenhang zwischen Risikoaversion und abnehmendem Grenznutzen zu nutzen, um sowohl den Aspekt intergenerativer Gerechtigkeit als auch der Unsicherheit durch eine passende Wahl des Diskontprogramms gleichzeitig zu berücksichtigen. Abnehmende Diskontraten erfreuen sich solider theoretischer Fundamente aus der *Social-Choice*-Theorie (Chichilnisky 1996) und empirischer Evidenz (Frederick et al. 2002) und sind mit kumulativer Unsicherheit sowohl in den zukünftigen Diskontraten (Weitzman 1998) als auch in den Konsumpfaden der Bevölkerung (Gollier 2002) vereinbar. Ein hyperbolisch verlaufendes Diskontprogramm für zukünftige Kosten und Nutzen ist somit insbesondere in solchen Fällen gerechtfertigt, in denen Unsicherheit ein zentrales Charakteristikum der Entscheidungssituation ist. Die Bewertung von CE-Optionen im Rahmen einer CEA ist daher ein klarer Kandidat für eine hyperbolische Behandlung zu unterschiedlichen Zeitpunkten entstehender Kosten und Nutzen. Wie in Abschnitt 3.2.4. erwähnt, werden vergleichbare Verfahren in der Projektevaluierung bereits praktisch durchgeführt.

3.2.6 Vergleichende Bewertung von CE-Maßnahmen

Vor dem Hintergrund dieser Erläuterungen geben Tabellen 2 und 3 den aktuellen Informationsstand der wissenschaftlichen Forschung aus Studien des BMBF (Rickels et al. 2011), des GAO (2011) und der Royal Society (2009) übersichtsartig wider. Tabelle 2 widmet sich dabei dem Wissenstand im Bereich von RM-Technologien, Tabelle 3 jenem im Bereich von CDR-Technologien. Die wichtigsten Optionen werden dabei sequentiell behandelt. Für jede Technologie fasst die Tabelle zum einen das

¹³ Im Gegensatz zum passiven Lernen steht aktives Lernen. Je nach antizipierten Möglichkeiten ließe sich durch aktives mehr Lernen mehr über Wirksamkeit, Sicherheit und Kosten der Technologien erfahren (Wieland 2000). Entsprechend können sich vollkommend andere Rangordnungen für die Technologien ergeben als jene die unter der Haltung des passiven Lernens entstehen. Im Hinblick auf CE-Technologien besteht bei aktiven Lernen aber vor allem das Problem, dass sich Kriterien wie Wirksamkeit, Sicherheit und Kosten nicht auf einer Skalenebene wie Feldversuche ermitteln lassen, sondern sich der Erkenntnisgewinn auf technologische Umsetzungsdetails beschränken würde (Rickels et al. 2011).

maximal zu erwartende Volumen zusammen; zum anderen finden sich in der Literatur bekannte Daten zu den betriebswirtschaftlichen, also für den Betreiber relevanten, Kosten pro Einheit Strahlungsreduktion. Darunter berichten wir von den Unsicherheiten, mit denen diese Kosten behaftet sind; damit reflektieren die Angaben den aktuell noch sehr begrenzten Informationsstand, der z.T. daher rührt, dass bei keiner der zitierten Studien ausreichende Mittel für eine umfassende Kostenanalyse zur Verfügung standen. In der dritten Spalte berichtet die Tabelle über mögliche Externalitäten.

Tabelle 2:

Übersicht über Kosten-Effektivität-Analyse für die wichtigsten RM-Technologien

Technologie	Potential	Schätzungen zu direkten Kosten und zentralen Unsicherheiten		Schätzungen zu externen Kosten und zentralen Unsicherheiten
		Variable Kosten in Mrd. USD pro W/m ² und Jahr	Fixkosten in USD	
Weltraumbasiert (Angel 2006)	Unbegrenzt	1700 (Rickels et al. 2011)	200 Billionen	Klimaveränderungen möglich, aber evtl. schwächer als bei anderen Maßnahmen (Caldeira und Wood 2008) - Niederschlagsmuster - Meeresströmungen - Auswirkungen auf astronomische Forschung möglich
		- Lebensdauer - Kosten der Reflektoren	- Kosten der Hochbringung - Anzahl der benötigten Reflektoren - Energiebedarf	
Ausbringung von Schwefel	unbegrenzt	2-67 (Rickels et al. 2011)	Flotte: 6-66 Mrd. Basis: je 1 Mrd. 35-65 Mrd. (inkl. einem Jahr Anwendung)	- Höheres Pflanzenwachstum (positiver indirekter Effekt) - Abnahme der Ozonschicht (Tilmes et al. 2008; Solomon 1999) - Abschwächung des Niederschlags in Indien, China und der Sahelzone (Robock et al. 2008; Ricke et al. 2010; Jones et al. 2010) - Auswirkungen auf Wasserkreislauf (Trenberth und Dai 2007) - Negative Auswirkung auf Solarenergie durch erhöhte diffuse Strahlung (Murphy 2009)
		- Koagulation der Partikel - Unklare Effektivität (Heckendorn et al. 2009)	Teilweise werden noch nicht entwickelte Flugzeuge oder Luftschiffe vorausgesetzt	
Ausbringung von Nanopartikeln in die Stratosphäre (Keith 2010a)	unbegrenzt	Partikel sind in entsprechender Form noch nicht einsatzfähig		Prinzipiell ähnliche Nebenwirkungen wie bei Schwefelaerosolen. Deutliche Verbesserungen jedoch denkbar.
Modifikation von Zirruswolken (Mitchell und Finnegan 2009)	-1 bis -4	0,007 (Rickels et al. 2011)	k. A. (tendenziell niedrig) (Rickels et al. 2011)	Starke Veränderung des regionalen Klimas und Wasserkreislaufs möglich Hohe Modellunsicherheit
	Klimaeffekt unklar	Unklar: benötigte Menge		
Modifikation mariner Wolken	-4 (Rickels et al. 2011)	0,135 (Rickels et al. 2011)	1,667 Mrd. (Rickels et al. 2011) 2,3-4,7 Mrd. (Salter et al. 2008)	Auswirkungen auf Wasserkreislauf (Rasch et al. 2009) Widersprüchliche Resultate: - Weniger Niederschlag im Amazonasgebiet (Jones et al. 2009) - Mehr Niederschlag über Land (Bala et al. 2010)
		- Automatischer Betrieb möglich? - Nötige Partikelkonzentration erreichbar?	Wie viele Schiffe sind nötig?	
Erhöhung der Albedo von Städten	-0,2 (Rickels et al. 2011)	2000 (Rickels et al. 2011)	k. A. (tendenziell hoch) (Rickels et al. 2011)	
		Anteil urbaner Gebiete unsicher		
Erhöhung der Albedo von Wald- und Grünflächen	-1 (Rickels et al. 2011)	k. A.	k. A. (tendenziell niedrig bis mittel) (Rickels et al. 2011)	Ökologische Auswirkungen hohe Modellunsicherheit
Erhöhung der Albedo von Wüsten (Gaskill 2004; Lenton und Vaughan 2009)	-3	1000 (Rickels et al. 2011)	k. A. (tendenziell hoch) (Rickels et al. 2011)	Starke Auswirkungen auf Zirkulation möglich -> Monsun hohe Modellunsicherheit
		Aufrechterhaltung der Reflektivität		
Erhöhung der Albedo der Ozeane	Keine Studien vorhanden			

Quelle: Royal Society (2009); Rickels et al. (2011); GAO (2011).

Beachtenswert sind zwei Aspekte: Zum einen wird deutlich, dass der Wissensstand aktuell noch sehr unvollständig ist, insbesondere zu Schlüsselaspekten einzelner Technologien. Zum anderen zeigt die Tatsache, dass es, wenn mehr als eine Studie vorliegt, zum Teil eklatante Differenzen in der Einschätzung gibt. Also ist der weitere Forschungsbedarf als sehr hoch einzuschätzen.

Wie jede Heuristik ist auch die CEA fehlbar, weshalb die hier dargestellten Ergebnisse kritisch zu hinterfragen sind. Die möglichen Fehler sind unterschiedlicher Natur: Kostenkategorien werden nicht berücksichtigt, Kostenentwicklungen werden falsch eingeschätzt, Kosten werden falsch bewertet und/oder Kosten werden falsch gemessen. Unterschiedlicher Natur sind auch die Gründe für das Eintreten der Fehler: Manche sind generischer Natur und spiegeln Informationsdefizite wider. Viele aber sind eine Folge von Planungsoptimismus oder selektiver Wahrnehmung von Kosten aus kognitiven, emotionalen oder strategischen Gründen und damit von der Person des und der die CEA Durchführenden nicht zu trennen. Es ist nicht zu erwarten, dass andere Methoden solche Probleme prinzipiell umgehen können.

Tabelle 3:

Übersicht über Kosten-Effektivität-Analyse für die wichtigsten CDR-Technologien

Technologie	Potential	Schätzungen zu direkten Kosten und zentralen Unsicherheiten		Schätzungen zu externen Kosten und zentralen Unsicherheiten
		Variable Kosten in USD pro eingelagerter Tonne CO ₂	Fixkosten	
Zum Vergleich: Herkömmliche Emissionskontrolle		90–120 (in 2035) (IEA 2010)	220 Mrd. USD/Jahr (2010–2020) 940 Mrd. USD/Jahr (2020–2030) 1280 Mrd. USD/Jahr (2030–2035) (IEA 2010)	
		Simulationsergebnisse für mittelfristige Stabilisierung auf 450ppm CO ₂ equiv		
Umwandlung von Biomasse in Biokohle	5 Gt CO ₂ /Jahr (Rickels et al. 2011) 1–2 (Laird et al. 2009) 5,5–9,5 (Lehmann et al. 2006) Gt CO ₂ /Jahr	15–76 (Rickels et al. 2011)	k. A. (tendenziell mittel) (Rickels et al. 2011)	Landnutzungskonflikte bei Biomasseproduktion
	Biomasseproduktion Unklarer globaler Nettoeffekt (Woolf et al. 2010)	Verwendete Biomasse und Verfahren (de Gryze et al. 2010)		
Aufforstung (dezentral)	4 Gt CO ₂ /Jahr (Rickels et al. 2011) 1,3–13,8 (Nabuurs et al. 2007) Gt CO ₂ /Jahr	19–101 (Rickels et al. 2011)	k. A. (tendenziell niedrig) (Rickels et al. 2011)	Landnutzungskonflikte (Nabuurs et al. 2007) Wasserknappeit
	Treibhausgasemission bei Aufforstung (Murray 2003) Menge des aufgenommenen CO ₂	Kosten der Landfläche (van Kooten und Sohngen 2007) Leckage (Ellis 2001)		Möglicherweise negativer Einfluss auf Albedo (Bathiany et al. 2010; Pongratz et al. 2010)
Eisendüngung des Ozeans	5 Gt CO ₂ /Jahr (Rickels et al. 2011)	8–82 (Rickels et al. 2011)	k. A. (tendenziell mittel) (Rickels et al. 2011)	Ökologische Auswirkungen
	Emission anderer Treibhausgase Dauerhafte Einlagerung möglich? (Körtzinger und Wallace 2002; Buesseler et al. 2008)	Preiseffekte auf Eisen Benötigte Menge Ausmaß des Koagulationsproblems (Rickels et al. 2011)	Anzahl und Art der Schiffe (Harvey 2008)	Reduktion von Sauerstoff im Ozean, ggf. Ausweitung von Sauerstoffminimumzonen Zusätzliche Emission von Treibhausgasen (im Wesentlichen N ₂ O) (Rickels et al. 2011) Auswirkungen auf Fischbestände (Buesseler et al. 2008)

noch Tabelle 3:

Düngung des Ozeans von Land aus	Heutiger Stand: Keine effektive CDR-Technologie (Lampitt et al. 2008; Oschlies et al. 2010a)			
Transport von Tiefenwasser an die Oberfläche	Bei dieser Technologie handelt es nicht im eigentliche Sinne um eine CDR-Maßnahme, da die CO ₂ -Aufnahme hauptsächlich durch die Temperaturrückkopplung in der terrestrischen Biosphäre stattfindet (Oschlies et al. 2010b). Entsprechend müsste diese Maßnahme mit dem Kohlenstoffeinlagerungspotential von RM-Maßnahmen verglichen werden, zu denen noch keine expliziten Studien vorliegen.			
Technologie	Potential	Schätzungen zu direkten Kosten und zentralen Unsicherheiten		Schätzungen zu externen Kosten und zentralen Unsicherheiten
		Variable Kosten in USD pro eingelagerter Tonne CO ₂	Fixkosten	
Ausbringung von pulverisiertem Olivin	4 Gt CO ₂ /Jahr (Rickels et al. 2011)	27–57 (Rickels et al. 2011)	k. A. (tendenziell hoch) (Rickels et al. 2011)	Luft- und Wasserqualität durch Bergbau Positiv: Ozeanversauerung wird entgegengewirkt
	Nettoeffekt unklar, da benötigter Energieaufwand nicht bekannt (Köhler et al. 2010)		Abbau, Transport, Ausbringung	Langfristiges ökologisches Gleichgewicht
Ausbringung von pulverisiertem Kalkstein	0,3 Gt CO ₂ /Gt CaCO ₃ (Harvey 2008; Rickels et al. 2011)	57–72 (Rickels et al. 2011) 50–100 (Rau et al. 2007)	k. A. (tendenziell hoch) (Rickels et al. 2011)	Luft- und Wasserqualität durch Bergbau Positiv: Ozeanversauerung wird entgegengewirkt (Rickels et al. 2011)
			Abbau, Transport, Ausbringung	Langfristiges ökologisches Gleichgewicht
Ausbringung von Kalziumoxid bzw. Kalziumhydroxid	1,5 Gt CO ₂ /Gt CaCO ₃ (Rickels et al. 2011) Speicherung von anfallendem CO ₂	45–54 (Rickels et al. 2011)	k. A. (tendenziell hoch) (Rickels et al. 2011)	Positiv: Ozeanversauerung wird entgegengewirkt (Rickels et al. 2011)
Air Capture mit Natriumhydroxid als Sorptionsmittel	1,0 bis 1,2 Mt CO ₂ /Einheit (Rickels et al. 2011)	69–430 (Rickels et al. 2011) 27–135 (Pielke Jr. 2009) 420–630 (Ranjan und Herzog 2011)	247–480 Mio. USD/Einheit (Rickels et al. 2011)	Unsicherheiten der geologischen und marinen Speicherung von CO ₂ (Oruganti und Bryant 2009)
		Reaktionsmaterial und Energiebedarf (Socolow et al. 2011)		
Erhöhung der nordatlantischen Tiefenwasserbildung	Im Hinblick auf Emissionen bei der Implementierung stellt diese Technologie keine effektive CDR-Technologie dar (Zhou und Flynn 2005)			

Quelle: Royal Society (2009); Rickels et al. (2011); GAO (2011).

3.3 Ansätze zwischen Vollständigkeit und Vergleichbarkeit

3.3.1 Einsichten aus der Praxis

Im Spannungsfeld von Vollständigkeit und Vergleichbarkeit ist eine Reihe von Lösungen angesiedelt. Manche der Lösungen sind als methodische Alternativen in der Literatur benannt (z.B. Multi-Kriterien Analyse), manche stellen einfach pragmatische und fallspezifische Ansätze in der Literatur dar. In der methodischen Literatur werden häufig zwei mit der CEA konkurrierende Ansätze ins Feld geführt.

Da ist einerseits die Multi-Kriterien-Analyse (*Multi-Criteria Analysis*, MCA). Ziel der MCA ist die Integration sowohl ökonomischer als auch sozialer und kultureller Aspekte in die Bewertung (Nijkamp et al. 1990). Voraussetzung für die Durchführung einer MCA für *Climate Engineering* ist die vollständige Bestimmung der relevanten Bewertungskriterien. Deren Erhebung und Messung kann jedoch in vollkommen unterschiedlichen Einheiten und auch qualitativ stattfinden. Der Entscheider kann auch

eine Gewichtung der unterschiedlichen Kriterien festlegen und damit eine Entscheidungsfindung unterstützen; diese Gewichtung ist jedoch von ähnlicher Komplexität wie die Festlegung einer einheitlichen Maßgröße. MCA ist daher dort am leistungsfähigsten, wo es um die Aussonderung unattraktiver Alternativen geht. Dies scheint im Kontext von CE-Maßnahmen bereits ein wichtiger Gewinn zu sein. Die Auswahl einer präferierten Alternative hingegen geht vielfach über die Möglichkeiten einer MCA hinaus und wäre von einer MCA zu CE-Maßnahmen nicht zu erwarten. Oft wird die MCA auch lediglich als informativer Hintergrund für einen nachgeschalteten deliberativen Prozess gesehen, der den heuristischen Entscheidungsprozess durch einen politischen Entscheidungsprozess ersetzt. Auch dies wäre eine produktive Einsatzmöglichkeit von MCA im Zusammenhang mit einer Entscheidung zu CE-Optionen.

Zum anderen gibt es die vorsorgezentrierten Modelle (Ackerman und Heinzerling 2004). Die vorsorgezentrierten Modelle sind im Kontext von *Climate Engineering* attraktiv, da es sich um Modelle handelt, die Risiko und Unsicherheit in den Mittelpunkt der Entscheidung stellen. Auch hier ist die Erarbeitung der relevanten Kriterien und deren Messung erforderlich, zudem aber auch die Verschneidung dieses Prozesses mit unterschiedlichen Szenarien, unter denen beispielsweise gewisse Temperaturziele oder Niederschlagseffekte erreicht werden. Der Informationsbedarf ist somit höher. Wichtig für vorsorgezentrierte Modelle ist die Orientierung an *Worst Case*, d.h. dem schlechtesten Ergebnis, das möglicherweise von einer gewissen CE-Maßnahme zu erwarten ist.

Bei gleicher Qualität des methodischen Vorgehens unterscheiden sich diese Ansätze von der CEA im Hinblick auf zwei Aspekte. Der eine ist der Verzicht auf eine durchgängige Bewertung in Form von monetarisierten Kosten. Damit entgehen diese Ansätze dem Problem des Bewertungsfehlers. Der andere Aspekt ist der weitgehende Verzicht auf Güterabwägung. Beides sind ebenfalls Möglichkeiten, mit den Komplexitäten umzugehen. Allerdings ist der Beitrag zur Entscheidungshilfe durch den Wegfall einer Vereinheitlichung von Effekten und die fehlende Güterabwägung reduziert.

3.3.2 Entscheidungskriterien

Unabhängig vom in der Praxis gewählten Bewertungsprozess muss eine globale Entscheidung über Forschung und Einsatz von CE-Technologien sich an Kriterien messen lassen, die über die Einzelentscheidung hinaus Gültigkeit haben. Diese Kriterien geben einen normativen Minimalrahmen vor, innerhalb dessen sich eine gesellschaftliche Entscheidung zum *Climate Engineering* bewegen soll.

Kandidaten für diese Kriterien ergeben sich aus einer Reihe moralphilosophischer Erwägungen, die in bedeutendem Ausmaß bereits Eingang in das Völkerrecht gefunden haben. Im Kontext von *Climate Engineering* ist der zentrale Anknüpfungspunkt dabei die Rio-Erklärung über Umwelt und Entwicklung, auf die bereits in Kapitel 3 eingegangen wurde. Dieser völkerrechtliche Rahmen ist für alle Entscheidungen für oder gegen die Erforschung und den Einsatz von CE-Technologien verpflichtend einzuhalten. In ihm finden sich die in rechtliche Form gegossenen Prinzipien der Menschenrechte und der intra- und intergenerativen Gerechtigkeit. Neben dem völkerrechtlichen Rahmen ergeben sich aus grundlegenden moralphilosophischen Erwägungen eine Reihe weiterer Kriterien, die in Frage kommen, darunter das Pareto-Prinzip, die Verhandlungslösung zur Wohlfahrtsmaximierung oder eine konkrete Umsetzung des Vorsorgeprinzips.

Nach dem Pareto-Prinzip sollten aus konkurrierenden Maßnahmen zum Klimaschutz lediglich jene in Betracht kommen, bei denen mindestens ein Betroffener besser gestellt wird, ohne einen anderen Betroffenen schlechter zu stellen. Aus völkerrechtlicher Sicht sind die Betroffenen einzelne Länder, doch steht aus moralphilosophischer Sicht auch einer individuellen Interpretation dieses Prinzips nichts entgegen. Sowohl die Bestimmung der erwarteten Besser-(Wohlfahrtsgewinn) oder Schlechterstellung (Wohlfahrtsverlust) als auch die vergleichende Einschätzung (Nettowohlfahrtsgewinn) ist jedem Betroffenen selbst überlassen. Dieses Prinzip hat eine politische Entsprechung in der Einstimmigkeitsregel (Mueller 2003): Jeder Betroffene kann auf Basis eigener Einschätzung der Wünschbar-

keit der Maßnahme ein Votum abgeben. Nur wenn niemand gegen eine CE-Maßnahme stimmt, kann diese als gesellschaftlich durchführbar akzeptiert werden.

Eine Anwendung des Pareto-Prinzips auf den CE-Kontext wäre aus vielen Gründen problematisch: Beispielsweise würde dies auch aus globaler Sicht äußerst sinnvolle Maßnahmen verunmöglichen, wenn auch nur ein einziger Betroffener sich daraus Nachteile erwartet. Die zu erwartenden Wohlfahrtsverluste für alle anderen Betroffenen wären damit nur schwierig zu rechtfertigen. Eine Alternative ist dagegen das Kriterium einer Art globalen Wohlfahrtsmaximierung, die auf Basis der globalen Summe der individuell anfallenden Gewinne und Verluste jene Maßnahme wählt, die eine möglichst hohe globale Summe erzielt. Dabei können allerdings für einzelne Gruppen oder Länder beträchtliche Verluste auftreten, für die eine Kompensation vorzusehen wäre. Dies kann entweder dadurch geschehen, dass explizit Wohlfahrtstransfers von den Gewinnern zu den Verlierern aus einer solchen Maßnahme vorgesehen werden, welche wiederum das Einverständnis aller Betroffenen voraussetzen. Dies verlangt prozedural nach einem Verhandlungsprozess zwischen allen Betroffenen über die Höhe von Kompensationen bzw. im Risikokontext von *Climate Engineering* über die Ausgestaltung sinnvoller Versicherungsinstitutionen. Zwar schränkt die implizite Einstimmigkeit die Menge der erreichbaren Ergebnisse auch hier stark ein und leistet strategischem Verhalten von Einzelbetroffenen Vorschub. Dennoch scheint eine solche Regel unter der hohen Heterogenität der Effekte, der Komplexität der Wirkungen und den gegebenen Unsicherheiten besonders attraktiv.

Eine politische Mehrheitsregel würde dieses Dilemma zugunsten einer größeren Menge an durchsetzbaren Ergebnissen lösen. Dies impliziert allerdings, dass auch ohne Kompensation gehandelt werden kann. Eine Rechtfertigung ist dabei problematisch.

Das in Grundsatz 15 der Rio-Erklärung enthaltene Vorsorgeprinzip bietet einen wichtigen, risikobewussten Startpunkt für ein Entscheidungskriterium. Ohne weitere inhaltliche Deutung bietet es allerdings keine klare Handlungsanweisung, da die international akzeptierte Formulierung inhaltlich vieldeutig ist. Erst spezifische Interpretationen sind leistungsfähig, beispielsweise als Maxmin-Kriterium, das empfiehlt, jene Maßnahme auszuwählen, die unter den ungünstigsten Verhältnissen das beste Ergebnis erzielt (Gardiner 2006). Als Kriterium ist das Vorsorgeprinzip daher nur begrenzt tauglich. Einerseits gibt es keinen allgemeinen Konsens über die Interpretation, der Voraussetzung für diese Anwendung wäre. Andererseits ist über die Konsequenzen einer solchen Wahl des Kriteriums schon aus theoretischer Sicht noch zu wenig bekannt, um die Entscheidung zugunsten eines solchen Kriteriums verständlich treffen zu können.

3.4 Auswirkungen des Climate Engineering auf klimapolitische Handlungsoptionen

Trotz einiger Fortschritte in der CE-Forschung ist die Wechselwirkung zwischen CE-Optionen und Emissionskontrolle noch unzureichend verstanden. Für die Unterklasse der CDR-Maßnahmen kommen in der bisher gründlichsten deutschsprachigen Untersuchung der Interdependenzen Rickels et al. (2011) zu dem vorläufigen Ergebnis, dass CDR-Maßnahmen aufgrund ihrer neutralen oder negativen (entziehenden) Wirkung auf den Kohlenstoffkreislauf keine (oder nur wenige) nachteilige Auswirkungen auf die bestehenden Strategien zur Emissionsvermeidung oder Klimaanpassung haben. Dieser Befund wird von einer Großzahl der neueren nationalen und internationalen Studien geteilt (Royal Society 2009; GAO 2011; Ginzky et al. 2011; Long et al. 2011).

Der Kenntnisstand über die Wechselwirkung zwischen RM-Forschung und/oder Einsatz und Emissionskontrolle ist noch begrenzter. Die spezifischen Eigenschaften der RM-Technologien, vor allem die kurzfristige Wirkungsweise und die nur partielle Kompensation der erhöhten Treibhausgaskonzentrationen, erhöhen die Komplexität dieser Wechselwirkung massiv. Die Präsenz einer potentiellen RM-Option wird in der Forschung meist so konzipiert, dass die RM-Forschung oder der Einsatz eine abschwächende Wirkung auf die Emissionsreduktionsbemühungen hat. So untersuchen beispielsweise

Moreno-Cruz und Smulders (2010) die Interaktion von SRM und Emissionskontrolle in einem statischen Modell und zeigen, dass beide Substitute sind. Dieser Substitutionseffekt von Emissionskontrolle hin zum Einsatz von SRM wird verstärkt, wenn die Entscheidungen dezentral getroffen werden. Hier zeigt sich das Trittbrettfahrerproblem: Jedes Land verlässt sich auf das andere im Hinblick auf Emissionskontrolle, aber in diesem Fall auch auf den Einsatz von SRM-Technologien, so dass die Emissionskontrolle noch stärker reduziert wird als ohne die Verfügbarkeit von SRM-Technologien:

„Ein zentrales Ergebnis der gesamtwirtschaftlich ausgerichteten Modelle ist die Substitutionalität von Emissionsvermeidung und RM-Maßnahmen. Sobald diese Maßnahmen als Klimaschutzoption verfügbar werden, ist es optimal, die Anstrengungen zur Emissionsvermeidung zu verringern. Dieses Ergebnis ist angesichts der in den Modellen getroffenen Annahmen nicht überraschend, es widerlegt aber die häufig geäußerte Wunschvorstellung, CE solle nicht als Ersatz für Emissionsvermeidung eingesetzt werden. Die wirtschaftswissenschaftlichen Analysen zu dieser Frage befinden sich aber noch weitgehend im konzeptionellen Stadium und sind ausschließlich theoretisch ausgerichtet.“ (Klepper und Rickels 2011: 100).

Die aus Sicht eines Entscheidungsträgers rationale Absenkung der Emissionsreduktionsbemühungen kann aber in mehrerer Hinsicht problematisch sein: Zum einen basiert die Optimalität dieser Absenkung auf der Annahme, dass RM für einen langen Zeitraum ununterbrochen angewendet wird (*Lock-in*-Effekt). Eine unvorhergesehene Unterbrechung (aus politischen oder technischen Gründen) kann dann sogar zu einem Szenario mit Wohlfahrtsverlusten gegenüber dem *Business-as-usual*-Szenario mit relativ hohen Emissionen und ohne CE-Option führen (Gramstad und Tjøtta 2010; Goes et al. 2011). Ein verwandtes Resultat liefert die Studie Moreno-Cruz und Keith (2012), indem nachgewiesen wird, dass durch Unsicherheit über die Effektivität der RM-Technologien deren Potential als Versicherung gegen drastischen Klimawandel reduziert wird und somit ein höheres Maß an Emissionskontrolle ratsam erscheint.

Zum anderen gibt es Befürchtungen, dass der Versicherungscharakter der RM-Technologien zu einem sogenannten *Moral Hazard* führt: Danach sorgt die Gewissheit über die leichte Anwendbarkeit von RM dafür, dass der Wille zur CO₂-Vermeidung und Anpassung übermäßig nachlässt und damit aus der „Versicherung“ durch RM ein pro-risikobehaftetes Verhalten erwächst (Keith 2010b). Aus Sicht der Befürworter des *Moral-Hazard*-Arguments verdrängt RM die beiden anderen Strategien, obwohl damit ein höheres Risiko einhergeht. Denkbare Ursachen für eine solche suboptimal hohe Absenkung der Emissionskontrolle sind beispielsweise systematische Unterschätzung der Risiken durch Kippunkte im Klimasystem (Weitzman 2009) oder auch die Tatsache, dass zwischen Bereitstellung der RM-Option und deren Einsatz eine Verschiebung in der Bewertung der RM-Methode möglich ist. So könnte die Aussicht, dass die RM-Technologie wahrscheinlich eingesetzt werden wird, heutige Entscheidungsträger zum verstärkten Absenken der Emissionskontrolle bewegen (Goeschl et al. 2013).

Die Komplexität des Zusammenspiels von CE und Emissionsreduktion wird daran deutlich, dass es unter gewissen Bedingungen zu einem Durchbrechen des Substitutionseffektes, also einer Anhebung der Emissionsreduktion, kommen könnte. Neben einem derartigen Resultat im intergenerationellen Modell von Goeschl et al. (2013) kommt Moreno-Cruz (2010) zu dem Ergebnis, dass die Anwendung von RM-Techniken jene Staaten, die die negativen Externalitäten der Anwendung am deutlichsten spüren, dazu bewegen könnte, ihre CO₂-Reduktionsmaßnahmen zu erhöhen. In dieser Logik wirkt der vom RM-Einsatz negativ Betroffene auf den Anwender ein, indem er den Anreiz für die Anwendung – die erhöhte CO₂-Emission – reduziert. Dabei handelt es sich aber um ein sehr theoretisches Resultat mit anspruchsvollen Bedingungen – so müsste die Emissionskontrolle des einzelnen Staates relativ schnell den Anreiz für den RM-Einsatz des anderen Staates senken. Berücksichtigt man die beschränkten Möglichkeiten eines einzelnen Staates, eine relativ schnelle Absenkung der Emissionskontrolle zu erreichen, wird deutlich, dass es sich eher um eine theoretische Überlegung handelt. Trotzdem zeigen

diese theoretischen Überlegungen sehr deutlich, dass durch eine mögliche Einsatzbereitschaft von RM-Technologien neue Anreize in der Klimapolitik entstehen können, die nicht alle zwangsläufig dazu führen, dass die Emissionskontrolle eingeschränkt wird.

Eine weitere Dimension erhält die Wechselwirkung von *Climate Engineering* und Emissionskontrolle dadurch, dass Prinzipien der Risikoversorge und die erwünschte Akzeptanz dieser neuartigen Technologien seitens der Gesellschaft eine verantwortungsvolle, insbesondere ergebnisoffen durchgeführte, Testphase nötig erscheinen lassen. Ein derartiger RM-Test könnte aber nur in einem räumlich und zeitlich mittel- bis großskaligen Rahmen geschehen (Robock 2009), weil die Wirkung der RM-Maßnahmen nur sehr schwer gegen das Hintergrundrauschen des Klimasystems abgegrenzt werden kann. Da ein solcher großskaliger Test das Risiko einer schwerwiegenden nachteiligen, wenn auch relativ kurzfristigen Wirkung birgt, dürfte dieser nicht leichtfertig erfolgen. Gleichzeitig müsste ein solcher Test, wenn dessen Notwendigkeit erwiesen ist, frühzeitig durchgeführt werden, weil sonst dessen Test-Charakter in Frage steht. Denn fände der Test zu einem Zeitpunkt statt, zu dem die weitergehende Anwendung auf jeden Fall erfolgen müsste, weil sonst massive Schäden zu erwarten wären, dann wäre der Test kein ergebnisoffenes Experiment einer ungeprüften Technologie mehr (Olson 2011). In dieser Situation käme der Test einer Wahl zwischen zwei hohen Risiken gleich und wäre mit bestehenden Prinzipien der Risikoversorge nicht mehr vereinbar.

Aus diesem Gedankenexperiment lässt sich sodann die Forderung ableiten, dass ein verantwortungsvoller RM-Test nur so lange im Vorfeld einer ernststen „Klimasituation“ erfolgen kann, solange er abgebrochen bzw. wegen seiner nachteiligen Folgen auf die weitergehende Anwendung dieser speziellen RM-Technologie verzichtet werden kann. Aus dieser Überlegung ergibt sich daher ein anderer Zusammenhang zwischen CE-Erforschung, Test und Anwendung sowie Emissionsreduktion, als die Forschung ihn bislang erwogen hat. RM ist nur so lange zu testen, wie es zu ersetzen ist. Nimmt man diese Ableitung, so ergeben sich hieraus einige wichtige Implikationen für den verantwortlichen Umgang mit RM: Je geringer die weltweite CO₂-Reduktion ausfällt, desto kürzer ist der Zeitraum, in dem noch von einem verantwortungsvollen RM-Test gesprochen werden kann. Findet eine RM-Erstanwendung (ob als Test oder als Anwendung gedacht) erst im Falle einer „*Climate-Emergency-Situation*“ (Blackstock et al. 2009) statt, dann handelt es sich nicht mehr um einen Test, weil das Ereignis nachweislich nicht mehr mit herkömmlichen Strategien verhindert oder zeitnah rückgängig gemacht werden kann, also keine experimentelle Situation mehr vorliegt. Eine solche Situation sollte in jedem Fall vermieden werden, woraus sich ein Argument für höhere Emissionskontrolle ergibt, wenn überhaupt die Option von RM-Maßnahmen weiter verfolgt werden soll. Dieses Argument steht den Argumenten gegenüber, die rein ökonomische Modelle hinsichtlich der Substitutionalität von RM-Maßnahmen und Emissionskontrolle ableiten.

Offensichtlich sind mit diesen ersten Überlegungen in der Forschung die möglichen Ausprägungen der vielfältigen Wechselwirkungen zwischen *Climate Engineering* und Emissionskontrolle noch nicht annähernd ausgeschöpft. Insbesondere in der Frage des *Moral Hazard*, also inwiefern und aufgrund welcher gesellschaftlichen Prozesse es zu einer übermäßigen Absenkung der Emissionskontrolle kommen kann, gibt es dringenden Forschungsbedarf. Das gilt ganz besonders, da bereits Erforschung und Erprobung der CE-Technologien weitreichend wirksame Verschiebungen auf die aktuell zu treffenden Entscheidungen über die Emissionskontrolle haben könnten.

4 Die Struktur der CE-Debatte

Jonas Dovern, Sebastian Harnisch, Nina Janich, Achim Maas, Stephanie Uther

Die komplexe Debatte über *Climate Engineering* dreht sich sowohl in der Öffentlichkeit als auch in der Wissenschaft um die zwei zentralen Fragen nach der Erforschung und dem Einsatz von CE-Technologien. Dabei wird eine Vielzahl von Argumenten diskutiert, die jeweils verschiedene Kernthesen im Kontext der beiden zentralen Fragen stützen oder widerlegen. Die Darstellung der Debattenstruktur orientiert sich im Folgenden eng an der Beschreibung in Kapitel 2 in Rickels et al. (2011) und Betz und Cacean (2011).

4.1.1 Argumente für die Erforschung von Climate Engineering

Die zentrale Forschungsfrage ist, ob und in welcher Form eine bestimmte CE-Technologie erforscht werden soll. Voraussetzung ist die zentrale These, dass die Erforschung der CE-Technologie in einer bestimmten Form (z.B. theoretische Grundlagenforschung, Technologieentwicklung oder Feldversuche) geboten ist, positiv beantwortet wird. Diese These wird durch drei Nebenthesen gestützt, welche postulieren, dass (i) die CE-Technologie zu einem zukünftigen Zeitpunkt einsatzbereit sein sollte, (ii) die Nebenfolgen der Erforschung der CE-Technologie im Vergleich dazu, dass die CE-Technologie rechtzeitig einsatzbereit sein wird, vernachlässigbar sind und es (iii) keine Alternativen zur sofortigen Erforschung der CE-Technologie in der bestimmten Form gibt, die gleichermaßen dazu führen, dass die Technologie rechtzeitig einsatzbereit sein wird und die zugleich geeigneter sind als eine sofortige Erforschung.¹⁴

Vor allem die erste dieser drei Nebenthesen aus der Forschungsbegründung wird äußerst strittig debattiert. Entsprechend wird häufig eine alternative Forschungsbegründungen oder eine direkte Begründungen eines Forschungsverbotes verwendet, die nicht auf die zweite Nebenthese angewiesen sind, um die These vom Forschungsgebot zu stützen bzw. zu widerlegen. Dabei wird die These der notwendigen Einsatzbereitschaft bei den alternativen Forschungsbegründungen durch andere Ziele – wie den vorschnellen Einsatz zu verhindern, Vermeidungsmaßnahmen zu stärken oder informierte Entscheidungen über einen Einsatz vorzubereiten – ersetzt (vgl. Betz und Cacean 2011).

4.1.2 Argumente gegen die Erforschung von Climate Engineering

Die direkte Begründung eines Forschungsverbots stützt sich vor allem auf das Risikotransferargument, welches argumentiert, dass die Erforschung und der geplante Einsatz von *Climate Engineering* bedeuten, dass heute entstehende Risiken (des Klimawandels) auf zukünftige Generationen abgewälzt werden (Tabelle 4: A1), weil gleichzeitig weniger in Emissionsvermeidungsmaßnahmen investiert wird (Ott 2010a; Ott 2010b; Ott 2010c; Gardiner 2010: 293; Jamieson 1996: 331), sowie die Überlegung, dass *Climate Engineering* nur erforscht und durchgeführt werden sollte, wenn eine breite und wohlinformierte Zustimmung aller Betroffenen, d.h. vor allem der Öffentlichkeit, vorliegt (Tabelle 4: A2; Jamieson 1996: 329–330; Ott 2010a; Ott 2010b; Ott 2010c; Gardiner 2010: 293–294; Elliott 2010: 19).

Darüber hinaus wird die These, dass die Erforschung einer CE-Technologie geboten ist, im Hinblick auf zwei Aspekte angegriffen. Zum einen wird dadurch, dass auf mögliche oder wahrscheinliche, schädliche Nebenfolgen hingewiesen wird, bezweifelt, dass die Nebenfolgen der CE-Erforschung vernachlässigbar sind. Zum anderen wird argumentiert, dass es auch andere Optionen als eine schnelle

¹⁴ Abbildung 3 in Rickels et al. 2011 stellt die Beziehungen zwischen den Hauptthesen und Argumentgruppen der CE-Debatte anschaulich dar.

CE-Erforschung gibt, dass also die direkte Aufnahme der Erforschung von CE-Technologien mithin nicht alternativlos ist.

Tabelle 4:
Übersicht über wichtige Argumente in der CE-Debatte

	Kurzbezeichnung	Kurzerklärung
Gegen Erforschung und (geplanten) Einsatz		
A1	Risikotransferargument	Heute entstehende Risiken (des Klimawandels) werden durch Forschung bzw. (geplanten) Einsatz auf zukünftige Generationen abgewälzt
A2	Keine informierte Zustimmung	Wohlinformierte Zustimmung der Öffentlichkeit kann derzeit nicht vorliegen
Gegen Erforschung		
A3	Beeinträchtigung von Emissionsvermeidung	Erforschung würde zu einer merklichen Reduktion der Emissionskontrolle führen
A4	Selbstläuferproblematik	Erforschung würde (getrieben durch Partikularinteressen) ungebremst in der Anwendung münden, selbst wenn diese gar nicht erforderlich sein sollte
A5	Gefahr der kommerziellen Kontrolle	Technologien könnten in der Forschungsphase unter kommerzielle Kontrolle geraten
A6	Problem der Feldversuche	Vor allem bei RM-Technologien sind zur Erforschung großskalige Feldversuche notwendig, die einem Einsatz gleichkommen
A7	Beeinträchtigung von Emissionskontrolle (Moral Hazard)	Schon die Erforschung von CE-Technologien könnte zu einer Abnahme der Anstrengungen zur Emissionskontrolle führen
Gegen sofortige Erforschung		
A8	Spätere Erforschung ausreichend	Zukünftige Rahmenbedingungen noch gar nicht absehbar, weswegen eine spätere Erforschung ausreichend ist
A9	Moratorium	Vorschneller Einsatz könnte durch ein Forschungsmoratorium unterbunden werden
Für Einsatzbereitschaft		
A10	Effizienzargument	Kosten für CE-Maßnahmen liegen deutlich unter jenen für Emissionsvermeidung (oder Adaption)
A11	<i>Do-it-alone</i> -Argument	<i>Climate Engineering</i> (insbesondere RM) kann im Gegensatz zur Emissionsvermeidung auch von einer kleinen Gruppe von Staaten durchgeführt werden
A12	Einfachheitsargument	Mit <i>Climate Engineering</i> lässt sich ein gefährlicher Klimawandel aufhalten ohne unsere Lebensweise fundamental zu ändern
A13	2° C-Argument	CE-Technologien müssen einsatzbereit sein, um im Krisenfall den Temperaturanstieg auf 2° C begrenzen zu können
A14	Geringeres Übel	Die Menschheit könnte in eine (Klima-)Situation geraten, in der der CE-Einsatz das geringere Übel gegenüber einem ungebremsten Klimawandel darstellt
Gegen Einsatzbereitschaft		
A15	Partielle Kompensation	CE-Maßnahmen beheben nur einen Teil der anthropogenen Klimafolgen
A16	Hohe Folgekosten	Gesamtwirtschaftlichen Folgekosten eines großskaligen CE-Einsatzes könnten sehr hoch sein
A17	Mögliche Verschlimmerung	Aufgrund der Unsicherheiten über die Funktionsweise des Erdsystems könnte ein großskaliger CE-Einsatz schädliche Klimafolgen noch verschlimmern
A18	<i>Dual-Use</i>	Mit (manchen der) CE-Technologien würden zugleich potentielle Massenvernichtungswaffen entwickelt
A19	Klimakontrollkriege	Verfügbarkeit von CE-Technologien könnte zu Konflikten (bis zu Kriegen) über die Kontrolle des Klimas führen
A20	Terminationsproblem	RM-Maßnahmen besitzen keine Exit-Option, und ein unvorhergesehener, abrupter Abbruch würde zu einem schlagartigen, katastrophalen Klimawandel führen
A21	Negative Verteilungseffekte	Unter Umständen regional sehr unterschiedliche Folgen von CE-Maßnahmen, sowohl was die Kompensation von Klimaschäden als auch nichtintendierten Effekte betreffend
A22	Irreduzible Unsicherheit	Die irreduzible Unsicherheit der Funktionsmechanismen des Erdsystems lässt keine Aussagen über Effektivität und Nebenfolgen von CE-Technologien zu
A23	Technologie- und Zivilisationskritik	Zunehmender Fortschrittsoptimismus und der Glaube, die Welt durch Technologien beherrschbar zu machen, ist moralisch zu kritisieren
A24	Sozio-politische Unsicherheiten	Effektivität und Sicherheit von CE-Maßnahmen setzen langfristig stabile institutionelle Rahmenbedingungen voraus, die nicht garantiert werden können
A25	Komplexität des Erdsystems	Aufgrund der Komplexität des Erdsystems können niemals alle Nebenfolgen eines großskaligen CE-Einsatzes überblickt bzw. quantifiziert werden

Quelle: Rickels et al. (2011); eigene Zusammenfassung.

Die Argumente, welche anzweifeln, dass eine CE-Erforschung keine Nebenfolgen hätte, kommen aus vielen unterschiedlichen Bereichen. Einer der meistgenannten und in diesem Sinne prominentesten Einwände besagt, dass bereits die Erforschung solcher Technologien zu einer merklichen Reduktion von Anstrengungen zur Emissionskontrolle führen könnte (Tabelle 4: A3; Jamieson 1996: 333–334; Keith 2000: 276; Robock 2008a; Robock 2008b; ETC Group 2009: 34; Royal Society 2009; Gardiner 2010: 292). Weitere Argumente beziehen sich auf die Selbstläuferproblematik, d.h., die Erforschung würde ungebremst in der Anwendung münden, selbst wenn diese gar nicht erforderlich sein sollte (Tabelle 4: A4; Jamieson 1996: 333–334), auf eine mögliche kommerzielle Kontrolle (Tabelle 4: A5; Robock 2008a; ETC Group 2009: 29, 34) sowie auf die Notwendigkeit von großskaligen Feldversuchen bei der CE-Erforschung, die praktisch den Einsatz der (noch nicht restlos erforschten) Technologie vorausnehmen (Tabelle 4: A6; Elliott 2010: 11; Robock et al. 2010).

Die These, dass es keine Alternativen zu einer sofortigen Erforschung gebe, wird zum einen durch das Argument zu entkräften versucht, dass es auch reicht, mit der Erforschung später zu beginnen, u.a. weil die technologischen Rahmenbedingungen, unter denen ein Einsatz in der Zukunft vorgenommen wird, heute noch gar nicht absehbar sind (Tabelle 4: A8; Gardiner 2010: 288–289). Zum anderen wird gegen die These, Forschung sei alternativlos, um den vorschnellen Einsatz einer CE-Technologie zu verhindern, angebracht, dass der vorschnelle Einsatz von CE-Technologien auch durch ein internationales Moratorium unterbunden werden könnte (Tabelle 4: A9).

4.1.3 Argumente für die Notwendigkeit der Einsatzbereitschaft von CE-Technologien

Die Argumente, die dafür sprechen, dass eine Einsatzbereitschaft bestimmter CE-Technologien erstrebenswert sei, gliedern sich grob in drei Gruppen: Effizienz- und Machbarkeitsargumente, Argumente im Hinblick auf die Notwendigkeiten von *Climate Engineering* zur Erreichen des Ziels die Temperaturerhöhung auf 2° C bzw. die atmosphärische CO₂-Konzentration auf 350 ppm zu begrenzen und Argumente im Kontext des „geringere Übels“.

Die Argumente der ersten Gruppe basieren auf der Annahme, dass der Einsatz von CE-Technologien einfacher und kosteneffizienter als aufwändige Vermeidungs- oder Anpassungsmaßnahmen wäre. So wird beispielsweise argumentiert, dass (i) die direkten und indirekten Kosten des Einsatzes von *Climate Engineering* deutlich unter den Kosten von Emissionsvermeidung und Adaptation liegen (Tabelle 4: A10; Ott 2010a; Ott 2010b; Ott 2010c; Gardiner 2010; Elliott 2010: 20; Goodell 2010: 129), (ii) dass sich *Climate Engineering* im Zweifelsfall auch ohne die dauerhafte Kooperation aller Nationen von einer kleinen Gruppe entschlossener Staaten und zum Wohle der gesamten Menschheit durchführen lässt (Tabelle 4: A11; Schelling 1996; Barrett 2008; Ott 2010a; Ott 2010b; Ott 2010c; Zürn und Schäfer 2011) und dass sich – das Einfachheitsargument – (iii) mit *Climate Engineering* ein gefährlicher Klimawandel vermeiden lässt, ohne Lebensstile, Gewohnheiten und ökonomische Besitzstände anzutasten (Tabelle 4: A12; Ott 2010a; Ott 2010b; Ott 2010c). Insbesondere gegen das Effizienzargument werden viele Gegenargumente vorgebracht, wie beispielsweise, dass CE-Maßnahmen häufig nur einen Teil der anthropogenen Klimafolgen beheben können oder dass hohe gesamtwirtschaftliche Folgekosten entstehen können (Tabelle 4: A15).

Die zweite Argumentgruppe zugunsten der Einsatzbereitschaft ergibt sich aus der Forderung, den Temperaturanstieg auf 2° C bzw. die atmosphärische CO₂-Konzentration auf 350 ppm zu begrenzen. Da aber bereits die derzeitige CO₂-Konzentration deutlich über diesem Stabilisierungsziel liegt, könnten diese Ziele nur mit Hilfe einsatzbereiter CE-Technologien auf 350 ppm gesenkt werden (Tabelle 4: A13; vgl. Hansen 2009; Greene et al. 2010). Die Argumentgruppe setzt voraus, dass nur mit dem Einsatz von *Climate Engineering* noch ambitionierte Klimaziele und somit die Verhinderung eines gefährlichen Klimawandels erreicht werden kann.

Die Geringeres-Übel-Argumentation (*lesser evil*), d.h. die Argumentation, dass die Menschheit möglicherweise zukünftig in eine Situation geraten wird, in welcher der Einsatz der CE-Technologie

das geringere Übel darstellt (Tabelle 4: A14), gehört zu den wichtigsten Begründungen für die Notwendigkeit der Einsatzbereitschaft – und damit indirekt des Forschungsgebots. Bereits in frühen Artikeln von Schneider (1996) und Jamieson (1996) wird aus diesem Grund für die Erforschung von *Climate Engineering* plädiert. Die CE-Technologien sollten in Zukunft, quasi als Vorsorgemaßnahme, einsatzbereit sein.¹⁵ Kritisiert wird das Geringere-Übel-Argument aufgrund der Tatsache, dass wegen der irreduziblen Unsicherheiten im Erdsystem nicht ausgeschlossen werden könne, dass der Einsatz der CE-Technologie die schädlichen Klimafolgen noch verschlimmern könnte anstatt sie zu lindern (Tabelle 4: A17), und dass sie somit nicht wirklich ein geringeres Übel sondern eben doch das größere Übel darstellen.

4.1.4 Argumente gegen die Notwendigkeit der Einsatzbereitschaft von CE-Technologien

Eine Vielzahl von Argumentgruppen richtet sich gegen den Einsatz von *Climate Engineering* bzw. dagegen, die Notwendigkeit, die Einsatzbereitschaft bestimmter Technologien herzustellen. Dabei zielen geopolitische Argumente direkt auf die These, dass ein CE-Einsatz erstrebenswert sei. Zwei Hauptargumente finden sich in der Debatte: Die *Dual-Use*-Problematik, d.h., dass mit CE-Technologien zugleich potentielle Massenvernichtungswaffen entwickelt werden (Tabelle 4: A18; Keith 2000: 275; Corner und Pidgeon 2010: 30; Goddell 2010: 210; Robock 2008a; ETC Group 2009: 34), sowie die Befürchtung, dass die Fähigkeit, das Klima zu kontrollieren, ein großes Konfliktpotential birgt und sogar zu Kriegen führen könnte (Tabelle 4: A19; Hulme 2009: 351; Robock 2008a).

Die anderen Gruppen von Argumenten, die sich gegen den Einsatz von *Climate Engineering* wenden, tun dies indirekt, indem sie die These stützen, dass ein CE-Einsatz (moralisch) verwerflich wäre. Zum einen sind dort die risikoethisch begründeten Argumente zu verordnen, die in der CE-Debatte auf die Unsicherheiten des Einsatzes Bezug nehmen. Die Gruppe umfasst beispielsweise das Terminations-Problem-Argument, das besagt, dass (hauptsächlich im Bereich des RM) CE-Maßnahmen keine Exit-Option besitzen und ein unvorhergesehener, abrupter Abbruch zu einem schlagartigen, katastrophalen Klimawandel führt (Tabelle 4: A20; Ott 2010a; Ott 2010b; Ott 2010c; Robock 2008a; Robock 2008b).

Außerdem gehören gerechtigkeits-theoretische Einwände zu dieser Gruppe von Argumenten, deren Ausgangspunkt die regional unter Umständen sehr unterschiedlichen Folgen von CE-Technologien – sowohl was die Kompensation von Klimaschäden als auch die nichtintendierten Effekte betrifft – bilden. Insbesondere ist hier als Argument zu nennen, dass die ungleiche Verteilung von Kompensation (Nutzen), Kosten und schädlichen Nebenfolgen beim CE-Einsatz ungerecht ist (Tabelle 4: A21; Keith 2000: 276; Robock 2008a; ETC Group 2009: 34).¹⁶ So wird argumentiert, dass die Verursacher des Klimawandels (Emittenten) auch die Last der Gegenmaßnahmen tragen sollten (Jamieson 1996: 331).

Ferner wird – analog zu den Hinweisen auf Forschungsnebenfolgen – auch im Kontext des CE-Einsatzes auf mögliche Nebenfolgen verwiesen, die den Einsatz unter Umständen verwerflich machen. Dabei wird als wichtigstes Argument erneut die Schwächung von Emissionsvermeidungsmaßnahmen genannt. Schließlich umfasst die Gruppe der Argumente, die die These der Verwerflichkeit eines CE-Einsatzes stützen, naturethische, religiöse und existentialistische sowie zivilisations- und technologie-kritische Überlegungen.

Die Argumentationsanalyse zeigt die Vielschichtigkeit der CE-Debatte (Betz und Cacean 2011). Noch komplexer wird die Analyse der Gesamtdebatte darüber hinaus dadurch, dass sich die verschiedenen CE-Technologien hinsichtlich ihrer Risiken, ihrer Effektivität, ihrer Forschungs- und Einsatznebenwirkungen sowie den Kosten eines Einsatzes substantiell unterscheiden. Da diese unterschiedli-

¹⁵ Vgl. Rickels et al. (2011: 30–31) zu Details über notwendige Annahmen hinter dieser Argumentation.

¹⁶ Vgl. Rickels et al. (2011: 33) zu einer Übersicht über Theorien, die helfen, die ungleiche Verteilung normativ zu bewerten.

chen Charakteristika für die Bewertung der Technologien (d.h. ihrer Erforschung und ihres Einsatzes) entscheidend sind, ergibt sich folgendes Problem für die Rekonstruktion der Debatten: Um den unterschiedlichen CE-Technologien gerecht zu werden, müsste die Frage, ob zum Beispiel die Ozeandüngung weiter erforscht werden sollte, gesondert und unabhängig davon erörtert werden, ob etwa auch die Modifikation mariner Schichtwolken zu erforschen wäre. Gleiches gilt dann *mutatis mutandis* für die übrigen Technologien. Das bedeutet aber, dass es nicht eine einzige CE-Kontroverse, sondern rund ein Dutzend CE-Kontroversen – nämlich jeweils technologiespezifische – zu unterscheiden und zu rekonstruieren gäbe.

5 Internationale Regulierung von Climate Engineering

Sebastian Harnisch, Stephanie Uther

Die Erforschung und der Einsatz von CE-Technologien zählen zu den grenz- und generationsübergreifende „Langzeitherausforderungen“ (Sprinz 2009) der internationalen Staatengemeinschaft: Sie sind – wie der Klimawandel selbst – durch unerforschte Risiken und Nebenwirkungen im globalen Maßstab gekennzeichnet, die von einzelnen Staaten oder Akteuren nicht hinreichend bewältigt werden können. Zum einen kann ein (unkoordinierter) Test oder Einsatz von CE-Technologien erhebliche soziale und politische Folgeprobleme auf regionaler, nationaler und internationaler Ebene nach sich ziehen. Zum anderen würde die Termination der avisierten Eingriffe ohne kollektive Emissionsreduktions- und Anpassungsmaßnahmen eine rasche, schockartige Erwärmung der Erdoberfläche bewirken.

Es ist daher unstrittig, dass eine Regulierung von CE-Erforschung und -Einsatz nur durch internationale Kooperation in Form neuer oder auch bestehender Regime bzw. Institutionen auf der Grundlage nationaler Regeln erfolgen kann. In den folgenden Abschnitten werden vier Aspekte erörtert: Welche Regulierungsansätze werden derzeit diskutiert? Welche Prinzipien können für die Ausgestaltung einer multilateralen Regulierung herangezogen werden? Wie könnte eine multilaterale Regulierung institutionell ausgestaltet werden? Welche politischen Handlungsmöglichkeiten stehen der Bundesrepublik Deutschland bei der Gestaltung zukünftiger Regulierungsrahmen zur Verfügung?

5.1.1 Uni-, mini- oder multilaterale Wege zu Erforschung und Einsatz

Im Zentrum dieses Abschnitts stehen die Sichtung der unterschiedlichen Regulierungsansätze aus der aktuellen Forschungsliteratur und die Diskussion ihrer jeweiligen Vor- und Nachteile.¹⁷ Neben nationalen Regeln muss dabei vor allem die Möglichkeit eines uni- oder auch minilateralen Einsatzes erörtert werden. Grundsätzlich können für den Umgang mit CE-Erforschung und -Einsatz uni-, mini- und multilaterale Konstellationen unterschieden werden (Carlin 2007).¹⁸ Letztere lassen sich in solche Ansätze unterteilen, die ein Vorgehen im Rahmen des bestehenden UN-Klimaregimes vorsehen, und jene, die auf eine neue vertragsrechtliche Regulierung abzielen.

Zum Risiko uni- bzw. minilateralen CE-Einsatzes: Aufgrund ihrer naturwissenschaftlich-technischen Umsetzbarkeit sowie ihrer ökonomischen Effizienz werden für einige CE-Technologien uni- oder auch minilateraler Einsatz für wahrscheinlich gehalten (vgl. u.a. Schelling 1996; Barrett 2008; Victor 2008; Millard-Ball 2012). Aus dieser Perspektive liegen die direkten und indirekten betriebswirtschaftlichen

¹⁷ Für einen detaillierten Überblick zu Regulierungsvorschlägen siehe Banerjee (2011).

¹⁸ Eine minilaterale Kooperation umfasst bis zu drei Akteure, die sich zugunsten geringer Verhandlungskosten und hoher Vertraulichkeit für schnelles und effektives Handeln ohne langfristig bindende Regeln zusammenschließen. Multilaterale Kooperation hingegen bezieht sich auf eine wesentlich größere und partizipativere Kooperation, die im Regelfall auch mit institutioneller Verpflichtung einhergeht (Harnisch 2007: 1–2).

Kosten eines CE-Einsatzes weit unter den Kosten von Emissionsvermeidung und Anpassung. Ein CE-Einsatz ist daher auch durch einzelne Staaten oder Staatenkoalitionen möglich (Barrett 2008). Gestützt wird diese These, indem darauf verwiesen wird, dass es im Rahmen des Völkerrechts kein allgemein gültiges Verbot von CE-Maßnahmen gibt (vgl. auch Zedalis 2010 und Virgoe 2009). Für eine minilaterale Anwendung sprächen ferner auch kooperationstheoretische Erwägungen. Es wird argumentiert, dass die hohe Unsicherheit über die antizipierten Nebenwirkungen dazu führe, dass Staaten kleinere Gruppen bevorzugten, weil sie in diesen das Politikergebnisse besser beeinflussen können als in großen Gruppen (Rickels et al. 2011: 123).

In der Literatur werden jedoch auch mehrere (gewichtige) Gründe angeführt, die gegen einen uni- oder minilateralen Einsatz sprechen: Erstens muss ein potentieller Anwender in Betracht ziehen, dass die Einsatzkosten durch Gegenmaßnahmen von negativ betroffenen Staaten, die von Sanktionen, die von diplomatischer Isolation bis hin zu physischen Gegenmaßnahmen (Blackstock et al. 2009) reichen, in die Höhe getrieben werden können. Diese Maßnahmen können (glaubwürdig), die potentiellen Gewinne eines uni- oder minilateralen Vorgehens mindern oder in prohibitive Kosten umwandeln (Horton 2011: 59). Zweitens sind CE-Technologien auch für andere Staaten relativ leicht zu erwerben. Damit wachsen die Risiken einer unkoordinierten Anwendung, so dass eine Effektminderung, selbst wenn diese intendiert ist, bei autonomer Anwendung nicht ausgeschlossen werden kann. Drittens sorgt das Terminationsproblem, d.h. der schlagartige Anstieg der globalen Erdtemperatur in Folge eines Abbruchs von RM-Maßnahmen, dafür, dass Staaten, die einmal begonnen haben, RM einzusetzen, den Einsatz erst dann aussetzen können, wenn sie eine Reduktion der atmosphärischen CO₂-Konzentration erwirkt haben.

Eine solche Minderung lässt sich aber nur international und kooperativ erreichen (Horton 2011: 59). Schließlich spricht gegen einen uni- oder minilateralen CE-Einsatz auch die Tatsache, dass gerade jene Technologien, die für einem autonomen Einsatz in Frage kommen (z.B. die Einbringung stratosphärischer Aerosole), derzeit wenig gesellschaftliche und politische Akzeptanz genießen und ein besonders hohes Politisierungs- und Widerstandspotenzial bergen (Rickels et al. 2011: 127). Transnationale Nichtregierungsorganisationen wie die ETC Group und die „Hands Off Mother Earth“-Kampagne (H.O.M.E) wenden sich u.a. deshalb bereits seit Jahren intensiv gegen die Erforschung und den Einsatz von CE (ETC Group 2009). Aufgrund der überwiegenden Nachteile eines uni- bzw. minilateralen CE-Einsatzes kommen, wenn die Effizienz, Effektivität und Legitimität von CE-Maßnahmen gleichermaßen stark sein sollen, primär multilaterale Lösungen in Betracht.

Die Mehrzahl der heutigen Regulierungsvorschläge zielt auf die Einbindung eines zukünftigen CE-Regimes in das bestehende globale Klimaregime der UNFCCC (Lin 2009; Royal Society 2009; Barrett 2008; Barrett 2009; Barrett 2010; Virgoe 2009; House of Commons 2010; Humphreys 2011). Diese sieht zwar bislang keine speziell für CE-Maßnahmen geschaffene völkerrechtliche Regelung vor. *Climate Engineering* könnte dort aber zukünftig integriert werden (House of Commons 2010: 20).

Mehrere Gründe sprechen für eine solche UN-basierte Regelung. Erstens würde dadurch eine breite Legitimität mit Blick auf die soziale und politische Akzeptanz von CE-Techniken in Nord und Süd gewähren.¹⁹ Zweitens könnte so die Problematik negativer Anreize besser als bei anderen Ansätzen adressiert werden, weil eine Minderung der Bemühungen um Emissionsreduktionen frühzeitig vermieden werden könnte (Rickels et al. 2011: 130). Drittens verfügen die UNFCCC-Institutionen über die notwendige Erfahrung und Legitimität bei der Bearbeitung kontroverser Themen auf internationaler Ebene sowie über ein ausreichendes Budget und die notwendigen Ressourcen (Bracmort et al. 2010: 36; kritisch: Victor 2011). Die Koppelung an Mitigationsbemühungen könnte bis zu einem gewissen Grad damit auch die Terminationsproblematik mildern. Schließlich verfügt die UNFCCC über

¹⁹ Die CBD zählt 193 Mitgliedsstaaten, die UNFCCC hat eine nahezu universale Mitgliedschaft und das UNEP verfügt über langjährige Erfahrung in der Koordination unterschiedlicher UN-basierter Umweltprogramme.

ein breites Netz an Institutionen, die für eine CE-Regulierung nutzbar gemacht werden können (Virgoe 2009).

Allerdings würden durch eine UN-gestützten Regulierung auch Nachteile entstehen. Zum einen müssen bei Verhandlungen im Rahmen der UNFCCC meist alle Vertragsteilnehmer nach dem Konsensprinzip einer Regelung zustimmen. Ein häufiger Einwand besteht daher in den langwierigen Vertragsverhandlungen und Entscheidungsprozessen (Bracmort et al. 2010; Victor 2011). Diese könnte eine zielgerichtete und schnelle Beschlussfassung bei *Climate Engineering* deutlich erschweren. Bodansky (1996) kritisiert zudem die nur geringfügig ausgeprägte Autorität und mangelnde Compliance innerhalb der bestehenden UN-Institutionen. Nicht selten handelten Staaten in der Vergangenheit auch außerhalb bestehender Vereinbarungen.

Vertragsbasierte multilaterale Regulierung: Neben einer Regulierung im UN-Rahmen wird auch eine vertragsbasierte multilaterale Lösung außerhalb bestehender UN-Institutionen diskutiert (Carlin 2007; Virgoe 2009; Bracmort et al. 2010). So hat die Royal Society (2009: 41) vorgeschlagen, die Probleme internationaler Koordination und Kontrolle im Rahmen der Anwendung erweiterter existierender Verträge durchzuführen. Weitergehende Szenarien reichen von einer multilateralen Koordination im Rahmen der NATO oder der OCED (Carlin 2007) bis hin zur Gründung eines eigenständigen internationalen Konsortiums zur Regulierung von Erforschung und Einsatz in Anlehnung an das Carbon Sequestration Leadership Forum (Virgoe 2009). Victor (2008: 232) spricht sich dabei dezidiert für einen Ansatz aus, bei dem die Normen für eine multilaterale Regulierung in einem dezentralisierten Prozess von Forschung und Einschätzung hergeleitet werden. Das bestehende, auf multilateraler Konsensfindung basierende Regime hält er unter der Bedingung großer Unsicherheit für nicht mehr handlungsfähig (Victor 2011).

Für ein eigenständiges CE-Regime spricht neben der vereinfachten Konsensfindung bei kleinerer Mitgliederzahl (die natürlich proportionale Legitimitätsverluste nach sich ziehen würde) die Möglichkeit, in neuen Institutionen regulatorische Lücken des bestehenden Regimes zu schließen. Dies kann unter anderem dadurch geschehen, dass neue Kontroll- und Sanktionsmechanismen eingeführt werden. So könnte in einer nach dem Vorbild der Internationale Atomenergie Organisation (IAEO) aufgebauten CE-Agentur die gemeinsame Nutzung von CDR- und RM-Technologien organisiert werden.

Die Diskussion der drei Einsatz- und Regulierungskonstellationen zeigt, dass in der Summe die Gegenargumente eine uni- oder minilaterale Anwendung wenig plausibel erscheinen lassen. Eine multilaterale CE-Regulierung ist deshalb nicht nur aus einer völkerrechtsorientierten Perspektive wünschenswerter, sondern auch aus wirtschaftlicher und politischer Perspektive tragfähiger. Dabei bieten jedoch auch nationale CE-Regelungen Vorteile, wenn sie als Bausteine für ein multilaterales Regelwerk fungieren. Nationale Regeln sind nicht nur autonomieschonend und vergleichsweise rasch implementierbar; sie können zudem als Versuchslabore für die wirtschaftlichen und politischen Folgen primär restriktiver Maßnahmen dienen. Nationale Maßnahmen ohne internationale Koordination bergen aber das Risiko, konfliktbefördernd zu wirken, z.B. wenn es zu einer kompetitiven Forschungsförderung oder Einsatzplanung käme (Gosh und Blackstock 2011: 23).

5.1.2 Prinzipien einer multilateralen Regulierung

Die Ausgestaltung einer Governance zur Erforschung und zum Einsatz von *Climate Engineering* ist mit einer Reihe von Anforderungen verbunden. Erstens müssen die wichtigen Leitprinzipien (unter anderem Vorsorgeprinzip, gemeinsame, aber differenzierte Verantwortlichkeit) des bestehenden Regimes respektiert und fortentwickelt werden, wenn die avisierte CE-Governance das bestehende Klimaregime nicht verletzen oder gar ersetzen soll. Eine breite multilaterale Legitimationsbasis kann dabei die innergesellschaftliche Akzeptanz und die internationale Verantwortlichkeit bei der Erforschung der Technologien fördern. Zweitens müssen zukünftige Forschungsaktivitäten, insbesondere im sensiblen Feld der RM-Technologien, international koordiniert und kontrolliert werden, wenn Ver-

selbständigungsprozesse der wissenschaftlichen Forschung vermieden werden sollen. Dabei ist es besonders wichtig, dass die Übergänge zwischen Erforschung, Test und Einsatz transparent gehalten und entsprechend durch Sanktionen bewährt werden.²⁰

Einige CE-Maßnahmen, wie die Einbringung stratosphärischer Aerosole, können nur dann verantwortungsvoll getestet werden, wenn deren potentiell Versagen oder deren unitendierten Effekte keine katastrophalen Folgen zeitigt, d.h. ein fehlgeschlagener Test noch durch konventionelle Emissionsreduktion oder Anpassungsstrategien kompensiert werden kann. Bislang ist die Frage, ob und wie ein Test von RM-Technologien durchgeführt werden kann und sollte, nur ansatzweise erforscht bzw. diskutiert (Robock 2008a; MacMynowski et al. 2011). Es gilt aber prinzipiell: Jeder großskalige Feldversuch muss fehlschlagen können, sonst ist er kein Test mehr, sondern ein Vabanque-Spiel. Dies bedeutet, dass sich die jeweilige Intensität, Art und Dauer der Erprobung der CE-Technologien an der Intensität, Art und Dauer der besten durchführbaren Alternativmaßnahme (Mix aus CO₂-Reduktion, Anpassung und potentiellen CDR-Maßnahmen) orientieren muss. Damit ein verantwortlicher Umgang mit dem Vorsorgeprinzip möglich wird, müsste also ein Anreizsystem (vgl. Rickels et al. 2011: 131) geschaffen werden, dass bereits vor einem RM-Test die präventive CO₂-Emissionsreduktionen bzw. das Ausmaß an potentiell zu treffenden Anpassungsmaßnahmen im Falle eines Testabbruchs verbindlich regelt.

Dem Vorsorgeprinzip, das zu den grundlegenden Prinzipien der Umweltpolitik zählt, kommt bei einer internationalen Regulierung von *Climate Engineering* eine herausgehobene Rolle zu. Es zielt darauf ab, „bei unvollständigem Wissen über Art, Ausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit von Umweltschäden vorbeugend zu handeln, um Schäden und Störungen von vornherein zu vermeiden“ (Ginzky et al. 2011: 4). Das Prinzip kann allerdings unterschiedlich ausgelegt werden und daher für und gegen den Einsatz von CE-Maßnahmen sprechen (Rickels et al. 2011). Dies gilt insbesondere dann, wenn es mit anderen Prinzipien wie dem Präventionsprinzip, Verursacherprinzip oder anderen einschlägigen Prinzipien kombiniert bzw. abgewogen wird. Die jeweiligen Interpretationen sind dabei auch an die zugrunde liegende Definition sowie die Bewertung möglicher Gefahren des Klimawandels gekoppelt (Wiertz und Reichwein 2010). Dabei erfolgt die Auslegung des Prinzips je nach Akteurskonstellationen und Einsatzszenario unterschiedlich. So ist zu beobachten, dass vor allem bei einem uni- oder minilateralen Vorgehen das Vorsorgeprinzip dazu eingesetzt wird, eine CE-Anwendung zu legitimieren: Trotz bestehender wissenschaftlicher Unsicherheiten sollte ein potenzieller Schaden durch den Klimawandel in der Zukunft abgewendet werden. Der Befund zeigt deutlich, dass in die Auslegung auch Einflüsse der jeweiligen Wissenschaftskultur (beispielsweise Technikaffinität vs. Technikskepsis) sowie gesellschaftliche und politische Bewertungen von Unsicherheiten eingehen.

Für die Erforschung der CE-Technologien ist also eine internationale Koordination und Regulierung erforderlich. In den Oxford Principles sind bereits zentrale Aspekte einer Forschungsregulierung aufgeführt: „geoengineering [should] be regulated as a public good, public participation in geoengineering decision-making, disclosure of geoengineering research and open publication of results, independent assessment of impacts [...] governance before deployment“ (Rayner et al. 2009). Angesichts der geschilderten Selbstläuferproblematik dürften jedoch der transparente Umgang mit Forschungsergebnissen sowie deren unabhängige Bewertung allein nicht ausreichend sein, um Forschungsprozesse legitim und effizient zu kontrollieren. Durch ein zeitlich befristetes Moratorium könnte ein schleicher Übergang von CE-Forschung hin zu Test oder Einsatz zunächst unterbunden werden. Von dem Moratorium ausgenommen wären lediglich Maßnahmen, die auf staatlichem Territorium stattfinden, lokal begrenzt sind und von der internationalen Staatengemeinschaft überwacht werden können (Rickels et al. 2011: 131–132).

²⁰ Dies gilt insbesondere im Hinblick auf die Terminationsoption, denn die Chance auf einen sicheren, kontrollierten Ausstieg bleibt nur gewahrt, wenn der Zeitpunkt und die Bedingungen des Einstiegs klar identifizierbar sind.

Der Mehrwert eines zeitlich befristeten Moratoriums liegt darin, interessierten Parteien, d.h. im Regelfall den betroffenen Parteien, ein Angebot zum Verzicht auf unmittelbare Anwendung zu unterbreiten, gleichzeitig aber auch die Möglichkeit einer zukünftigen Änderung der Politik anzudeuten. Durch einen solchen Doppelbeschluss wird nicht nur das eigene zukünftige Handeln von dem Verhalten der interessierten Parteien abhängig gemacht – diese sollten dem Moratorium, wenn möglich, beitreten –, sondern zeigt auch eine deutliche Präferenz, die langfristige Aussetzung eines Tests signalisiert. Ist ein solches Moratorium erfolgreich, kann dessen Überprüfung und die anzustrebenden Reviewkonferenzen in einen Prozess münden, der eine konsensuale Fortführung oder Modifikation ermöglicht.

5.1.3 Vorschläge zur institutionellen Ausgestaltung

Eine entscheidende Frage für die internationale Regulierung von *Climate Engineering* ist, welche Instrumente und Mechanismen angepasst oder auch neu geschaffen werden müssen, um die geschilderten Anforderungen institutionell zu bewältigen. In erster Linie erscheint dabei die Schaffung einer autonomen wissenschaftlich-technischen Organisation erstrebenswert, wenn deren Kernfunktionen in der Regulierung von globalen Aktivitäten zur Erforschung und zum Einsatz von CE-Technologien liegen, die durch das bestehende Klimaregime nicht erfasst werden können oder sollten. Um legitime Entscheidungen und effiziente Umsetzung zu gewährleisten, sollte eine formale Trennung zwischen dem sensitiven Bereich der Konsensfindung auf der Ebene der Regierungen und den Implementationsentscheidungen der untergeordneten Regulierungsinstanz vorgenommen werden. Für diesen Zweck könnte das Modell der IAEO herangezogen werden (vgl. Virgoe 2009; Banerjee 2011: 32–33). Eine unabhängige CE-Organisation müsste neben der regelmäßigen Berichterstattung an höhere Regierungsgremien aber auch noch weitere Aufgaben erfüllen. Erstens würde ihr die Kontrolle der gemeinschaftlichen Erprobung von CE-Maßnahmen zufallen, z.B. im Rahmen von vertraglich festgelegten Verifikationsmaßnahmen. Zweitens müsste sie durch transparente Dokumentations- und Publikationsaktivitäten bei Forschungsergebnissen ein kontinuierliches Monitoring (z.B. in Form von Datenbanken und Konferenzen) gewährleisten. Drittens sollte eine CE-Organisation die internationale Zusammenarbeit stärken, indem sie andere Staaten durch das Entsenden von Experten oder die Bereitstellung von Ressourcen bei der Erforschung von CE-Methoden unterstützt und damit einen Technologietransfer ermöglicht.

Vor allem beim großskaligen Test bzw. Einsatz von RM-Technologien ist im globalen Maßstab mit einer ungleichen Verteilung von negativen Nebenwirkungen zu rechnen, die Gewinner und Verlierer schaffen (Ricke et al. 2010). Deshalb muss bei der institutionellen Ausgestaltung auch die Frage nach einem gerechten Ausgleich in Form eines Kompensationsmechanismus im Vordergrund stehen. Zusätzlich können nicht nur Forderungen nach Kompensation, sondern auch nach politischer und rechtlicher Haftung auftreten (Virgoe 2009: 108). Auch diese müssten im Rahmen einer CE-Regulierung adressiert werden. Dies könnte beispielsweise durch die Etablierung einer Kompensationsvereinbarung oder auch durch die Einrichtung eines Schiedsgerichts nach dem Vorbild der Welthandelsorganisation geschehen.

Vor allem die Wahrung der Terminationsoption von CE-Maßnahmen stellt eine zentrale Herausforderung für das avisierte Regime dar. Ein Abbruch von CE-Maßnahmen hätte – im Verhältnis zum Grad an *radiative forcing* der Anwendung – einen raschen, potentiell schlagartigen Anstieg der globalen Erdtemperatur zu Folge. Es müssten also Vorkehrungen getroffen werden, um die Terminationrisiken zu minimieren. Erforderlich wäre in einem solchen Fall eine verbindliche Einigung auf konkrete Ausstiegsmodalitäten. Die Anwenderstaaten müssten sich dazu verpflichten, ihre Emissionseinsparungen für den Fall signifikant zu erhöhen, dass die RM-Anwendung schwerwiegende und irreversible Folgen für andere Staaten/Gesellschaften zeitigt (Rickels et al. 2011). In einem solchen Szenario wäre eine Einigung auf eine feste Höchstgrenze für die Veränderung der Strahlungsbilanz unabdingbar, weil sich nur so kompensatorische Emissions- und Anpassungsmaßnahmen berechnen und nachträglich

durchsetzen ließen. Auch eine Einigung auf eine feste „Tilgungsrate“ für das bereits emittierte CO₂ wäre in einem solchen Fall zielführend, denn daraus ließe sich ein *policy mix* aus Emissionsreduktion, Adaption und CE-Maßnahmen ableiten, an dem mehrere Vertragsparteien zu unterschiedlichen Bedingungen beteiligt werden könnten.

5.2 Rechtliche und politische Herausforderungen für die Bundesrepublik Deutschland

Die wissenschaftliche Untersuchung der Chancen und Risiken des *Climate Engineering* erweist sich als rasch wachsendes und bedeutsames Forschungsfeld, das von Entscheidungsträgern auf nationaler und internationaler Ebene durch die Entwicklung rechtlicher und politischer Regulationsmechanismen begleitet werden sollte.

Da die Effektivität von *Climate Engineering* zur Minderung der Auswirkungen des Klimawandels und die damit verbundenen Nebenwirkungen gegenwärtig noch weitgehend unbekannt sind, besteht großer Forschungsbedarf. Insbesondere bei der Einschätzung und Bewertung sozialer und politischer Risiken, den direkten und indirekten Effekten auf die Umwelt, den ökonomischen Kosten sowie rechtlichen Folgeproblemen ist weiterhin dringend Forschung geboten. Eine weiterführende Beteiligung der Bundesrepublik Deutschland an laufenden und zukünftigen Forschungsbestrebungen, z.B. in einem CE-Forschungsverbund mit anderen europäischen oder US-amerikanischen Forschungsinstitutionen, kann hier ein probates Instrument sein, um nachhaltige, finanzierbare und völkerrechtskonforme CE-Politik zu informieren und zu gestalten. Gemessen an dieser Anforderung kommt dem Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgesellschaft (SPP 1689: *Climate Engineering – Risk, Challenges, Opportunities?*) eine besondere Bedeutung zu. Es legt mit dem Aufbau des interdisziplinären Systemverständnis eine Grundlage für eine nachhaltige CE-Politikberatung, umgeht mit seinem Fokus auf Bewertung von CE-Maßnahmen aber das Problem, eine Entwicklung dieser Technologien zu beschleunigen. Die Ergebnisse und Einsichten des Schwerpunktprogramms werden im Rahmen von Konferenzen, Workshops und Schulveranstaltungen verbreitet und diskutiert.

Der intensiveren Einbindung gesellschaftlicher Akteure und Gruppierungen kommt eine besondere Bedeutung zu, denn nur so kann ein transparenter und verantwortungsvoller Umgang mit der CE-Forschung und Entwicklung mittel- und langfristig gewährleistet werden.²¹ Dabei sollte sich die Erarbeitung internationaler regulatorischer Prinzipien an den einschlägigen Prinzipien internationaler Klima- und Umweltpolitik orientieren, um die verbliebene Legitimität der bestehenden Ordnung für deren Umbau zu nutzen. Ein weiterer wichtiger Schritt ist es, die CE-Debatte, -Erforschung und -Regulierung mit dem aktuellen Prozess der Implementierung der *Sustainable Development Goals* (SDGs) zu verbinden und zu untersuchen, inwieweit die dort formulierten Ziele der Nahrungssicherheit, Vermeidung von Ozeanversauerung oder Klimaschutz mit der Anwendung bzw. dem Verbot verschiedener CE-Maßnahmen einhergehen.

Die Bundesrepublik Deutschland ist im Rahmen der gemeinsamen EU-Klimapolitik vertragliche Verpflichtungen zum Klimaschutz und zur Reduktion von CO₂-Emissionen eingegangen. Für einen zukünftigen Umgang mit *Climate Engineering* bedeutet dies, dass vor allem die Nutzung bestehender umwelt- und klimapolitischer Instrumente, wie sie in der gemeinsamen EU-Klimapolitik etabliert wurden, priorisiert werden sollten. Nur so kann sichergestellt werden, dass eine möglichst große Zahl von Partnerstaaten der sich entwickelnden deutschen Position zur CE-Erforschung Folge leisten.

²¹ So gibt es Beispiele aus dem Bereich der Nanotechnologie, wo interessante Ergebnisse mit dem Konzept der „antizipatorischen Governance“ gemacht worden sind.

6 Abschließende Betrachtungen

Gernot Klepper, Jonas Dovern, Wilfried Rickels, Daniel Barben, Timo Goeschl, Sebastian Harnisch, Daniel Heyen, Nina Janich, Achim Maas, Nils Matzner, Jürgen Scheffran, Stephanie Uther

Climate Engineering fasst verschiedene Technologien zusammen, mit denen großskalig in das Klimasystem der Erde eingegriffen werden kann, um den anthropogenen Klimawandel zu begrenzen. Man unterscheidet dabei zwei Gruppen von Technologien, von denen die eine Gruppe (CDR) eingesetzt wird, um die atmosphärische CO₂-Konzentration zu senken – und damit die Ursache des Klimawandels zurückzuführen –, und die andere Gruppe (RM), um in die Strahlungsbilanz der Erde einzugreifen und damit die Symptome des Klimawandels abzumildern.

Die unter der Bezeichnung *Climate Engineering* zusammengefassten Technologien werden von Akteuren vorgeschlagen, die in der globalen Klimaerwärmung ein ernst zu nehmendes Problem – eine in der Tat globale Herausforderung – sehen. Manche dieser Proponenten sehen in CE-Technologien eine wichtige, wenn nicht sogar notwendige „dritte Option“ im Umgang mit dem Klimawandel – neben den Bemühungen, den Ausstoß von Treibhausgasen signifikant zu verringern, und den Versuchen, sich an den sich bereits vollziehenden Klimawandel etwa durch Vorsorgemaßnahmen anzupassen (Adaption). Sollten die internationalen Vereinbarungen zur Emissionskontrolle ebenso wie deren Umsetzung nicht in absehbarer Zeit deutliche Fortschritte machen, ist zu erwarten, dass *Climate Engineering* mit umso größerem Nachdruck als unerlässliche Strategie der Eindämmung des Klimawandels in der wissenschaftlich-technischen, medialen und politischen Öffentlichkeit diskutiert werden wird.

Die deutsche Politik sollte frühzeitig eine informierte öffentliche Debatte zu der Erforschung von *Climate Engineering* anstoßen und durch öffentlichkeitswirksame Maßnahmen begleiten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass CE-Forschung sich von anderen Forschungsfeldern durch den Anspruch unterscheidet, das Klima global beeinflussen zu können und damit letztlich Entscheidungen über die Lebensbedingungen aller Menschen und Staaten zu treffen. Weder CE-Forschung noch CE-Einsatz können daher alleine national gedacht oder umgesetzt werden. Eine entsprechende Internationalisierung der Debatte ist notwendig. Vor diesem Hintergrund erscheint die frühzeitige Einrichtung eines internationalen Diskussionsforums zur Debatte über die Konsequenzen von *Climate Engineering*, die staatliche und nichtstaatliche Akteure und Stakeholder einbezieht, als eine wichtige Aufgabe sowohl der Politik als auch der Wissenschaft.

Eine besondere Rolle hat die Generalversammlung (GV) der Vereinten Nationen, die als einziges universelles Gremium und mit einem weit gefassten Mandat globale Interessen und Handlungen angehen kann. Die GV hat auch eine besondere symbolische Bedeutung, denn durch ihre Abstimmungsmodalitäten (einfache Mehrheit) bietet sie im Gegensatz zu anderen Vertragswerken auch die Möglichkeit, ohne Einstimmigkeit zu Beschlüssen zu kommen, auch wenn eine möglichst breite oder konsensuale Mehrheit zu bevorzugen ist.

Perspektivisch könnten zwei Debatten im Rechtsausschuss der UN-Generalversammlung angestrebt werden: Die erste Debatte sollte darauf hinwirken, dass der UN-Generalsekretär in Zusammenarbeit mit dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) aufgefordert wird, einen Bericht mit Schwerpunkt auf politische Handlungsempfehlungen für Governance-Arrangements zu *Climate Engineering* vorzulegen. Dieser Bericht sollte eine Grundlage für die zweite Debatte sein. Vorbereitet werden sollte dies durch informelle Sondertreffen der Vertragspartner relevanter internationaler Konventionen sowie in weiteren internationalen Foren wie EU, OECD, G8 und G20, um mögliche politische Interessen sowie Handlungsspielräume zu sondieren.

Auf nationaler Ebene sollte ebenfalls eine breite öffentliche Diskussion zu *Climate Engineering* in Gang gesetzt werden. Dabei ist von Beginn an in der öffentlichen Darstellung auf eine Differenzierung zwischen CDR- und RM-Technologien zu achten, weil diese sich hinsichtlich technischer, wirtschaft-

licher, geografischer und soziopolitischer Auswirkungen auf Mensch und Umwelt erheblich voneinander unterscheiden. In der öffentlichen Debatte sollte aber auch ein Schwerpunkt auf die ethische Dimension solcher Eingriffe in das Klima als einer gezielten Manipulation des Erdsystems mit möglicherweise dramatischen Folgen für zukünftige Generationen gelegt werden (*Lock-in-Effekt*). Dabei hat die Politik insbesondere zu entscheiden, wie die vielfältigen Unsicherheiten in Bezug auf *Climate Engineering* kommuniziert werden können und sollten. Im öffentlichen Diskurs muss ebenso deutlich kommuniziert werden, dass CE- und insbesondere RM-Technologien keine Alternative zur Emissionskontrolle darstellen, sondern dass es weiterhin einer gezielten Priorisierung der Erforschung und des Einsatzes vorhandener Klimaschutzmaßnahmen sowie des Ausbaus der erneuerbaren Energien bedarf. Zugleich sollte auf Erfahrungen zurückgegriffen werden, die insbesondere aus dem Vergleich mit anderen konflikträchtigen Technologien gewonnen werden und, nicht zuletzt, auch darüber aufklären können, wie Vertrauen gewonnen werden kann, aber auch, worin Grenzen der Verständigung liegen.

Literaturverzeichnis

- Ackerman, F., und L. Heinzerling (2004). *Priceless*. New York: The New Press.
- Adabashev, I. (1966). *Global engineering*. Moscow.
- 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): 17184–17189.
- Arrow, K., und A. Fisher (1974). Environmental preservation, uncertainty, and irreversibility. *The Quarterly Journal of Economics* 88(2): 312–319.
- Atkinson, A. (1970). On the measurement of inequality. *Journal of economic theory* 2(3): 244–263.
- 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.
- Banerjee, B. (2011). The limitations of geoengineering governance in a world of uncertainty. *Stanford Journal of Law, Science & Policy* 4: 16–35.
- Barrett, S. (2008). The incredible economis of geoengineering. *Enviromental 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 U.S. 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].
- Barrieu, P., und B. Sinclair-Desgagné (2006). On precautionary policies. *Management science* 52(8): 1145–1154.
- Bateman, I., R.T. Carson, B. Day, M. Hanemann, N. Hanley, T. Hett, M. Jones-Lee, G. Loomes, S. Mourato und E. Özdemiroglu (2002). *Economic valuation with stated preference techniques: A manual*. O.O.: Edward Elgar.
- 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): 1383–1399.
- Betz, G., und S. Cacean (2011). Climate Engineering: Ethische Aspekte: Erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF). Karlsruher Institut für Technologie, Berlin.
- 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: 22.02.2016].
- Bluth, G.J.S., S.D. Doiron, C.C. Schnetzler, A.J. Krueger und L.S. Walter (1992). Global tracking of the SO₂ clouds from the June 1991 Mount Pinatubo eruptions. *Geophysical Research Letters* 19: 151–154.
- Boardman, A.E., D.H. Greenberg, A.R. Vining und D.L. Weimer (2011). *Cost-benefit analysis: Concepts and practice*. O.O.: Prentice Hall.
- Bodansky, D. (1996). May We Engineer the Climate? *Climatic Change* 33: 309–321.
- Borisov, P. (1967). Can we control the Arctic climate? *Priroda* 12: 63–73.
- Bracmort, K., R.K. Lattanzio und E. Barbour (2010). Geoengineering: Governance and technology policy R41371. Congressional Research Service, Washington, D.C.
- Budyko, M. (1977). *Climatic Changes, American Geophysical Society*. Washington, D.C.
- Budyko, M. (1982). *The Earth’s Climate, Past and Future*. New York, NY: Academic Press.

- Buesseler, K.O., S.C. Doney, D.M. Karl, P.W. Boyd, K. Caldeira, F. Chai, K.H. Coale, H.J.W. de Baar, P.G. Falkowski und K.S. Johnson (2008). Ocean iron fertilization? Moving forward in a sea of uncertainty. *Atmosphere* 1: 2.
- Burke, A. (1956). Influence of man upon nature - the Russian view: A case study. In Thomas, W. (Hrsg.), *Man's role in changing the face of the earth. Int. Symp. organized by the Wenner - Gren Foundation for Anthropological Research at Princeton, June 1955*. [S.l.]: U. of Chicago Press, for Wenner-Gren Found. for Anthropological Research & Nat. Science Foundation (1035–1051).
- Caldeira, K., und L. Wood (2008). Global and Arctic climate engineering: numerical model studies. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 366: 1–18.
- Carlin, A. (2007). Implementation and Utilization of Geoengineering for Global Climate Change Control. *Sustainable Development Law and Policy* 7(2): 56–58.
- Champ, P., K. J. Boyle und T. Brown (2003). *A primer on nonmarket valuation*: Springer.
- Chichilnisky, G. (1996). An axiomatic approach to sustainable development. *Social choice and welfare* 13(2): 231–57.
- 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: 211–219.
- 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.
- CST (2010). *Engineering the Climate: Research Needs and Strategies for International Coordination*. U.S. House of Representatives (Hrsg.). Committee on Science and Technology. Online: <http://www.washingtonpost.com/wp-srv/nation/pdfs/Geoengineeringreport.pdf> [abgerufen am: 22.02.2016].
- Dasgupta, P. (2008). Discounting climate change. *Journal of Risk and Uncertainty* 37: 141–169.
- Deschenes, O., und M. Greenstone (2007). The economic impacts of climate change: evidence from agricultural output and random fluctuations in weather. *The American Economic Review* 97(1): 354–385.
- Dreze, J., und N. Stern (1987). The theory of cost-benefit analysis. *Handbook of public economics* 2: 909–89.
- Elliott, K. (2010). Geoengineering and the Precautionary Principle. *International Journal of Applied Philosophy* 24(2): 237–253.
- Ellis, J. (2001). Forestry projects: permanence, credit accounting and lifetime. OECD Environment Directorate and International Energy Agency. *Information Paper*. COM/ENV/EPOC/IEA/SLT(2001)11.
- EPSRC (Engineering and Physical Sciences Research Council) (2010). Climate geoengineering sandpit. Online: <http://www.epsrc.ac.uk/funding/calls/2010/Pages/climategeoengsandpit.aspx> [abgerufen am: 15.11.2011].
- ETC Group (2009). *Retooling the Planet: Climate Chaos in a Geoengineering Age*. Online: http://www.etcgroup.org/upload/publication/pdf_file/Retooling%20the%20Planet%201.2.pdf [abgerufen am: 16.05.2011].
- Fankhauser, S. (1995). *Valuing climate change: the economics of the greenhouse*: Routledge.
- Fleming, J. (2004). Fixing the weather and climate: Military and civilian schemes for cloude seeding and climate engineering. In L. Rosner (Hrsg.), *The technological fix: How people use technology to create and solve problems*. New York: Routledge.
- Fleming, J. (2006). The pathological history of weather and climate modification: Three cycles of promise and hype. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 37(1): 3–25.
- 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.
- Frederick, S., G. Loewenstein und T. O'donoghue (2002). Time discounting and time preference: A critical review. *Journal of economic literature* 40(2): 351–401.

- GAO (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, U.S. House of Representatives GAO-10-903.
- GAO (Government Accountability Office) (2011). Technology assessment. Climate engineering. Technical status, future directions and potential responses: Report to Congressional Requester GAO-11-71.
- Gardiner, S. (2006). A core precautionary principle. *The Journal of Political Philosophy* 14(1): 33–60.
- Gardiner, S. (2010). Is „Arming the Future“ with Geoengineering Really the Lesser Evil? Some Doubts about the Ethics of Intentionally Manipulating the Climate System. In S. Gardiner, D. Jamieson und S. Caney (Hrsg.), *Climate Ethics: Essential Readings*. Oxford: Oxford University Press.
- Gaskill, A. (2004). Global Albedo Enhancement Project. Online: <http://www.global-warming-geo-engineering.org/1/contents.html> [abgerufen am: 18.11.2011].
- 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*: DOI 10.1007/s10640-013-9647-x.
- Gollier, C. (2002). Time horizon and the discount rate. *Journal of economic theory* 107(2): 463–473.
- Goodell, J. (2010). *How to Cool the Planet: Geoengineering and the Audacious Quest to Fix Earth's Climate*. Boston: Houghton Mifflin Harcourt.
- 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 2011.
- Gramstad, K., und S. Tjøtta (2010). Climate Engineering: Cost benefit and beyond. Department of Economics, University of Bergen. 05/10. Online: http://www.uib.no/filearchive/wp-05.10_2.pdf [abgerufen am: 22.02.2016].
- Greene, C., B. Monger und M. Huntley (2010). Geoengineering: The Inescapable Truth of Getting to 350. *Solutions* 1(5): 57–66.
- Groom, B., C. Hepburn, P. Koundouri und D. Pearce (2005). Declining discount rates: The long and the short of it. *Environmental and Resource Economics* 32(4): 445–493.
- Grunwald, A. (2010). Der Einsatz steigt: globale Risiken. *Politische Ökologie* 120: 37–39.
- de Gryze, S., M. Cullen und L. Durschinger (2010). Evaluation of the Opportunities for Generating Carbon Offsets from Soil Sequestration of Biochar. Climate Action Reserve (Hrsg.). Terra Global Capital LLC, San Francisco.
- Haab, T., und K. McConnell (2002). *Valuing environmental and natural resources: The econometrics of non-market valuation*. O.O.: Edward Elgar Publishing.
- Hansen, J. (2009). *Storms of My Grandchildren: The Truth about the Coming Climate Catastrophe and Our Last Chance to Save Humanity*. New York: Bloomsbury.
- Harnisch, S. (2007). Minilateral cooperation and transatlantic coalition-building: The E3/EU-3 Iran initiative. *European Security* 16(1): 1–27.
- Harvey, L. (2008). Mitigating the atmospheric CO₂ increase and ocean acidification by adding limestone powder to upwelling regions. *Journal of Geophysical Research* 113: 1–21.

- Heckendorn, P., D. Weisenstein, S. Fueglistaler, B.P. Luo, E. Rozanov, M. Schraner, L.W. 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.
- Hemschemeier, M. (2003). Die dritte Macht des Krieges: Weltweit bemühen sich Militärs und Meteorologen darum, Wetter unter ihre Kontrolle zu bekommen. *Berliner Zeitung*. 25.04.2003. Online: <http://www.berliner-zeitung.de/newsticker/weltweit-bemuehen-sich-militaers-und-meteorologen-darum--wetter-unter-ihre-kontrolle-zu-bekommen-die-dritte-macht-des-krieges,10917074,10081938.html> [abgerufen am: 22.02.2016].
- Hepburn, C. (2006). Discounting climate change damages: Working note for the Stern Review. University of Oxford.
- HM Treasury (2003). The green book: Appraisal and evaluation in central government. Online: http://www.hm-treasury.gov.uk/d/green_book_complete.pdf [abgerufen am: 22.02.2016].
- Holt, C., und S. Laury (2002). Risk aversion and incentive effects. *American Economic Review* 92(5): 1644–1655.
- Horton, J. (2011). Geoengineering and the myth of unilateralism: Pressures and prospects for international cooperation. *Stanford Journal of Law, Science & Policy* 4: 56–68.
- House of Commons (2010). The Regulation of Geoengineering: Report, together with formal minutes, oral and written evidence. House of Commons Science and Technology Committee, London.
- Hulme, M. (2009). *Why We Disagree About Climate Change: Understanding Controversy, Inaction and Opportunity*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Humphreys, D. (2011). Smoke and mirrors: Some reflections on the science and politics of geoengineering. *The Journal of Environment Development* 20(2): 99–120.
- IEA (International Energy Agency) (2010). *World Energy Outlook*. Paris.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001). Climate change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability: Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- 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 and L.A. Meyer (eds.)]. Genf.
- Jamieson, D. (1996). Ethics and Intentional Climate Change. *Climatic Change* 33(3): 323–336.
- 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.
- Keith, D. (2000). Geoengineering the Climate: History and Prospect. *Annual Review of Energy and the Environment* 25(1): 245–284.
- Keith, D. (2010a). Engineering the Planet. In S. Schneider et al. (Hrsg.), *Climate Change Science and Policy*: Island Press (494–501).
- Keith, D. (2010b). Photophoretic levitation of engineered aerosols for geoengineering. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107(38): 16428–16431.
- 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/sondierungsstudie-climate-engineering.html?file=tl_files/media/downloads/wirtschaft.pdf [abgerufen am: 22.02.2016].
- Köhler, P., J. Hartmann und D. Wolf-Gladrow (2010). Geoengineering potential of artificially enhanced silicate weathering of olivine. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107(47): 20228–20233.

- Koopmans, T. (1960). Stationary ordinal utility and impatience. *Econometrica: Journal of the Econometric Society* 28(2): 287–309.
- Körtzinger, A., und D. Wallace (2002). Der globale Kohlenstoffkreislauf und seine anthropogene Störung. *pro-met* (28): 64–70.
- Künzli, N., R. Kaiser, S. Medina, M. Studnicka, O. Chanel, P. Filliger, M. Herry und F. Horak (2000). Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: A European assessment. *The Lancet* 356(9232): 795–801.
- Lacis, A., und M. Mishchenko (1995). Climate forcing, climate sensitivity, and climate response: A radiative modelling perspective on atmospheric aerosols. In Charlson, R. und Heinztenberg, J. (Hrsg.), *Aerosol Forcing of Climate*. Chichester: Wiley (11–42).
- Laird, D.A., R.C. Brown, J.E. Amonette und J. Lehmann (2009). Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 3: 547–562.
- Lampitt, R.S., E.P. Achterberg, T.R. Anderson, J.A. Hughes, M.D. Iglesias-Rodriguez, B.A. Kelly-Gerreyn, M. Lucas, E.E. Popova, R. Sanders, J.G. Shepherd, D. Smythe-Wright und A. Yool (2008). Ocean fertilization: a potential means of geoengineering? *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 366: 3919–3945.
- Lehmann, J., J. Gaunt und M. Rondon (2006). Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—a review. *Mitigation Adaptation Strategies Global Change* 11(2): 403–427.
- Lin, A. (2009). Geoengineering governance. *Issues in Legal Scholarship* 8(3): Article 2.
- 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: 22.02.2016].
- de Lopez, T. (2003). Economics and stakeholders of Ream National Park, Cambodia. *Ecological Economics* (46): 269–282.
- Lubbadeh, J. (2008). China schießt auf Regenwolken. *Der Spiegel* vom 04.08.2008. Online: <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/0,1518,569361,00.html> [abgerufen am: 22.02.2016].
- MacMynowski, D.G., D.W. Keith, K.G. Caldeira und H.J. Shin (2011). Can we test geoengineering? *Energy & Environmental Science* 4(12): 5044–5052.
- Marchetti, C. (1977). On geoengineering and the CO₂ problem. *Climatic Change* 1: 59–88.
- Marcouiller, D., und J. Stier (1996). Forest management alternatives and income distribution in the Lake States. *Staff Paper Series* 48. Madison, WI: Department of Forestry, University of Wisconsin-Madison.
- Martin, J. (1990). Glacial-interglacial change: The iron hypothesis. *Paleoceanography* 5: 1–13.
- Mendelsohn, R., und J. Neumann (2004). *The impact of climate change on the United States economy*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Mercer, A., D. W. Keith und J.D Sharp (2011). Public understanding of Solar Radiation Management. *Environmental Research Letters* 6(4): doi:10.1088/1748-9326/6/4/044006.
- Milbank, D. (2010). Plan B on climate change. *The Washington Post* vom 17.10.2010, Washington, D.C.
- Millard-Ball, A. (2012). The Tuvalu syndrome. Can geoengineering solve climate's collective action problem? *Climatic Change* (110): 1047–1066.
- Mitchell, D., und W. Finnegan (2009). Modification of cirrus clouds to reduce global warming. *Environmental Research Letters* 4: 45102.
- Moreno-Cruz, J. (2010). Mitigation and the Geoengineering Threat. Online: <http://works.bepress.com/cgi/viewcontent.cgi?article=1002&context=morenocruz&sei-redir=1#search=%22Mitigation+and+the+Geoengineering+Threat%22> [abgerufen am: 22.02.2016].

- Moreno-Cruz, J., und D. Keith (2012). Climate policy under uncertainty: A case for solar geoengineering. *Climatic Change* (3): 431–444.
- 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: 22.02.2016].
- Mueller, D. (2003). Public Choice III. *Cambridge Books*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Murphy, D. (2009). Effect of Stratospheric Aerosols on Direct Sunlight and Implications for Concentrating Solar Power. *Environmental Science and Technology* 8(43): 2784–2786.
- Murray, B. (2003). Economics of Forest Carbon Sequestration. In E. Sills und K. Abt (Hrsg.), *Forest in a Market Economy*. Dordrecht: Springer Science+Business Media (221–39).
- Nabuurs, G.J., O. Masera, K. Andrasko, P. Benitez-Ponce, R. Boer, M. Dutschke, E. Elsiddig, J. Ford-Robertson, P. Frumhoff und T. Karjalainen (2007). Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- NERC (2011). Experiment Earth? Report on a public dialogue on geoengineering. National Academy Press (Hrsg.), Washington D.C. Online: <http://www.nerc.ac.uk/about/consult/geoengineering-dialogue-final-report.pdf> [abgerufen am: 30.03.2011].
- Nijkamp, P., P. Rietveld und H. Voogd (1990). *Multicriteria evaluation in physical planning*. North Holland: Elsevier B.V.
- NRC (National Research Council) (2002). *Abrupt climate change. Inevitable surprises*. Washington, D.C.: National Academy Press.
- NRC (National Research Council) (2003). *Critical issues in weather modification research*. Washington, D.C.: National Academies Press.
- Olson, R. (2011). Geoengineering For Decision Makers. *Science and Technology* (November).
- Oruganti, Y. und S. Bryant (2009). Pressure build-up during CO₂ storage in partially confined aquifers. *Energy Procedia* 1: 3315–3322.
- Oschlies, A., W. Koeve, W. Rickels und K. Rehdanz (2010a). Side effects and accounting aspects of hypothetical large-scale Southern Ocean iron fertilization. *Biogeoscience* 7: 4017–4035.
- Oschlies, A., M. Pahlow, A. Yool, R.J. Matear (2010b). Climate engineering by artificial ocean upwelling: Channelling the sorcerer’s apprentice. *Geophysical Research Letters* 37, doi:10.1029/2009GL041961.
- Ott, K. (2010a). Argumente für und wider „Climate Engineering“. Versuch einer Kartierung. *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis* (2): 32–43.
- Ott, K. (2010b). Die letzte Versuchung – Eine ethische Betrachtung von Geo-Engineering. *Politische Ökologie* 120 (120): 40–43.
- Ott, K. (2010c). Kritische Kartierung der Argumente der Klimamanipulation. In G. Altner et al. (Hrsg.), *Jahrbuch Ökologie 2011*. Stuttgart: Hirzel.
- Ott, K., G. Klepper, S. Lingner, A. Schäfer, J. Scheffran und D.F. Sprinz (2004). Reasoning goals of climate protection – Specification of Art. 2 UNFCCC. Research Report, 202 41 252, Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin.
- Pearce, D. (1992). *Cost-benefit analysis*: Palgrave Macmillan.
- Pielke Jr., R. (2009). An idealized assessment of the economics of air capture of carbon dioxide in mitigation policy. *Environmental Science and Policy* 12: 216–225.
- 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.
- Powers, E. (1871). *War and the weather. Or, The artificial production of rain*. Chicago: S.C. Griggs.
- President’s Science Advisory Council (1965). *Restoring the quality of the environment*. Washington D.C.
- Randall, A. (2011). *Risk and precaution*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

- Ranjan, M., und H. Herzog (2011). Feasibility of air capture. *Energy Procedia* 4: 2869–2876.
- 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.
- Rau, G.H., K.G. Knauss, W.H. Langer und K. Caldeira (2007). Reducing energy-related CO₂ emissions using accelerated weathering of limestone. *Energy* 32(8): 1471–1477.
- Rayner, S., C. Redgwell, J. Savulescu, N. Pidgeon und T. Kruger (2009). Memorandum on draft principles for the conduct of geoengineering research. House of Commons Science and Technology Committee enquiry into The Regulation of Geoengineering. (Dezember.) O.O.
- 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. Online: http://www.kiel-earth-institute.de/sondierungsstudie-climate-engineering.html?file=tl_files/media/downloads/risikowahrnehmung.pdf [abgerufen am: 22.02.2016].
- Ricke, K., M. G. Morgan und M. Allen (2010). Regional climate response to solar radiation management. *Nature Geoscience* 3: 537–541.
- 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.
- Robock, A. (2008a). 20 reasons why geoengineering may be a bad idea. *Bulletin of the Atomic Scientists* 64(2): 14–18.
- Robock, A. (2008b). Atmospheric Science: Whither Geoengineering? *Science* 320(5880): 1166–1167.
- Robock, A. (2009). A biased economic analysis of geoengineering. Online: <http://www.realclimate.org/index.php/archives/2009/08/a-biased-economic-analysis-of-geoengineering/> [abgerufen am: 22.02.2016].
- 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. Marquardt, B. Kravitz und G.L. Stenchikov (2009). Benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering. *Geophysical Research Letters* 36: 1–9.
- Robock, A., A. Bunzl, B. Kravitz und G.L. Stenchikov (2010). A test for geoengineering? *Science* 327(5965): 530–531.
- Royal Society (2009). Geoengineering the Climate: Science, governance and uncertainty. *RS Policy document* 10/09.
- Rusin, N., und L. Flit (1960). *Man versus climate*. Moskau.
- 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 A* 366: 3989–4006.
- Sardemann, G., und A. Grunwald (2010). Climate Engineering: ein Thermostat für die Erde. *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis* 19(2): 4–8.
- Schäfer, S. M. Lawrence, H. Stelzer, W. Born, S. Low, A. Aaheim, P. Adriázola, G. Betz, O. Boucher, A. Cari-us, 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. Oschlies, 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. doi: <http://doi.org/10.2312/iass.2015.024>
- Scheer, D., und O. Renn (2010). Klar ist nur die Unklarheit: Notwendiger Plan B gegen den Klimawandel? *Geo-Engineering. Politische Ökologie* 120: 27–29.

- Scheffran, J., und A. Battaglini (2011). Climate and conflicts – the security risks of global warming. *Regional Environmental Change* 11(1): 27–39.
- Schelling, T. (1996). The Economic Diplomacy of Geoengineering. *Climatic Change* 33: 303–307.
- Schlenker, W., und M. Roberts (2009). Nonlinear temperature effects indicate severe damages to US crop yields under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106(37): doi: 10.1073/pnas.0906865106.
- Schneider, S. (1996). Geoengineering: Could or Should We Do It? *Climatic Change* 33(3): 291–302.
- Schneider, S. (2004). Abrupt non-linear climate change, irreversibility and surprise. *Global Environmental Change Part A* 14(3): 245–258.
- Schwartz, P., und D. Randall (2003). An Abrupt Climate Change Scenario and Its Implications for United States National Security. Online: http://climate.org/PDF/clim_change_scenario.pdf [abgerufen am: 22.02.2016].
- Socolow, R.H., M. Desmond, R. Aines, J. Blackstock, O. Bolland, T. Kaarsberg, N. Lewis, M. Mazozotti, A. Pfeffer, K. Sawyer, J. Sirola, B. Smit und J. Wilcox (2011). Direct Air Capture of CO₂ with Chemicals. Online: <http://www.aps.org/policy/reports/popa-reports/loader.cfm?csModule=security/getfile&PageID=244407> [abgerufen am: 22.02.2016].
- Solomon, S. (1999). Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history. *Reviews of Geophysics* 37(3): 275–316.
- Sprinz, D. (2009). Long-Term Policy Problems: Definition, Origin, and Responses. *Global Environmental Politics* 9(3): 1–8.
- STC (2010). The Regulation of Geoengineering: Fifth Report to the House of Commons, Session 2009–10. Online: <http://www.publications.parliament.uk/pa/cm200910/cmselect/cmsctech/221/221.pdf> [abgerufen am: 22.02.2016].
- Stern, N. (2007). *The economics of climate change: the Stern review*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Stiglitz, J. (2000). *Economics of the public sector*. New York: WW Norton.
- Stirling, A. (2008). Science, precaution and the politics of technological risk: Converging implications in evolutionary and social scientific perspectives. *Annals of the New York Academy of Science* 1128: 95–110.
- Sunstein, C. (2002). *Risk and reason: Safety, law, and the environment*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Tilmes, S., R. Müller und R. Salawitch (2008). The sensitivity of polar ozone depletion to proposed geoengineering schemes. *Science* 320: 1201–1204.
- 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.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency) (1987). EPA’s use of benefit-cost analysis: 1981-1986 Document No. EPA-230-05-87-028, August 1987, 1-3. Online: [http://yosemite.epa.gov/ee/epa/erm.nsf/vwAN/EE-0222-1.pdf/\\$file/EE-0222-1.pdf](http://yosemite.epa.gov/ee/epa/erm.nsf/vwAN/EE-0222-1.pdf/$file/EE-0222-1.pdf) [abgerufen am: 15.11.2011].
- van Kooten, C., und B. Sohngen (2007). Economics of forest ecosystem carbon sinks: a review. *International Review of Environmental and Resource Economics*: 237–269.
- Victor, D. (2008). On the regulation of geoengineering. *Oxford Review of Economic Policy* 24(2): 322–336.
- Victor, D. (2011). *Global warming gridlock: Creating more effective strategies for protecting the planet*. New York: Cambridge University Press.
- Virgoe, J. (2009). International Governance of a Possible Geoengineering Intervention to Combat Climate Change. *Climatic Change* 95: 103–119.
- Viscusi, W. (1995). Discounting health effects for medical decisions. In Sloan, F. (Hrsg.), *Valuing health care. Costs, benefits, and effectiveness of pharmaceuticals and other medical technologies*. Cambridge, UK: Cambridge University Press (135–147).

- 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: 121–130.
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) (2007). *Welt im Wandel. Sicherheitsrisiko Klimawandel*. Berlin: Springer.
- Weitzman, M. (1998). Why the far-distant future should be discounted at its lowest possible rate. *Journal of environmental economics and management* 36(3): 201–208.
- Weitzman, M. (2009). On modelling and interpreting the economics of catastrophic climate change. *The Review of Economics and Statistics* 91(1): 1–19.
- Wieland, V. (2000). Learning by doing and the value of optimal experimentation. *Journal of Economic Dynamics and Control* 24(4): 501–534.
- Wiertz, T., und D. Reichwein (2010). Climate Engineering zwischen Klimapolitik und Völkerrecht. *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis* 19(2): 17–25.
- Wilson, J.C., H.H. Jonsson, C.A. Brock, D.W. Toohey, L.M. Avallone, D. Baumgardner, J.E. Dye, L.R. Poole, D.C. Woods, R.J. DeCoursey, M. Osborn, M. Pitts, K.K. Kelly, K.R. Chan, G.V. Ferry, M. Loewenstein, J.R. Podolske und A. Weaver (1993). In-situ observations of aerosol and chlorine monoxide after the 1991 eruption of Mount Pinatubo: Effect of reactions on sulfate aerosol. *Science* 261: 1140–1143.
- Wolf, D., J.E. Amonette, F.A. Street-Perrott, J. Lehmann und S. Joseph (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications* 56: 1–9.
- Zedalis, R. (2010). Climate Change and the National Academy of Sciences' Idea of Geoengineering: One American Academy's Perspective on First Considering the Text of Existing International Agreements. *European Energy and Environmental Law Review (EEELR)* 19(1): 18–32.
- Zhou, S. und P. Flynn (2005). Geoengineering downwelling ocean currents: a cost assessment. *Climatic Change* 71: 203–220.
- 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/sondierungsstudie-climate-engineering.html?file=tl_files/media/downloads/politikwissenschaft.pdf [abgerufen am: 22.02.2016].